

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Diseño de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, realizando un análisis económico y un manual de operación y mantenimiento en un ingenio azucarero**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Francisco Eduardo Bolaños García,  
Andrea Mariana Gómez Contreras,  
Nicolle Dominique Sibrián Illescas,  
Allan Felipe Tún Flores y  
Ramiro Arturo Wong Martínez

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química;  
Silvia Lorena Herrera Bolaños y  
Alejandra Valladares Mejicanos  
para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Industrial

Guatemala

2018

Diseño de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales,  
realizando un análisis económico y un manual de operación y  
mantenimiento en un ingenio azucarero



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Diseño de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, realizando un análisis económico y un manual de operación y mantenimiento en un ingenio azucarero**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Francisco Eduardo Bolaños García,  
Andrea Mariana Gómez Contreras,  
Nicolle Dominique Sibrián Illescas,  
Allan Felipe Tún Flores y

Ramiro Arturo Wong Martínez

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química;

Silvia Lorena Herrera Bolaños y

Alejandra Valladares Mejicanos

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Industrial

Guatemala

2018



Vo. Bo.:

(f)   
Ingeniera Frances Annette Recari Fernández  
Coordinadora de Megaproyecto

(f)   
Ingeniero Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano  
Director del Departamento de Ingeniería Química

(f)   
Ingeniero Estuardo Antonio Sierra Arias  
Director del Departamento de Ingeniería Industrial

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de noviembre de 2018



## PREFACIO

La culminación de este trabajo de graduación va dedicada a las familias, de quienes siempre se tuvo apoyo incondicional. Gracias por brindar tantos esfuerzos a nuestra educación, por velar siempre en nuestro bienestar y futuro, sin esperar nada a cambio. Le agradecemos a Dios por darnos la vida y permitirnos formarnos como profesionales. Así también a los asesores, Ing. Gamaliel Zambrano, Inga. Frances Recari, Ing. Allan Cifuentes, Ing. Guillermo Callén, Ing. Raúl Dacaret e Ing. Juan José Lira, por el tiempo dedicado, su guía y el aporte de su experiencia en la elaboración del presente trabajo de graduación. Gracias al Ing. Gustavo Pérez, Lic. Iván Santizo y a Enrique Chavarria por facilitar la obtención de datos en todas las áreas del ingenio azucarero, por tener una comunicación abierta y dedicarnos el tiempo en cada visita. También agradecemos grandemente al Departamento de Ingeniería Civil por dar las herramientas e instrumentos para realizar el estudio topográfico, en especial, a Romeo Mont, estudiante de Ingeniería Civil, por su buena voluntad y tiempo en ir a realizar las mediciones en el terreno y elaborar planos de nivel.



# ÍNDICE

	Página
Prefacio .....	iv
Lista de tablas.....	x
Lista de figuras.....	xx
Resumen .....	xxvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	5
A. General del Megaproyecto .....	5
B. Específicos del Megaproyecto.....	5
III. JUSTIFICACIÓN.....	9
IV. MARCO TEÓRICO.....	11
A. Estimación del caudal teórico.....	11
B. Trampas de aceites y grasas .....	12
C. Cribado.....	13
D. Canal Parshall.....	13
E. Homogeneización del caudal.....	16
F. Sedimentación primaria .....	17
G. Tratamiento biológico de aguas residuales .....	19
H. Tipos de tratamiento secundario.....	19
I. Fases de la digestión anaerobia.....	20
J. Factores que afectan el tratamiento secundario anaerobio .....	22
K. Comparación entre el tratamiento biológico anaerobio y aerobio .....	24
L. Tipos de tratamiento secundario anaerobio, según tipo de proceso.....	25
M. Filtros anaerobios de flujo ascendente .....	26
N. Lagunas anaerobias de estabilización .....	32
O. Producción de lodos.....	34
P. Producción de biogás durante la digestión anaerobia .....	35
Q. Nitrificación .....	36
R. Desnitrificación .....	39

S.	Proceso de lodos activados.....	39
T.	Parámetros de diseño y operación del proceso de lodos activados.....	41
U.	Sistemas de aireación.....	46
V.	Sistema de clarificación secundario.....	49
W.	Bombas .....	51
X.	Tuberías y accesorios.....	52
Y.	Pérdidas por evaporación de un tanque abierto .....	55
Z.	Desinfección.....	55
AA.	Desinfectantes .....	56
BB.	Desinfección por cloración.....	60
CC.	Parámetros de diseño para un sistema de desinfección por cloración .....	62
DD.	Almacenamiento del hipoclorito de sodio.....	67
EE.	Bombas dosificadoras de químicos.....	69
FF.	Mezcladores estáticos .....	70
GG.	Biogás .....	75
HH.	Lodos .....	83
II.	Disposición de lodos aplicable en Guatemala .....	93
JJ.	Manual de operaciones .....	93
KK.	Manual de mantenimiento.....	94
LL.	Normas guatemaltecas sobre el mantenimiento industrial y la seguridad ocupacional .....	96
MM.	Seguridad Industrial.....	97
NN.	Matriz de riesgos .....	97
OO.	Equipo de protección personal .....	97
PP.	Tasa interna de retorno – TIR.....	99
QQ.	Valor presente neto .....	100
RR.	Análisis de sensibilidad.....	101
SS.	Análisis económico.....	101
TT.	Análisis FODA .....	102
UU.	Análisis PESTEL.....	102
VV.	Cinco fuerzas de Porter .....	102
V.	ANTECEDENTES .....	103
A.	Características fisicoquímicas y microbiológicas de tres fosas sépticas .....	104

B.	Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) en un complejo comercial y residencial .....	106
C.	Laguna anaerobia de estabilización para tratamiento de aguas residuales industriales .....	107
D.	Cinética de reacción durante el proceso de desinfección .....	107
E.	Dimensionamiento del tanque de contacto (reactor tipo flujo pistón) .....	108
F.	Aprovechamiento de biogás en comunidades y agricultura .....	109
G.	Aprovechamiento de biogás en Guatemala .....	110
H.	Manual de operación y mantenimiento .....	110
VI.	METODOLOGÍA.....	111
A.	Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico.....	111
B.	Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales.....	120
C.	Módulo 3: Diseño del tratamiento terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario .....	124
D.	Módulo 4: Diseño del tratamiento cuaternario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario .....	132
E.	Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales.....	136
F.	Módulo 6: Manual de operación y mantenimiento preventivo.....	140
G.	Módulo 7: Análisis económico.....	142
VII.	RESULTADOS .....	147
A.	Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico.....	147
B.	Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales.....	159
C.	Módulo 3: Diseño del sistema de tratamiento terciario .....	170
D.	Módulo 4: Diseño del tratamiento cuaternario para una planta de tratamiento de aguas residuales .....	180
E.	Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales.....	186
F.	Módulo 6: Manual de operación y mantenimiento preventivo.....	194
G.	Módulo 7: Análisis económico.....	270

VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	285
A.	Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico.....	285
B.	Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales.....	290
C.	Módulo 3: Diseño del sistema terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario .....	294
D.	Módulo 4: Diseño del sistema cuaternario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario .....	298
E.	Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales.....	302
F.	Módulo 6: Manual de operación y mantenimiento preventivo.....	307
G.	Módulo 7: Análisis económico.....	309
IX.	CONCLUSIONES .....	315
X.	RECOMENDACIONES .....	321
XI.	Bibliografía.....	327
XII.	ANEXOS.....	335
A.	Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico.....	335
B.	Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales.....	388
C.	Módulo 3: Diseño del sistema terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario .....	412
D.	Módulo 4: Diseño del tratamiento cuaternario de una planta de tratamiento anaeróbico para reducir la concentración de coliformes fecales del agua residual de un ingenio azucarero .....	453
E.	Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales.....	476
F.	Módulo 7: Análisis económico.....	493
XIII.	GLOSARIO.....	517

## LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Caudales habituales de agua residual descargada a los sistemas de recolección.	11
Tabla 2. Consumo de agua por aparatos domésticos. ....	12
Tabla 3. Áreas de la superficie del separador para un caudal de 1 L/s. ....	13
Tabla 4. Relación sugerida para el diseño de la sección convergente. ....	14
Tabla 5. Ancho de garganta y fórmulas para determinar el caudal en el Canal Parshall. .	15
Tabla 6. Dimensiones del Canal Parshall. ....	15
Tabla 7. Consideraciones de diseño para el tratamiento anaerobio, según los factores que lo afectan. ....	23
Tabla 8. Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio de aguas residuales, en comparación con el tratamiento aerobio. ....	24
Tabla 9. Requerimientos del material de empaque en filtros anaeróbicos. ....	28
Tabla 10. Valores de diseño permisibles para la carga volumétrica de DBO y la eficiencia de remoción de DBO en lagunas anaerobias de estabilización a varias temperaturas. ....	33
Tabla 11 Coeficientes cinéticos de nitrificación a 20°C y sus coeficientes de corrección por temperatura $\theta$ . ....	38
Tabla 12 Eficiencias de distintos tipos de difusores de burbuja a 4.5 m de profundidad .	47
Tabla 13 Velocidades típicas de flujo y caída de presión de líquidos en tuberías. ....	54
Tabla 14 Velocidades típicas de flujo para aire comprimido en tuberías varían según el diámetro de tubería a utilizar . ....	54
Tabla 15. Características de un buen desinfectante. ....	56
Tabla 16. Ventajas y desventajas entre las tecnologías convencionales para la reducción de patógenos. ....	59
Tabla 17. Condiciones operativas para las tecnologías convencionales de desinfección .	59
Tabla 18. Diamantes de materiales peligrosos de los distintos desinfectantes. ....	60
Tabla 19. Valores de Ct para diferentes niveles de inactivación de bacterias en efluentes secundarios con un pH de 7.5 y una temperatura de 20 °C . ....	65
Tabla 20. Gravedad específica y concentración de cloro activo para soluciones con distinta concentración de NaOCl. ....	68
Tabla 21. Constante de velocidad de reacción para la degradación de la concentración de hipoclorito a distintas temperaturas. ....	69
Tabla 22. Parámetros para el mezclado en un régimen de flujo laminar . ....	75
Tabla 23. Parámetros para el mezclado en un régimen de flujo turbulento . ....	75
Tabla 24. Resumen de las características de los efluentes de agua residual analizados en (Haas & Karra, 1984) y el número de muestras analizadas. ....	108
Tabla 25. Parámetros cinéticos propuestos por (Haas & Karra, 1984). ....	108
Tabla 26 Listado de equipos utilizados durante la experimentación . ....	130
Tabla 27 Reactivos utilizados durante experimentación . ....	130
Tabla 28. Listado de reactivos utilizados en la experimentación . ....	132
Tabla 29. Listado de equipos utilizados en la experimentación. ....	132

Tabla 30. Caudales teóricos actuales calculados usando los métodos por Dotación y de Hunter. ....	147
Tabla 31. Caudal teórico futuro calculado usando el Método por Dotación. ....	147
Tabla 32. Composición másica del agua residual en los tratamientos preliminar y primario. ....	148
Tabla 33. Remoción de DBO, DQO y SST neta en los tratamiento preliminar y primario propuestos. ....	148
Tabla 34. Dimensionamiento de la trampa de aceites y grasas diseñada. ....	156
Tabla 35. Dimensiones de la criba diseñada y su canal. ....	156
Tabla 36. Dimensiones de la malla diseñada. ....	157
Tabla 37. Dimensiones del canal Parshall diseñado. ....	157
Tabla 38. Dimensiones del tanque de homogeneización de caudal diseñado. ....	158
Tabla 39. Dimensiones del sedimentador primario diseñado. ....	158
Tabla 40. Dimensiones de la pantalla de difusión de entrada al sedimentador primario diseñado. ....	158
Tabla 41. Cantidad, dimensiones y tiempo de retención hidráulica de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	159
Tabla 42. Especificaciones de los anillos Raschig propuestos como medio filtrante para los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	159
Tabla 43. Parámetros de descarga relacionados a la materia orgánica esperados con el sistema de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	160
Tabla 44. Subproductos del sistema de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	160
Tabla 45. Dimensiones y tiempo de retención hidráulica de la laguna anaerobia de estabilización. ....	164
Tabla 46. Parámetros de descarga relacionados a la materia orgánica esperados con la laguna anaerobia de estabilización. ....	164
Tabla 47. Subproductos de la laguna anaerobia de estabilización. ....	164
Tabla 48. Materiales necesarios para la construcción de la laguna anaerobia de estabilización. ....	165
Tabla 49 Medidas y volumen de la zona de aireación para el tratamiento terciario después de FAFA. ....	170
Tabla 50 Medidas, volumen de la zona de aireación para el tratamiento terciario después de laguna de estabilización anaeróbica. ....	170
Tabla 51 Medidas y volumen de la zona anóxica para el tratamiento terciario después de FAFA. ....	171
Tabla 52 Medidas y volumen de la zona anóxica para el tratamiento terciario después de Laguna de estabilización anaeróbica. ....	171
Tabla 53 Medidas, caudal de salida hacia tratamiento cuaternario y volumen del clarificador secundario para el tratamiento terciario después de FAFA. ....	171
Tabla 54 Medidas, caudal de salida hacia tratamiento cuaternario y volumen del clarificador secundario para el tratamiento terciario después de laguna anaeróbica. ....	172
Tabla 55 Porcentaje de remoción obtenido durante prueba experimental de 166h y porcentaje obtenido del cálculo. ....	172

Tabla 56 Medidas y parámetros del sistema de lodos activados colocado después de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente con la propuesta de derivación del 15% del caudal del tratamiento primario. ....	178
Tabla 57 Medidas y parámetros del sistema de lodos activados colocado después de la laguna de estabilización anaeróbica, con la propuesta de derivación del 15% del caudal del tratamiento primario .....	178
Tabla 58 Concentraciones de nitrógeno total de salida obtenidas al combinar el producto Biozyme FS/AC en el sistema de lodos activados colocado después de FAFA .....	179
Tabla 59 Concentraciones de nitrógeno total de salida obtenidas al combinar el producto Biozyme FS/AC en el sistema de lodos activados colocado después de laguna de estabilización anaeróbica .....	179
Tabla 60. Características del tanque de contacto diseñado para el proceso de desinfección .....	180
Tabla 61. Volumen, dimensiones y material del tanque de almacenamiento dimensionado para hipoclorito de sodio .....	180
Tabla 62. Caudal, cabeza y materiales de la bomba peristáltica propuesta .....	180
Tabla 63. Longitud, diámetro y material del mezclador estático propuesto .....	181
Tabla 64. Dimensiones y características de la bomba centrífuga dimensionada para el sistema propuesto .....	181
Tabla 65. Evaluación de uso de biogás para generación de energía eléctrica. ....	186
Tabla 66. Evaluación de uso de biogás en cocina industrial para sustituir GLP. ....	186
Tabla 67. Especificaciones del tratamiento para remoción de sulfuro de hidrógeno del biogás producido. ....	186
Tabla 68. Especificaciones de tubería de PVC para el transporte de lodos y la extracción de lixiviados. ....	193
Tabla 69. Especificaciones de las bombas para el transporte de lodos y la extracción de lixiviados. ....	193
Tabla 70. Tiempo de operación. ....	196
Tabla 71. Especificación de la planta de tratamiento de aguas .....	196
Tabla 72. Valorización de consecuencia. ....	226
Tabla 73. Valorización de exposición .....	226
Tabla 74. Valorización de probabilidad. ....	226
Tabla 75. Categoría de riesgos .....	227
Tabla 76. Mantenimiento general. ....	262
Tabla 77. Programa de mantenimiento preventivo. ....	263
Tabla 78. Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores .....	265
Tabla 79. Parámetros y límites máximos permisible para lodos .....	266
Tabla 80. Análisis químico .....	266
Tabla 81. Ficha de registro de caudal .....	267
Tabla 82. Ficha de dosificación de hipoclorito de sodio .....	267
Tabla 83. Ficha de registro de nitrógeno total. ....	267
Tabla 84. Ficha de registro de pH .....	267
Tabla 85. Ficha de registro de limpieza y mantenimiento 1 .....	268
Tabla 86. Ficha de registro de limpieza y mantenimiento 2 .....	268

Tabla 87. Ficha de registro de limpieza y mantenimiento 3 .....	268
Tabla 88. Perfil del operario .....	269
Tabla 89. Costo de energía PTAR.....	270
Tabla 90. Costo de mano de obra PTAR .....	270
Tabla 91. Comparación inversión total -ambas propuestas .....	271
Tabla 92. Componente inversión tratamiento preliminar y primario .....	271
Tabla 93. Componente inversión tratamiento secundario.....	272
Tabla 94. Componente inversión tratamiento terciario .....	273
Tabla 95. Componente inversión tratamiento cuaternario .....	274
Tabla 96. Componente inversión tratamiento de lodos y biogás.....	275
Tabla 97. Inversión inicial PTAR.....	277
Tabla 98. Costo de operaciones unitarias .....	277
Tabla 99. Resultados escenario pesimista.....	278
Tabla 100. Resultados escenario más probable, biogás .....	279
Tabla 101. Resultados escenario más probable, compost.....	279
Tabla 102. Resultados escenario optimista .....	280
Tabla 103. FODA.....	281
Tabla 104. PESTEL.....	282
Tabla 105. 5 fuerzas de Porter.....	283
Tabla 106. Características y parámetros del agua residual tipo ordinario alimentada a la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia del ingenio azucarero. ....	335
Tabla 107. Generación de agua residual para los servicios en el ingenio azucarero.....	335
Tabla 108. Cantidad de huéspedes en el hotel del ingenio azucarero en época de zafra.	336
Tabla 109. Mediciones para el cálculo del caudal de los lavamanos en el ingenio azucarero.....	336
Tabla 110. Mediciones para el cálculo del caudal de las duchas en el ingenio azucarero. ....	336
Tabla 111. Mediciones para el cálculo del caudal del mingitorio de pared en el ingenio azucarero.....	337
Tabla 112. Características del mingitorio de pared en el ingenio azucarero.....	337
Tabla 113. Personal contratado por el ingenio azucarero para la zafra a lo largo de los años.....	337
Tabla 114. Contabilización de visitas al sanitario de la fosa séptica 1 en el ingenio azucarero durante la zafra. ....	338
Tabla 115. Identificación de áreas y fosas sépticas que alimentarán la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia en el ingenio azucarero. ....	339
Tabla 116. Contabilización de aparatos sanitarios descargados a cada fosa séptica en el ingenio azucarero. ....	340
Tabla 117. Cantidad de aparatos sanitarios utilizada para calcular el caudal teórico actual por el Método por Dotación, en el ingenio azucarero.....	341
Tabla 118. Consumo habitual de agua por descarga para varios aparatos domésticos en el ingenio azucarero. ....	342
Tabla 119. Unidades Hunter para varios aparatos domésticos.....	342
Tabla 120. Parámetros para el cálculo del caudal teórico futuro calculado usando el Método por Dotación.....	342

Tabla 121. Relación de velocidad horizontal sobre la velocidad ascendente de la grasa y el factor de compensación para turbulencia. ....	343
Tabla 122. Propiedades de grasas y aceites según la Norma DIN 4040. ....	343
Tabla 123. Parámetros de diseño para la trampa de aceites y grasas. ....	343
Tabla 124. Parámetros de diseño para la pantalla de distribución de la trampa de grasas. ....	344
Tabla 125. Parámetros de diseño para el dimensionamiento de las cribas. ....	344
Tabla 126. Caracterización de sólidos flotantes removidos por las cribas con un ancho de luz de 0.025 m. ....	344
Tabla 127. Parámetros de diseño para calcular la pérdida de energía en las cribas. ....	345
Tabla 128. Parámetros de diseño para el tanque de homogeneización. ....	345
Tabla 129. Parámetros de diseño para el sedimentador primario. ....	345
Tabla 130. Parámetros de diseño del difusor de entrada al sedimentador primario. ....	346
Tabla 131. Viscosidad cinemática de partículas sedimentables según la temperatura. ..	346
Tabla 132. Características de las partículas sedimentables a sedimentar en el sedimentador primario. ....	346
Tabla 133. Porcentaje de remoción de DQO y constantes utilizadas en el cálculo de remoción de DBO y SST de las aguas residuales salientes del sedimentador primario. ....	347
Tabla 134. Contabilización de unidades de agua residual para los servicios en el ingenio azucarero. ....	364
Tabla 135. Caudal de agua residual para los servicios en el ingenio azucarero. ....	364
Tabla 136. Promedio y desviación estándar de huéspedes en el hotel del ingenio azucarero en zafra. ....	365
Tabla 137. Caudal y consumo por visita de los lavamanos en el ingenio azucarero. ....	365
Tabla 138. Promedio y desviación estándar del consumo de agua por visita de los lavamanos en el ingenio azucarero. ....	365
Tabla 139. Caudal y consumo por visita de las duchas en el ingenio azucarero. ....	365
Tabla 140. Promedio y desviación estándar del consumo de agua por visita de las duchas de hombres en el ingenio azucarero. ....	366
Tabla 141. Caudal del mingitorio de pared con 34 puntos de descarga en el ingenio azucarero. ....	366
Tabla 142. Crecimiento de personal contratado por el ingenio azucarero para la zafra a lo largo de los años. ....	366
Tabla 143. Promedio, desviación estándar y frecuencia de uso al sanitario de la fosa séptica 1 en el ingenio azucarero durante la zafra. ....	366
Tabla 144. Caudales para varios aparatos domésticos en el ingenio azucarero. ....	367
Tabla 145. Caudal del consumo de agua habitual de agua para varios aparatos domésticos por el Método por Dotación, en el ingenio azucarero. ....	368
Tabla 146. Caudal del consumo de agua habitual de agua para varios aparatos domésticos por el Método de Hunter, en el ingenio azucarero. ....	369
Tabla 147. Caracterización de la alimentación a la trampa de aceites y grasas de la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	370
Tabla 148. Balance de masa para el agua residual en las etapas diseñadas para la trampa de aceites y grasas de la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia del ingenio azucarero. ....	370

Tabla 149. Características del aceite y la trampa de aceites y grasas diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	370
Tabla 150. Determinación del factor de compensación de la trampa de aceites y grasas diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	371
Tabla 151. Especificaciones de la pantalla de distribución de la trampa de aceites y grasas diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	371
Tabla 152. Parámetros del agua residual alimentada a la criba y malla en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	371
Tabla 153. Caracterización del agua residual alimentada a la criba y malla en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	372
Tabla 154. Pérdida de energía en criba limpia y sucia diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	372
Tabla 155. Pérdida de energía en malla limpia y sucia diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	372
Tabla 156. Balance de masa para el agua residual en el cribado para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	373
Tabla 157. Caracterización del agua residual alimentada al canal Parshall en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	373
Tabla 158. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 1 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	375
Tabla 159. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 2 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	376
Tabla 160. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 3 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	377
Tabla 161. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 4 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	378
Tabla 162. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 5 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	379
Tabla 163. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 6 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	380
Tabla 164. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 7 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	381
Tabla 165. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 8 para el baño industrial de la fosa séptica 1. ....	382
Tabla 166. Volúmenes del tanque de homogeneización dado por el volumen acumulado diario del baño 1 de la fosa séptica 1. ....	383
Tabla 167. Determinación de la velocidad de sedimentación en el sedimentador primario diseñado para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	383
Tabla 168. Porcentajes de remoción para los parámetros del agua residual saliente del sedimentador primario. ....	383
Tabla 169. Caracterización del agua residual alimentada a la laguna anaerobia cubierta en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia. ....	384
Tabla 170. Balance de masa para el agua residual en las etapas diseñadas para el sedimentador primario de la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia del ingenio azucarero. ....	384

Tabla 171. Características de entrada al tratamiento secundario.....	388
Tabla 172. Temperatura promedio mensual en la estación de Concepción, Escuintla. ...	388
Tabla 173. Elevación del ingenio azucarero. ....	388
Tabla 174. Determinación del volumen total del lecho experimental. ....	389
Tabla 175. Caracterización del lecho empacado al azar. ....	389
Tabla 176. Iteraciones realizadas para determinar el tiempo de retención hidráulica de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	405
Tabla 177. Datos intermedios en el dimensionamiento de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	405
Tabla 178. Comprobación de la carga orgánica e hidráulica de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	405
Tabla 179. Eficiencias de remoción del sistema de filtros anaerobios de flujo ascendente. ....	406
Tabla 180. Caudal y concentración del afluente de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	406
Tabla 181. Producción de lodos en los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	406
Tabla 182. Volumen total del lecho empacado. ....	406
Tabla 183. Volumen de espacios vacíos en el lecho empacado experimental. ....	406
Tabla 184. Características del lecho empacado.....	407
Tabla 185. Iteraciones para determinar la carga orgánica volumétrica de la laguna anaerobia de estabilización. ....	407
Tabla 186. Datos intermedios en el dimensionamiento de la laguna anaerobia de estabilización.....	408
Tabla 187. Eficiencias de remoción de la laguna anaerobia de estabilización.....	408
Tabla 188. Caudal y concentración del afluente de la laguna anaerobia de estabilización. ....	408
Tabla 189. Producción de lodos en la laguna anaerobia de estabilización. ....	408
Tabla 190. Producción de biogás en los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.....	409
Tabla 191. Producción de biogás en la laguna anaerobia de estabilización.....	409
Tabla 192. Datos intermedios en el diseño del sistema de transporte hacia los FAFA. .	409
Tabla 193. Accesorios necesarios para el transporte hacia los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	410
Tabla 194. Especificaciones del sistema de transporte hacia los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.....	410
Tabla 195. Datos intermedios en el diseño del sistema de transporte hacia la laguna anaerobia de estabilización. ....	410
Tabla 196. Accesorios necesarios para el transporte hacia la laguna anaerobia de estabilización.....	410
Tabla 197. Especificaciones del sistema de transporte hacia la laguna anaerobia de estabilización.....	410
Tabla 198 Características de la bomba seleccionada para alimentación del tratamiento terciario.....	432
Tabla 199 Concentración de nitrógeno medida en el tiempo, durante las 95h de experimentación .....	441
Tabla 200 Concentración de nitrógeno durante 166h de experimentación.....	441

Tabla 201 Parámetros de salida de DBO, DQO, SST y caudales de tratamiento primario y secundario .....	441
Tabla 202 Composición típica de aguas residuales de tipo doméstico según el caudal y concentración del agua .....	442
Tabla 203 Resumen de resultados de diseño para sistema colocado después de filtro anaeróbico de flujo ascendente .....	443
Tabla 204 Resumen de resultados de diseño para sistema colocado después de laguna de estabilización anaeróbica .....	443
Tabla 205 Composición de la mezcla de nitrógeno de salida según cálculos teóricos ...	444
Tabla 206 Determinación de los porcentajes de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en los sólidos suspendidos totales (SST).....	449
Tabla 207 Determinación de la relación de sDBO en DBO .....	449
Tabla 208 Determinación de la relación de sDQO en DQO .....	450
Tabla 209 Características principales del agua residual proveniente de una laguna de estabilización anaeróbica .....	450
Tabla 210 Características principales del agua residual proveniente de un filtro anaeróbico de flujo ascendente .....	451
Tabla 211. Número más probable de Coliformes fecales por cada 100 mL en las tres fosas sépticas analizadas y su contribución al caudal total.....	453
Tabla 212. Parámetros de los afluentes al tanque de contacto para el proceso de desinfección, que provienen del clarificador .....	453
Tabla 213. Dosis inicial de cloro y tiempo para el proceso de desinfección a partir del valor Ct determinado .....	453
Tabla 214. Variación del caudal de la bomba dosificadora en base al cloro libre residual presente en los efluentes de la PTAR .....	454
Tabla 215. Dosificación de NaOCl en función del valor de coliformes fecales que se desea alcanzar. ....	454
Tabla 216. Accesorios colocados en la trayectoria del fluido y sus coeficientes de pérdidas por fricción.....	462
Tabla 217. Comparación pareada entre los factores que se tomaron en cuenta para la construcción de la matriz .....	463
Tabla 218. Matriz cualitativa para la selección del desinfectante. ....	464
Tabla 219. Recuento de coliformes luego de un proceso de desinfección con hipoclorito de sodio en una muestra de agua residual proveniente de una fosa séptica del ingenio azucarero.....	465
Tabla 220. Recuento de coliformes luego de un proceso de desinfección con hipoclorito de calcio en una muestra de agua residual proveniente de una fosa séptica del ingenio azucarero.....	466
Tabla 221. Flujo real y composición teórica de biogás, utilizada para el dimensionamiento de equipos y sistemas auxiliares en su manejo. ....	476
Tabla 222. Propiedades teóricas de los gases presentes en el biogás. ....	476
Tabla 223. Especificaciones de los lodos, utilizadas para propuesta de su tratamiento y manejo. ....	478
Tabla 224. Parámetros referentes a la composición del biogás y sus flujos. ....	486
Tabla 225. Especificaciones de la conducción de biogás. ....	487

Tabla 226. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de biogás hacia la cocina industrial. ....	487
Tabla 227. Datos referentes al flujo de lodos y los sólidos secos totales que contiene, según cada tratamiento generador. ....	488
Tabla 228. Cantidades de arena y grava para las camas en los patios de secado de lodos. ....	488
Tabla 229. Especificaciones de la conducción de lodos del tratamiento primario hacia patio de secado mayor. ....	489
Tabla 230. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de lodos del tratamiento primario hacia patio de secado mayor. ....	489
Tabla 231. Especificaciones de la conducción de lodos del tratamiento secundario hacia patio de secado. ....	490
Tabla 232. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de lodos del tratamiento secundario hacia patio de secado menor. ....	490
Tabla 233. Especificaciones de la conducción de lodos del tratamiento terciario hacia patio de secado. ....	491
Tabla 234. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de lodos del tratamiento terciario hacia patio de secado mayor. ....	491
Tabla 235. Especificaciones de la extracción de lixiviados del patio de secado mayor. ....	492
Tabla 236. Datos referentes a la pérdida de presión en la extracción de lixiviados del patio mayor. ....	492
Tabla 237. Especificaciones de la extracción de lixiviados del patio de secado menor. ....	492
Tabla 238. Datos referentes a la pérdida de presión en la extracción de lixiviados del patio menor. ....	493
Tabla 239. Cotización accesorios. ....	493
Tabla 240. Cotización reductores PVC. ....	494
Tabla 241. Cotización tubería. ....	494
Tabla 242. Cotización accesorios varios PTAR. ....	495
Tabla 243. Cotización válvulas. ....	496
Tabla 244. Cotización bombas centrífugas. ....	496
Tabla 245. Cotización bombas desplazamiento positivo. ....	497
Tabla 246. Cotización equipos varios. ....	497
Tabla 247. Escenario FNE No. 1, Pesimista. ....	513
Tabla 248. Escenario FNE No. 2, Más probable. ....	514
Tabla 249. Escenario FNE No. 2, Más probable. ....	515
Tabla 250. Escenario FNE No. 3, Optimista. ....	516



## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Dimensiones para el diseño del Canal Parshall. ....	16
Figura 2. Rutas metabólicas de la digestión anaeróbica. ....	22
Figura 3. Representación esquemática de un filtro anaerobio de flujo ascendente. ....	27
Figura 4. Cálculo de las dimensiones en las partes superior e inferior de la laguna, a partir de las dimensiones basadas en la profundidad media. ....	34
Figura 5. Reacción de nitrificación global. ....	36
Figura 6. Reacción de desnitrificación. ....	39
Figura 7 Diagrama del proceso Ludzack-Ettinger Modificado (MLE) ....	40
Figura 8. Tasa específica de desnitrificación basada en la concentración de biomasa a 20 °C versus la relación de sustrato microorganismo para varios porcentajes de rbdQO en relación a la bDQO en el agua de entrada. ....	45
Figura 9. Porcentaje de HOCl y OCl <sup>-</sup> para distintos valores de pH. ....	61
Figura 10. Formas importantes de cloro durante la cloración del agua. ....	62
Figura 11. Curva generalizada para el punto de quiebre en un proceso de cloración. ....	62
Figura 12. Modelo de Selleck Collins en donde se observa el lag debido a la reacción del cloro libre con otros compuestos presentes en el agua residual. ....	64
Figura 13. Correlación entre el factor $t_{10}/\tau$ y $\beta_L$ . ....	66
Figura 14. Funcionamiento de una bomba peristáltica. ....	70
Figura 15. Mezclador estático tipo SMV. ....	72
Figura 16. Elementos para un mezclador estático tipo SMX. ....	72
Figura 17. Patrón de flujo en un mezclador estático tipo SMV con cinco capas y rotación de 90° entre cada elemento. ....	72
Figura 18. Esquema para seleccionar el tipo de mezclador estático a partir del régimen de flujo, viscosidad, miscibilidad y aplicación. ....	73
Figura 19. Composición típica del biogás en reactores anaerobios y digestores de lodo. ....	76
Figura 20. Instalación en serie de gasómetro de biogás. ....	76
Figura 21. Influencia de la operación de equipos de uso de biogás, en el volumen del gasómetro. ....	77
Figura 22. Almacenamiento de biogás no presurizado, tipo globo de lona. ....	77
Figura 23. Gasómetro de doble membrana. ....	78
Figura 24. Tipos de quemadores. A. Cerrado. B. Semicerrado. C. Abierto. ....	79
Figura 25. Requerimiento de tratamiento del biogás según su uso. ....	80
Figura 26. Métodos de tratamiento de biogás. ....	81
Figura 27. Usos posibles del biogás. ....	82
Figura 28. Mecanismo de funcionamiento de turbina de gas. ....	83
Figura 29. Composición química teórica de los distintos tipos de lodos. ....	84
Figura 30. Contenido típico de metales en los sólidos presentes en el agua residual. ....	84
Figura 31. Características físicas típicas de los lodos producidos en distintos procesos del tratamiento de aguas residuales. ....	85

Figura 32. Diagrama de una bomba de émbolo.....	86
Figura 33. Diagrama de una bomba de cavidad progresiva. ....	86
Figura 34. Diagrama de una bomba centrífuga. ....	87
Figura 35. Diagrama de una bomba de diafragma.....	87
Figura 36. Relación del coeficiente de tensión y el coeficiente de rigidez, con la composición de sólidos en los lodos.....	88
Figura 37. Relación del Número de Reynolds y el Número de Hedstrom, con el factor de fricción. ....	89
Figura 38. Instalación típica para deshidratación de lodos usando centrífugas. ....	90
Figura 39. Diagrama de proceso de deshidratación de lodos con filtro prensa. (Andreoli, et al, 2007).....	90
Figura 40. Seccionamiento de un sistema de deshidratación de lodos en cama de secado convencional. ....	92
Figura 41. Vista planta de un sistema de deshidratación de lodos en cama de secado convencional. ....	92
Figura 42. Parámetros y límites máximos permisibles para lodos. ....	93
Figura 43. Resultados del análisis ambiental y microbiológico para la fosa séptica del área de baños de bodega muestreada el 19 de octubre de 2017. ....	104
Figura 44. Resultados del análisis ambiental y microbiológico para la fosa séptica del área de baños de vestidores muestreada el 19 de octubre de 2017. ....	105
Figura 45. Resultados del análisis ambiental y microbiológico para la fosa séptica del área de baños de tornos muestreada el 19 de octubre de 2017.....	106
Figura 46. Dimensiones en un tanque de contacto para el proceso de desinfección. ....	109
Figura 47. Simulación del flujo en un tanque de contacto para $L_{bo} / W_{ch} = 1$ y $L_{bo} / W_{ch} >$ $1$ .....	109
Figura 48. Diagrama de flujo de procedimiento de cotización. ....	143
Figura 49. Diagrama de distribución de etapas del tratamiento preliminar y primario para la PTAR. ....	149
Figura 50. Balance de masa del sistema preliminar y primario propuesto usando el caudal teórico futuro.....	150
Figura 51. Diagrama de la trampa de aceites y grasas propuesta (en metros).....	151
Figura 52. Diagrama del canal de cribado propuesto (en metros). ....	152
Figura 53. Diagrama del canal Parshall propuesto (en metros).....	153
Figura 54. Diagrama del tanque de homogeneización propuesto (en metros). ....	154
Figura 55. Diagrama del sedimentador primario propuesto (en metros). ....	155
Figura 56. Diagrama de bloques del tratamiento secundario con Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.....	161
Figura 57. Diagrama de flujo del tratamiento secundario con Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. ....	162
Figura 58. Diagrama de equipo de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA). .....	163
Figura 59. Diagrama de bloques del tratamiento secundario con una laguna anaerobia de estabilización.....	166
Figura 60. Diagrama de flujo del tratamiento secundario con una laguna anaerobia de estabilización.....	167

Figura 61. Diagrama de equipo de la laguna anaerobia de estabilización (página 1 de 2).	168
Figura 62. Diagrama de equipo de la laguna anaerobia de estabilización (página 2 de 2).	169
Figura 63 Diagrama de flujo del sistema de lodos activados después del filtro anaeróbico de flujo ascendente, con entradas y salidas en flujo másico y en caudales para representación del balance de masa.	173
Figura 64 diagrama de flujo del sistema de lodos activados después de laguna de estabilización, con entradas y salidas en flujo másico y caudales para representación del balance de masa.	174
Figura 65 Esquema de sistema de remoción de nitrógeno para colocarlo después de Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente	175
Figura 66 Esquema de sistema de remoción de nitrógeno para colocarlo después de Laguna de estabilización anaeróbica	176
Figura 67 Esquema de clarificador secundario para completar el tratamiento de lodos activados.	177
Figura 68. Diagrama del proceso propuesto para el manejo de biogás.	187
Figura 69. Diagrama de los sistemas en el proceso propuesto para el manejo de biogás.	188
Figura 70. Diagrama del proceso propuesto para el manejo de lodos de los tratamientos primario y terciario.	189
Figura 71. Diagrama del proceso propuesto para el manejo de lodos del tratamiento secundario.	190
Figura 72. Diagrama en vista planta de los patios propuestos para el secado de lodos.	191
Figura 73. Diagrama de una celda del patio de secado de lodos de los tratamientos primario y terciario.	192
Figura 74. Diagrama de operaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales	195
Figura 75. Diagrama de flujo - Tratamiento primario	197
Figura 76. Trampa de grasas	198
Figura 77. Cribas	200
Figura 78. Canal Parshall	202
Figura 79. Tanque homogeneizador de caudal.	204
Figura 80. Tanque sedimentador	205
Figura 81. Diagrama de flujo – Tratamiento secundario, primera propuesta.	207
Figura 82. Filtro anaerobio de flujo ascendente	208
Figura 83. Diagrama de flujo – Tratamiento secundario, segunda propuesta	210
Figura 84. laguna anaerobia	210
Figura 85. Diagrama de flujo - Tratamiento terciario.	212
Figura 86. Tanque de reducción de nutrientes	213
Figura 87. Tanque clarificador	215
Figura 88. Diagrama de flujo – Tratamiento cuaternario	217
Figura 89. Tanque de contacto	218
Figura 90. Diagrama de flujo - Desulfuración y deshidratación de biogás.	220
Figura 91. Gasómetro	221
Figura 92. Diagrama de flujo – Deshidratación de lodos	223

Figura 93. Patio de secado .....	224
Figura 94. Señalización - Riesgo de tropezar.....	241
Figura 95. Señalización - Prohibido el paso .....	244
Figura 96. Señalización - Uso obligatorio de arenés de seguridad.....	245
Figura 97. Señalización - Peligro ahogamiento .....	245
Figura 98. Señalización - Materiales oxidantes .....	252
Figura 99. Señalización - Lavaojos .....	252
Figura 100. Señalización - Regadera de emergencia.....	252
Figura 101. Señalización - Uso obligatorio de mascarilla .....	252
Figura 102. Señalización - Uso obligatorio de guantes .....	252
Figura 103. Señalización - Prohibición de producción de fuego.....	257
Figura 104. Señalización - Riesgo de explosión .....	257
Figura 105. Señalización - Materiales inflamables .....	257
Figura 106. Señalización - Sustancias nocivas.....	257
Figura 107. Señalización - Ruta de evacuación .....	264
Figura 108. Señalización - Punto de encuentro.....	264
Figura 109. Componente inversión tratamiento preliminar y primario .....	272
Figura 110. Componente inversión tratamiento secundario .....	273
Figura 111. Componente inversión tratamiento terciario .....	274
Figura 112. Componente inversión tratamiento cuaternario.....	275
Figura 113. Componente inversión tratamiento de lodos y biogás .....	276
Figura 114. Participación económica de los tratamientos que incluye la PTAR .....	276
Figura 115. Participación económica por división de requerimientos.....	277
Figura 116. Caudal horario del baño industrial de l fosa séptica 1 del ingenio azucarero. .....	374
Figura 117. Delimitación del área en el ingenio para el estudio de nivel. ....	385
Figura 118. Curvas de nivel del área de estudio.....	386
Figura 119. Pendiente porcentual del área de estudio hacia el punto de interés. ....	387
Figura 120 Parámetros de diseño típicos para la zona aireada del proceso de lodos activados .....	416
Figura 121 Solubilidad de oxígeno disuelto en agua en función de la salinidad, presión barométrica y temperatura .....	423
Figura 122 Propiedades físicas del agua a distintas temperaturas.....	423
Figura 123 Obtención teórica de la elevación del terreno propuesto para montaje de la planta de tratamiento de aguas residuales .....	424
Figura 124 Gráfica de pérdidas por fricción de difusores de aire de cerámica .....	424
Figura 125 Parámetros teóricos con los que debe de cumplir un diseño de MLE .....	424
Figura 126 Parámetros de diseño teóricos para dimensionamiento adecuado de un clarificador secundario luego del proceso de lodos activados .....	426
Figura 127 Identificación de corrientes del clarificador en el sistema de lodos activados .....	426
Figura 128 Especificaciones de tubería de PVC cédula 40 utilizados para el diseño.....	428
Figura 129 Factores de pérdidas por fricción de accesorios en tubería .....	428
Figura 130 Gráfica del factor de fricción para tuberías circulares .....	429

Figura 131 Diagrama de Moody para distintos materiales y obtención del factor de fricción de tubería en base al diámetro nominal (in) .....	430
Figura 132 Gráfica de familias de bombas para 1750rpm y 1450 rpm .....	433
Figura 133 Curvas características de una bomba centrífuga para caudal de entrada al tratamiento terciario .....	433
Figura 134 Ficha técnica de bacterias y enzimas Biozyme FS/AC .....	435
Figura 135 Esterilización de frascos colectores de muestra en autoclave .....	436
Figura 136 Muestras recolectadas de fosa de compras (oficinas administrativas) .....	436
Figura 137 Sistema con agitación de primera prueba realizada donde se observa el aumento de temperatura ocurrido en el último día de análisis .....	437
Figura 138 Resultados de prueba de pH realizada .....	437
Figura 139 Espuma formada y crecimiento de algas en el agua residual tratada durante la segunda prueba.....	438
Figura 140 Cantidad de enzimas agregada y apariencia física del producto utilizado ..	438
Figura 141 Colorímetro utilizado y una muestra analizada del kit de nitrógeno total comparada contra el blanco .....	439
Figura 142 Agua al finalizar el tratamiento, con los sólidos sedimentados .....	439
Figura 143 Curva de remoción de nitrógeno utilizando Biozyme FS/AC primera prueba de 95h. ....	440
Figura 144 Curva de remoción de nitrógeno utilizando Biozyme FS/AC durante 166h	440
Figura 145 Proceso de medición de nitrógeno total utilizando HACH .....	445
Figura 146 Trazado de la ruta a medirle perfil de elevación.....	448
Figura 147 Ejemplificación de obtención del perfil de elevación del terreno.....	449
Figura 148 Composición de agua para determinación de cantidad de sDBO, sDQO. ..	452
Figura 149. Representación de los puntos A y B utilizados para el planteamiento del balance de energía mecánico.....	461
Figura 150. Recuento de coliformes fecales en una muestra de agua residual proveniente de una fosa séptica del ingenio azucarero a una dilución 1:100 (5500 UFC/mL).....	465
Figura 151. Diagrama de familia de bombas utilizado para seleccionar la bomba centrífuga .....	472
Figura 152. Curva característica de la bomba centrífuga seleccionada .....	472
Figura 153. Especificaciones de microturbina encontrada para analizar posibilidad de generar energía eléctrica a partir del biogás producido en el tratamiento secundario de aguas residuales.....	477
Figura 154. Propiedades fisicoquímicas del GLP. ....	477
Figura 156. Cotización válvulas de compuerta y cheque .....	498
Figura 157. Cotización Ingenio Santa Ana, BOMBA 1HP .....	499
Figura 158. Cotización soplador, Olmstead.....	500
Figura 159. Cotización kit de cloro .....	501
Figura 160. Cotización bombas centrífugas.....	502
Figura 161. Cotización EWS bomba dosificadora de sólidos .....	503
Figura 162. Cotización Concreto Cemex, Ingenio Santa Ana .....	504
Figura 163. Cotización gas propano, Ingenio Santa Ana.....	504
Figura 164. Cotización hipoclorito de sodio, Merck .....	505
Figura 165. Cotización bioenzimas .....	506

Figura 166. Cotización difusores de aire .....	507
Figura 167. Agitador, Mix Direct.....	507
Figura 168. Cotización geomembranas .....	508
Figura 169. Bomba desplazamiento positivo NETZSCH.....	509
Figura 170. Bomba centrífuga 15hp .....	509

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación es una propuesta para el diseño de una planta de tratamiento anaeróbica de aguas residuales, así como el análisis económico de su implementación y un manual de operación y mantenimiento de esta en un ingenio azucarero. Todo con el fin de cumplir con los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236- 2006 “Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”. Se calculó el caudal promedio de aguas residuales generadas por las 27 baterías de baños en tiempo de zafra, tomando en cuenta el crecimiento del personal (1%) durante 15 años, obteniendo un caudal de 0.01942 m<sup>3</sup>/s.

Se diseñaron los tratamientos preliminares, primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios. Entre los principales hallazgos se encuentra que la mejor opción para el tratamiento secundario son los FAFA<sup>1</sup>, por tener una reducción del 79.2% de materia orgánica, una producción de biogás de 256 m<sup>3</sup>/d más que la laguna anaeróbica y requerir de 482 m<sup>2</sup> menos para su construcción. Se determinó que, entre los tratamientos comparados, el de lodos activados con arreglo MLE<sup>2</sup> es en promedio un 5.5% más eficiente para la remoción de nitrógeno del agua. Con el fin de disminuir las coliformes fecales presentes en el sistema (hasta 9000NMP/100mL) se seleccionó hipoclorito de sodio (NaOCl), por su facilidad de aplicación. Se recomienda realizar un análisis microbiológico y fisicoquímico de las baterías con mayor aporte al caudal alimentado a la PTAR con el fin de corroborar si el diseño de las etapas propuestas remueve los compuestos de interés en las magnitudes requeridas del efluente, así como un análisis de caudal de 24 horas.

Se realizó un análisis de escenario para la recuperación de la inversión a realizar, así como un análisis de prefactibilidad por medio de un FODA, PESTEL y 5 fuerzas de Porter. Finalmente se redactó un manual de operación y mantenimiento para presentar los tratamientos de la planta de manera gráfica y sencilla, a su vez se agregó una matriz de riesgo para definir las medidas de seguridad y el equipo de protección personal necesario, en base a las operaciones necesarias para un correcto funcionamiento de la planta.

---

<sup>1</sup> Filtro anaeróbico de flujo ascendente

<sup>2</sup> Método Ludzack – Ettinger Modificado, ver marco teórico sección de lodos activados.



# I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural responsable de dar vida a los organismos al ser un agente que permite el funcionamiento de los procesos biológicos. Sin embargo, este está limitado por múltiples fuentes de contaminación de índole doméstica, comercial e industrial, lo cual altera sus propiedades tales como su temperatura, pH, demanda biológica de oxígeno, entre otros. Las actividades del ser humano generan un efluente de menor calidad debido a la presencia de agentes de limpieza, materiales inorgánicos (no degradables) y orgánicos en altas concentraciones. Para evitar el riesgo de problemas epidemiológicos y ambientales, gobiernos de distintos países han establecido límites en la descarga de efluentes de aguas residuales hacia cuerpos receptores. Las consecuencias de la descarga de este tipo de aguas afectan el abastecimiento de agua potable, la cosecha de alimentos y la calidad de vida de una comunidad aledaña a cuerpos hídricos, que según el Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 “Reglamento de Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” incluye a los ríos, lagos, lagunas, manto freático y océanos.

Para evitar tales efectos en el desarrollo poblacional y la biodiversidad, las industrias se ven obligadas a construir plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que disminuyan la carga contaminante de ciertos compuestos químicos y microbiológicos. Con el fin de devolverla al cuerpo hídrico, el agua residual pasa por etapas que disminuyen factores tales como el color, olor, patógenos, sólidos grandes, inorgánicos y orgánicos, la turbidez, concentración de microorganismos, de metales y químicos tóxicos y las partículas flotantes. Se adecuan procesos físicos, químicos y biológicos que reestablezcan la calidad de agua en una PTAR que incluye las siguientes etapas: tratamiento preliminar, primario, secundario, terciario y cuaternario.

El presente trabajo surgió como una respuesta a la oportunidad de mejora presentada en un ingenio azucarero para el tratamiento de las aguas residuales tipo ordinario. Ellos no cuentan con un diseño de una PTAR para tratar las aguas residuales de las fosas sépticas identificadas hasta la fecha. Actualmente, las aguas residuales descargadas al manto freático contienen sólidos flotantes, alta concentración de nitrógeno y E. coli en cantidades superiores a los límites del acuerdo gubernativo 236 – 2006. En este trabajo se integran siete módulos que plantean los objetivos generales y específicos para delimitar el alcance del mismo; se realizó una investigación en la cual se desglosa la teoría detrás de cada etapa del tratamiento de aguas; se desarrolló una metodología para cumplir con cada objetivo propuesto; se tomaron datos experimentales para obtener parámetros iniciales en el diseño de los equipos pertinentes; se calculó el caudal teórico y los equipos con una capacidad que considera el aumento del caudal en un período de 15 años; se presentan los resultados para cada objetivo usando tablas, diagramas de bloques, diagramas de flujo y diagramas de equipo; se interpretaron los resultados obtenidos así como los supuestos de cada cálculo en la discusión; se

concluyó con respecto a los resultados presentados; y se presentaron las recomendaciones para los interesados en llevar a cabo un proyecto de esta índole.

En el módulo 1, se calculó el caudal teórico generado por las 27 baterías de baños en el ingenio azucarero hoy en día, así como el proyectado en 15 años según el crecimiento de personal. Se usó el método de Hunter y por Dotación por lo que fue necesario medir la cantidad de visitas a los servicios sanitarios y cuantificar los accesorios y servicios dentro del ingenio. También se propuso el diseño del tratamiento preliminar y primario en el cual se diseñó una trampa de grasas y aceites, un canal de cribado, un canal Parshall, un par de tanques de homogeneización de caudal y un par de sedimentadores primarios, con operación alternada por seguridad. Los diseños se realizaron según las características del agua residual de tipo ordinario con el fin de remover un alto porcentaje de grasas, la totalidad de sólidos flotantes y una porción de partículas sedimentables. Los equipos y materiales propuestos tomaron en consideración la facilidad y la seguridad del personal en la operación y el mantenimiento, así como la economía para su construcción.

En el módulo 2, se diseñó el tratamiento secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario en un ingenio azucarero que garanticen el cumplimiento del artículo 19 del Acuerdo Gubernativo 236-2006. Dichas aguas provienen de las fosas sépticas de los baños de las áreas de planta y administrativa. El tratamiento biológico propuesto es de tipo anaeróbico, debido a diferentes ventajas ofrecidas por el mismo y al especial interés del ingenio en la producción de biogás. Con el fin de generar una propuesta de valor, se compararon los resultados del diseño de dos alternativas para el sistema: filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) y una laguna de estabilización anaerobia con una cubierta para la recuperación del biogás. El diseño de los sistemas de tratamiento incluye la determinación de sus dimensiones, el cálculo de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de la demanda química de oxígeno (DQO) de los afluentes y la estimación de la producción de biogás y lodos. En el caso de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente, también se incluye en el diseño la propuesta del material de empaque a utilizar en el lecho filtrante. Como resultado de los diseños, se encontró que el tratamiento por medio de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) presentan un menor requerimiento de espacio, una mayor remoción de DBO y DQO y una mayor producción de biogás. La laguna anaerobia, por su parte, presenta una menor producción de lodos y se requiere de una mayor frecuencia de descarga de estos. A partir de estos resultados, se concluyó que el mejor sistema de tratamiento secundario anaerobio para las aguas residuales son los filtros anaerobios de flujo ascendente.

En el módulo 3, el propósito principal fue disminuir la concentración de nitrógeno que se encuentra actualmente en el agua residual de un ingenio azucarero. El cual se basa en el diseño de un sistema de lodos activados, dejando plasmadas las memorias de cálculo de todos los equipos y los diagramas correspondientes. Con el fin de proponer la mejor opción para la remoción de nitrógeno se comparó la reducción porcentual de la concentración de nitrógeno por medio de un

producto comercial y el diseño de un equipo de lodos activados. Se desarrollaron dos diseños de lodos activados, uno para ser colocado después de un filtro anaeróbico de flujo ascendente y otro para ser colocado después de una laguna de estabilización anaeróbica. Durante este cálculo se observó que los parámetros de entrada al sistema, principalmente de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y de demanda química de oxígeno (DQO), influyen en la capacidad de desnitrificación teórica del sistema. Entre los hallazgos de las pruebas y diseños realizados se tuvo que el mejor tratamiento para la disminución de nitrógeno es el sistema de lodos activados. Sin embargo, por las bajas concentraciones teóricas de entrada al sistema, el máximo porcentaje de desnitrificación para los sistemas diseñados no cumple con el límite permitido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, que establece que el límite de descarga es de 20g/m<sup>3</sup>.

El módulo 4 se enfoca en la reducción de coliformes fecales en aguas residuales de tipo ordinario provenientes de un ingenio azucarero, por medio de una operación de desinfección como último tratamiento de una PTAR. Se seleccionó el método desinfectante con mayor número de ventajas técnicas y operacionales para lograr alcanzar el parámetro de coliformes requerido por el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236 - 2006 y se diseñó el sistema con todos los equipos necesarios para su operación.

El módulo 5 considera los dos productos esenciales, el biogás y los lodos, provenientes del proceso de biodigestión, que consiste en la descomposición de materia orgánica por parte de microorganismos en un reactor que contempla un medio anaerobio. Se ha aumentado la frecuencia en el uso de este tipo de tratamiento puesto que el biogás generado puede utilizarse como alternativa en pro de la cogeneración, mediante turbogeneradores especializados para aportar a la producción de energía eléctrica, y aprovechar también el poder calorífico del metano (componente principal) en operaciones térmicas.

En el módulo 6, como parte del plan de aseguramiento de la calidad para el cumplimiento de estándares gubernamentales, se realizó un manual de operaciones y mantenimiento para la PTAR propuesta, el cual muestra los procesos necesarios para su operación y buen funcionamiento. De igual forma, contempla el mantenimiento necesario para el equipo y las normas de seguridad que requiere para el manejo de químicos y maquinaria. El manual de operaciones está formado por herramientas de registro y análisis “Diagrama de operaciones y diagrama de flujo operativo” con el fin de describir las operaciones de la planta de tratamiento de agua residual de forma gráfica para una mejor comprensión. Por otra parte, para el manual de mantenimiento, se utilizó la herramienta de evaluación de riesgos para detectar las operaciones con mayor impacto y las prácticas seguras a seguir. Se indicó el tipo de mantenimiento por equipo, las medidas preventivas y el equipo de protección necesario en base al reglamento interno de seguridad industrial del ingenio azucarero y al Acuerdo Gubernativo 229 – 2014, Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional.

En el módulo 7, se realizó un análisis económico de la implementación de una PTAR anaeróbica proyectada en 15 años en un ingenio azucarero. Se determinó la prefactibilidad por medio de los métodos de valor presente neto y tasa interna de retorno para la planta considerando la producción de biogás y abono como elemento secundario. Se evaluaron tres escenarios como parte del análisis de sensibilidad, los cuales se diferencian en el tipo de beneficio económico y social que este traerá al ingenio azucarero. En el caso del escenario optimista, se espera poder conseguir dos productos secundarios, compost y biogás, y así empezar a recuperar la inversión inicial, además de cumplir con el acuerdo gubernativo 236-2006. El escenario más probable, se espera poder conseguir alguno de los dos productos secundarios mencionados anteriormente y desde luego cumplir con el acuerdo gubernativo 236-2009. Como último escenario sería el pesimista, teniendo como único ahorro, la sanción por el incumplimiento del acuerdo gubernativo 236-2006.

## II. OBJETIVOS

### A. General del Megaproyecto

Diseñar una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario realizando un análisis económico y un manual de operación y mantenimiento para el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” en un ingenio azucarero.

### B. Específicos del Megaproyecto

1. Proponer el tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales tipo ordinario a partir del caudal provenientes de 27 baterías de baños, para remover aceites y grasas, sólidos flotantes, demanda biológica y química de oxígeno y sólidos suspendidos.
  - a. Determinar el caudal promedio de aguas residuales durante la zafra para el diseño de la planta de tratamiento anaeróbico de aguas tipo ordinario tomando en cuenta el crecimiento de personal en un ingenio azucarero en 15 años, a partir del método de dotación y Hunter.
  - b. Dimensionar el sistema de tratamiento preliminar y primario de aguas residuales de tipo ordinario usando un balance de masa para la remoción de sólidos flotantes según las características actuales del efluente.
  - c. Determinar el área adecuada para ubicación de la planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales mediante la realización de un mapa de curvas de nivel del ingenio azucarero con el fin de facilitar la recolección del efluente.
  - d. Realizar diagramas de la distribución y la propuesta del sistema preliminar y primario utilizando AutoCAD para presentar gráficamente los equipos necesarios.
2. Dimensionar dos sistemas de tratamiento secundario de una planta tratamiento anaeróbico, a partir de los caudales de efluentes de aguas negras provenientes de baños de áreas de planta y administrativa en un ingenio azucarero, para reducir la concentración de materia orgánica y comparar los resultados de ambas propuestas.
  - a. Dimensionar un filtro anaerobio de flujo ascendente para la reducción de la concentración de materia orgánica en efluentes de aguas negras provenientes de baños de áreas de planta y administrativas, según los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de salida del tratamiento primario.

- b. Dimensionar una laguna anaerobia de estabilización para la reducción de la concentración de materia orgánica en efluentes de aguas negras provenientes de baños de área de planta y administrativas, según los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de salida del tratamiento primario.
    - c. Realizar los diagramas de equipo, de bloques y de flujo, a partir de los parámetros obtenidos en la memoria de cálculo y el balance de masa, para presentar la representación final de ambas propuestas.
- 3. Proponer el sistema de tratamiento terciario de la planta de tratamiento de aguas residuales para reducir la concentración de nitrógeno según los parámetros de salida establecidos en el artículo 20 del capítulo V en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.
  - a. Realizar el balance de masa del sistema para conocer la cantidad de agua y de lodos producidos para el dimensionamiento de los procesos de remoción de nitrógeno a partir del efluente del tratamiento secundario.
  - b. Realizar la memoria de cálculo de los equipos de nitrificación y desnitrificación a partir de la concentración de nitrógeno actual del agua de un ingenio azucarero para plasmar la forma en que se dimensionan los sistemas.
  - c. Realizar los esquemas de los equipos del sistema de tratamiento terciario de aguas residuales, según los parámetros de diseño obtenidos en la memoria de cálculo, para dimensionar el sistema.
  - d. Comparar la reducción de nitrógeno en aguas residuales con la aplicación de enzimas del producto comercial y el tratamiento terciario natural de remoción teórica de nitrógeno, para determinar la opción con mayor reducción.
- 4. Proponer el tratamiento cuaternario de una planta anaeróbica a partir del caudal de los efluentes de aguas residuales de tipo ordinario de un ingenio azucarero para reducir la concentración de coliformes fecales.
  - a. Seleccionar el método de desinfección que posea el mayor número de ventajas técnicas y operacionales, construyendo una matriz cualitativa que compare las alternativas, para reducir la concentración de coliformes fecales.
  - b. Desarrollar la memoria de cálculo para el diseño del sistema de desinfección a partir de la concentración actual de coliformes fecales.
  - c. Dimensionar los equipos auxiliares del sistema de tratamiento propuesto para obtener el porcentaje de remoción requerido considerando los parámetros de caudal y dosis de desinfectante.

5. Proponer, usando diagramas de proceso, el manejo de biogás producido por digestión anaerobia, así como la extracción, el transporte y el secado de los lodos; para aprovechar estos subproductos del tratamiento de aguas residuales.
  - a. Calcular la cantidad de energía contenida en el biogás a producir, según su composición y el flujo obtenido por el tratamiento secundario de aguas residuales, para determinar su posible uso en turbinas generadoras de electricidad o como sustituto de GLP en cocina industrial.
  - b. Realizar un balance de masa y energía del proceso propuesto de manejo de biogás, para dimensionar los equipos y sistemas auxiliares requeridos.
  - c. Realizar un balance de masa y energía del proceso propuesto de secado de lodos, para dimensionar los equipos y sistemas auxiliares requeridos.
  
6. Elaborar un manual de operaciones y mantenimiento preventivo para una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en un ingenio azucarero, usando una representación gráfica del proceso y un análisis de los riesgos, para que exista una sencilla comprensión de las operaciones, cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 229 – 2014 “Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional” y el Código de trabajo de Guatemala; y para el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.
  - a. Realizar diagrama de operaciones de la planta de tratamiento de aguas, que muestre las principales operaciones, para conocimiento general de la planta.
  - b. Describir el funcionamiento de cada una de las operaciones unitarias y sus subprocesos a partir de fichas técnicas y diagramas de flujo de procesos, con el fin de crear una herramienta funcional para el operario de la planta de tratamiento de aguas residuales.
  - c. Definir el mantenimiento de la planta de tratamiento de agua, aplicando un análisis de riesgo para precisar las herramientas, el equipo de seguridad y las medidas necesarias el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 229 – 2014 “Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional” y el Código de trabajo de Guatemala; y evitar las sanciones mencionadas por incumplimiento de estas.
  - d. Definir las competencias, habilidades y destrezas que debe poseer el trabajador, a partir del proceso de mantenimiento propuesto, las herramientas a utilizar y a los riesgos expuestos; para realizar el mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, utilizando un formulario de descripción del puesto.

7. Analizar económica y financieramente la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales, para la producción de biogás y compost como elemento secundario, en un ingenio azucarero.
  - a. Estimar la inversión inicial de la implementación de la planta de tratamiento anaeróbico de efluentes de aguas residuales, usando cotizaciones de diferentes proveedores de equipos requeridos en las diferentes fases de dicho tratamiento para el cumplimiento del acuerdo gubernativo 236-2006.
  - b. Estimar costos de funcionamiento y mantenimiento de la planta de tratamiento anaeróbico de efluentes de aguas residuales, analizando cada fase del tratamiento con sus equipos, haciendo énfasis en los gastos de energía, instalación, operación y mantenimiento, para obtener los gastos de operación de la planta.
  - c. Evaluar con análisis económicos, a valor presente neto, tasa interna de retorno y período de recuperación de la planta de tratamiento, determinando el tiempo de recuperación de la inversión inicial, con tres escenarios económicos optimista, más probable y pesimista.
  - d. Establecer un plan de expansión de la planta de tratamiento para los próximos 15 años, generando un pronóstico del crecimiento de la comunidad en el ingenio, analizando así un incremento en tamaños, costos de equipos, instalación, mantenimiento y operaciones, para poder cumplir con la demanda requerida.
  - e. Determinar un análisis estratégico con las herramientas FODA, PESTEL y 5 Fuerzas de Porter de la implementación de una PTAR en un ingenio azucarero, para analizar de forma integral los beneficios y costos que esta planta puede generar.

### III. JUSTIFICACIÓN

La contaminación excesiva a los cuerpos receptores de agua en Guatemala se ha convertido en una situación de interés para todos. En el año 2006, el Gobierno de la República de Guatemala aprobó el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos” que, en su artículo 20, muestra los límites máximos permisibles para los parámetros de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores. En él se definen cuatro fechas máximas de cumplimiento, para que los entes generadores que operaban antes de la fecha en que el acuerdo entró en vigor, puedan tener un avance progresivo en la reducción de los parámetros que no cumplen con los límites establecidos. Las cuatro fechas son el 2 de mayo del 2011, 2015, 2020 y 2024.

Hoy en día, el ingenio azucarero cuenta con un tratamiento de aguas residuales usando enzimas adicionadas al agua que se descargan en fosas sépticas y pozos de absorción. Estas estructuras se han saturado y deteriorado, y las aguas que se reincorporan al manto freático superan los límites permitidos de nitrógeno total y coliformes fecales, indicados por el artículo 20 del AG 236-2006. Esto abre la puerta para el planteamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que esté diseñada a partir del caudal y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas descargadas a las fosas sépticas. Esta contará con los equipos necesarios para eliminar materia flotante y grasas, disminuir la DBO, DQO, concentración de nitrógeno total y los coliformes fecales.

La implementación de una PTAR puede ser aprovechada por parte del ingenio. Se obtendrá biogás y lodos como subproducto, y se pueden obtener beneficios de ambos. El biogás puede ser utilizado como fuente de generación de energía eléctrica o sustituir parcial o totalmente el uso de GLP. Los lodos pueden ser implementados como abono sólido y los lixiviados para fertirriego.

Para evaluar la prefactibilidad del proyecto es necesario hacer un análisis económico, determinando indicadores como el valor presente neto y la tasa interna de retorno. Además, debe realizarse un manual que muestre a gran detalle las operaciones involucradas en la planta de tratamiento de aguas residuales, con el fin de que cualquier operario, ingeniero o persona externa, sea capaz de comprender dicho proceso, y para evitar fallas en equipos, manteniéndolos en el estado que requiere una producción eficiente con gastos mínimos.



## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Estimación del caudal teórico

El caudal es una variable que determina las proporciona la capacidad de la PTAR. Existen distintos métodos para estimar un caudal teórico basado en los accesorios sanitarios y servicios brindados por el establecimiento que genera dichas aguas residuales (p. ej. Método De Dotación y Método De Hunter).

#### 1. Método de dotación

Este es un procedimiento para la estimación promedio, mínima, máxima y máxima extraordinaria del caudal de agua consumida o residual. En este se establecen los caudales diarios por habitante según el servicio o lugar en el que se encuentre, así como el agua potable consumida por cada aparato sanitario. Para ello, se cuantifican las unidades y se le multiplica al aporte indicado. En el caso de los aparatos, se aplica un factor de retorno de 0.85, el cual establece la proporción del agua que continúa como agua residual en el proceso.

Tabla 1. Caudales habituales de agua residual descargada a los sistemas de recolección.

Fuente	Unidad	Intervalo (L/unidad*día)
Hotel	Huésped	110-210
Lavandería	Lavadora	1700-2500
	Empleado	26-61
Estación de servicio	Vehículo	30-57
	Empleado	34-57
	Cliente	4-19
Oficina	Empleado	26-61
Cafetería lujosa	Cliente	15-30
	Empleado	30-45
Hospital	Cama	280-530
	Empleado	19-57

(Crites & Tchobanoglous, 2000)

## 2. Método de Hunter

Este es un método que se basa en la cantidad y el tipo de accesorios sanitarios para determinar el caudal total de agua consumida. Se asignan Unidades Hunter y se multiplica por el número de aparatos para obtener Unidades Hunter totales. Luego se determina a qué caudal del consumo de agua corresponden esas unidades. Para determinar el caudal de aguas residuales, se debe de aplicar un factor de retorno, de 0.85, que establece cuál es el porcentaje que se descarga a los sistemas de recolección.

Tabla 2. Consumo de agua por aparatos domésticos.

Aparato	Unidades Hunter	
	Uso Público	Uso Privado
Urinario de llave	3	1
Urinario de porcelana	10	6
Inodoro con tanque	5	3
Inodoro con fluxómetro	10	6
Lavatorio corriente	1.5	0.75
Ducha	3	1.5
Lavadero de ropa mecánico	-	2.25
Lavadero de ropa manual	-	2.25
Lavaplatos	3	1.5

(López, 2014)

## B. Trampas de aceites y grasas

Las grasas son componentes que poseen mayor tendencia a oxidarse. Están presentes en concentraciones entre los 40 y 80 mg/L en aguas residuales. Tanto aceites como grasas fijan el oxígeno disuelto disponible provocando condiciones de anoxia en el agua. Es importante removerlas antes de que se alimenten a los reactores biológicos para evitar la proliferación de microorganismos filamentosos. Dadas sus propiedades tixotrópicas, reducen la capacidad de extracción del agua en los fangos (IAgua, 2018).

Las trampas de aceites y grasa son estructuras que remueven grasas y aceites provenientes de comedores, hoteles, hospitales, fábricas, etc., que se incorporan en las aguas residuales. La separación se basa en una diferencia de densidades por lo que un tanque de sedimentación-flotación es adecuado. Esta consta de tres cámaras: entrada, separación y salida. El agua residual entra con aceites y grasas. Estos ascienden y flotan en el segundo compartimento para que únicamente el agua sin grasas sale como efluente. La densidad del afluente es proporcional a los períodos de retención y área superficial del separador e inversamente proporcional a la velocidad de ascenso del material flotante (Romero, 2000).

Tabla 3. Áreas de la superficie del separador para un caudal de 1 L/s.

Densidad de grasas y aceites (kg/dm <sup>3</sup> )	Velocidad de ascenso (m/h)	Área (m <sup>2</sup> )
0.75	22.50	0.16
0.80	18.00	0.20
0.85	13.50	0.27
0.90	9.00	0.40

(Castillo, 2012)

### C. Cribado

Una criba es un aparato de varas o barras que tiene ranuras de tamaño uniforme para retener sólidos en un efluente. En cuanto a las partículas gruesas cuyo diámetro es de 6 a 150 mm, su objetivo es (1) remover partículas que puedan dañar equipos en las etapas siguientes, (2) reducir la eficiencia de las operaciones posteriores y (3) contaminar otras fuentes de agua. Por el contrario, las partículas finas que son menores a 6 mm, son separadas para (1) proteger los equipos y (2) eliminar materiales que perjudican la reutilización de biosólidos (Metcalf & Eddy Inc., 2003).

Las cribas para partículas gruesas mitigan el riesgo de obstaculización y daños provocados a bombas, válvulas y tuberías. Las rejillas pueden ser limpiadas manual o mecánicamente. Metcalf y Eddy presentan parámetros de diseño que especifica el ancho y largo de las barras, el espaciado, pendiente, rango de velocidad de aproximación del fluido y la caída de presión permisible. Las cribas para partículas grandes con desbaste mecánico pueden ser impulsados por cadena, de rastrillo recíprocante y de cinta transportadora. Para tamizar partículas pequeñas, se ha establecido un espaciado entre 0.1 a 6 mm. Dentro de los tipos de aparatos para realizar dicha separación está el inclinado fijo, tambor rotatorio, tangencial y recíprocante horizontal. La pérdida de cabeza puede variar entre 0.8 a 1.4 m (Metcalf & Eddy Inc., 2003).

### D. Canal Parshall

La medición del caudal en una PTAR permite evaluar la cantidad de agua que será tratada al igual que el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos. El canal Parshall el cual es un medidor de agua desarrollado por Ralph L. Parshall, un ingeniero del servicio de irrigación de EE.UU., por ser una estructura hidráulica en la que se puede determinar la cantidad de agua en una sección determinada. Estos medidores pueden construirse de diversos materiales entre los cuales está la fibra de vidrio, madera y metal. Sin embargo, últimamente, se ha usado ladrillo, bloques de concreto fundido con concreto reforzado para estructuras más grandes o que requieren de mayor durabilidad. Su función es elevar el nivel del agua junto con un aumento en la rapidez para que después descienda al nivel inicial (Lux Monroy, 2010).

La estructura está conformada por cuatro partes:

- a. Transición de entrada,
  - b. Sección convergente,
  - c. Garganta y
  - d. Sección divergente.
- (Lux Monroy, 2010)

En la transición de entrada, el flujo ingresa al canal con paredes paralelas mientras que el piso sobre el fondo asciende con una pendiente de relación vertical y horizontal de 1:4. Seguidamente en la sección convergente, las paredes del canal se ensanchan de manera lineal o circular con un radio R y el piso no tiene una pendiente. Esto provoca la aceleración del flujo cuya importancia recae en la relación matemática de la altura de carga contra el caudal en el medidor. En la garganta el piso del fondo desciende con una pendiente de 3:8 y el canal tiene paredes paralelas en este tramo. Por último, en la sección divergente, el piso sube de nuevo con una pendiente de 1:6 (Lux Monroy, 2010).

Tabla 4. Relación sugerida para el diseño de la sección convergente.

Ancho de garganta del medidor de Parshall	Radio de pared en sección convergente
0.3048 m (1 ft)	0.41 m
0.3048 – 0.9144 m (1 – 3 ft)	0.51 m
1.2192 – 2.4384 m (4 – 8 ft)	0.61 m

(Lux Monroy, 2010)

Se recomienda que la medida de altura de agua se haga a  $\frac{2}{3}$  de la dimensión de A. Para ello se puede usar un metro o bien, un pozo lateral de medición. Las dimensiones del Canal Parshall se plantean a continuación:

Tabla 5. Ancho de garganta y fórmulas para determinar el caudal en el Canal Parshall.

Ancho de la garganta (cm)		Ecuación*	Capacidad (L/s)
2,5	(1")	$Q = 0,055 H_a^{1,5}$	0,3 – 5
5	(2")	$Q = 0,110 H_a^{1,5}$	0,6 – 13
7,6	(3")	$Q = 0,176 H_a^{1,547}$	0,8 – 55
15,2	(6")	$Q = 0,381 H_a^{1,58}$	1,5 – 110
22,9	(9")	$Q = 0,535 H_a^{1,53}$	2,5 – 250
30,5	(12")	$Q = 0,690 H_a^{1,522}$	3,1 – 455
45,7	(18")	$Q = 1,054 H_a^{1,538}$	4,3 – 700
61,0	(24")	$Q = 1,426 H_a^{1,55}$	12 – 950
91,4	(36")	$Q = 2,182 H_a^{1,566}$	17 – 1.400
121,9	(48")	$Q = 2,935 H_a^{1,578}$	37 – 1.900
152,4	(60")	$Q = 3,728 H_a^{1,587}$	60 – 2.400
182,8	(72")	$Q = 4,515 H_a^{1,595}$	70 – 2.900
213,4	(84")	$Q = 5,306 H_a^{1,601}$	115 – 3.450
243,8	(96")	$Q = 6,101 H_a^{1,606}$	130 – 3.950
305	(120")	$Q = 7,463 H_a^{1,6}$	250 - 5.660

\* Q en m<sup>3</sup>/s; H<sub>a</sub> en m.

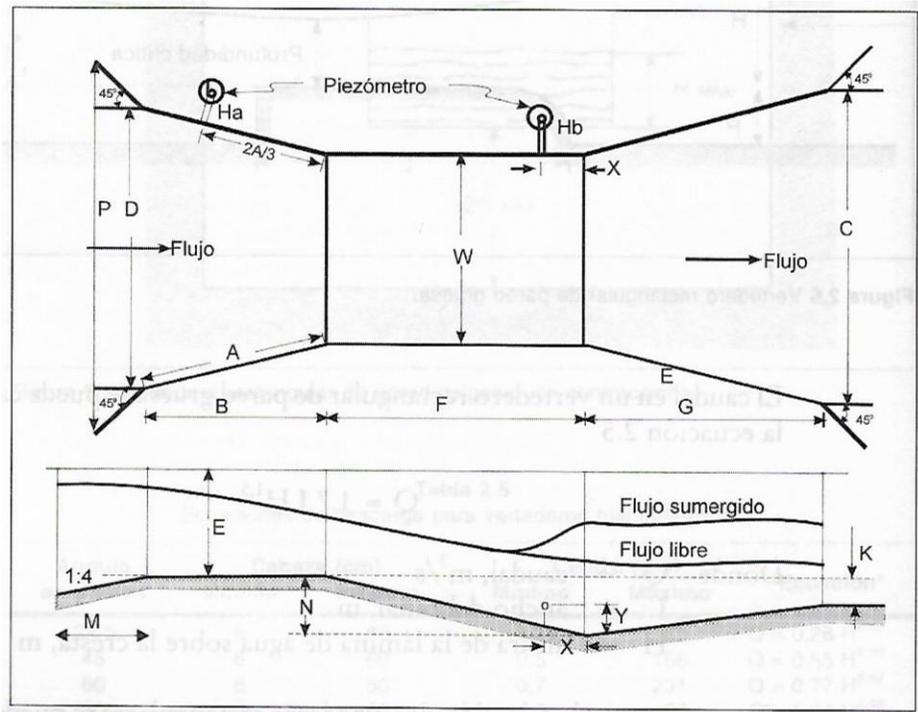
(Romero, 2000)

Tabla 6. Dimensiones del Canal Parshall.

W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)	R (cm)	M (cm)	P (cm)	X (cm)	Y (cm)
2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9	-	-	50,0	0,8	1,3
5,1	41,4	40,6	13,5	21,4	35,6	11,4	25,4	2,2	4,3	-	-	70,0	1,6	2,5
7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	40,6	30,5	76,8	2,5	3,8
15,2	62,1	61,0	39,4	40,3	45,7	30,5	61,0	7,6	11,4	40,6	30,5	90,2	5,1	7,6
22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	61,0	30,5	45,7	7,6	11,4	40,6	30,5	108,0	5,1	7,6
30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	149,2	5,1	7,6
45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	167,6	5,1	7,6
61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	185,4	5,1	7,6
91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	222,3	5,1	7,6
122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	271,1	5,1	7,6
152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	308,0	5,1	7,6
182,8	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	344,2	5,1	7,6
213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	381,0	5,1	7,6
244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	417,2	5,1	7,6
305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	-	-	-	30,5	22,9

(Romero, 2000)

Figura 1. Dimensiones para el diseño del Canal Parshall.



(Romero, 2000)

## E. Homogeneización del caudal

A causa de las variaciones del flujo volumétrico y las características del agua residual se usa la homogeneización de caudal para lograr una descarga a velocidad constante y cuyas propiedades fisicoquímicas posean mínima variación. Los beneficios de realizar este paso consisten en amortiguar la alimentación de una PTAR, mejorar el rendimiento en los procesos más adelante, así como también reducir los costos y tamaños de los reactores que van a tratar las aguas (Metcalf & Eddy Inc., 2003).

La propuesta de tanques de homogeneización depende de qué tipo de instalación convenga. Un arreglo en línea consiste en que el afluente debe de pasar por el tanque. Este implica el uso de bombas para transportar el fluido hacia la siguiente etapa. Por el contrario, un arreglo off-line se caracteriza porque solamente el agua en exceso se descarga al tanque de homogeneización, lo cual reduce el consumo y potencia de bombeo (Metcalf & Eddy Inc., 2003).

La capacidad que posee el tanque se diseña a partir del volumen promedio acumulativo diario. Al hacer un gráfico de dispersión, se debe de identificar las horas en el que existe un flujo máximo y mínimo. Luego, se traza una línea entre el dato inicial y final. Si la recta corta la línea del gráfico de dispersión entonces la diferencia de volúmenes máximo y mínimo representa el volumen

necesario del tanque. Si no intercepta la línea, entonces se usa la diferencia de alturas entre uno de los límites y la recta. Se debe de sobredimensionar la estructura puesto que (1) la operación continua de aireación y mezclado no realizará una descarga completa, (2) debe de conocerse el volumen de recirculación de la PTAR hacia el tanque, a pesar de que no es lo recomendable, (3) se requiere de una contingencia por cambios en el flujo (Metcalf & Eddy Inc., 2003).

Siendo de los elementos más económicos en una PTAR, estos pueden construirse a base de tierra, concreto o acero. Tiene un área transversal de forma trapezoidal con pendientes de relación vertical – horizontal de 3:1 o 2:1. Para reducir los olor y septicidad se colocan aireadores. Dichos aparatos implican que el nivel del tanque debe de mantenerse sobre un nivel de 1.5 – 2 m. Como medidas de prevención se usa cemento para suelos en las paredes inclinadas del tanque y se cerca el área con el fin de restringir el acceso al público (Metcalf & Eddy Inc., 2003).

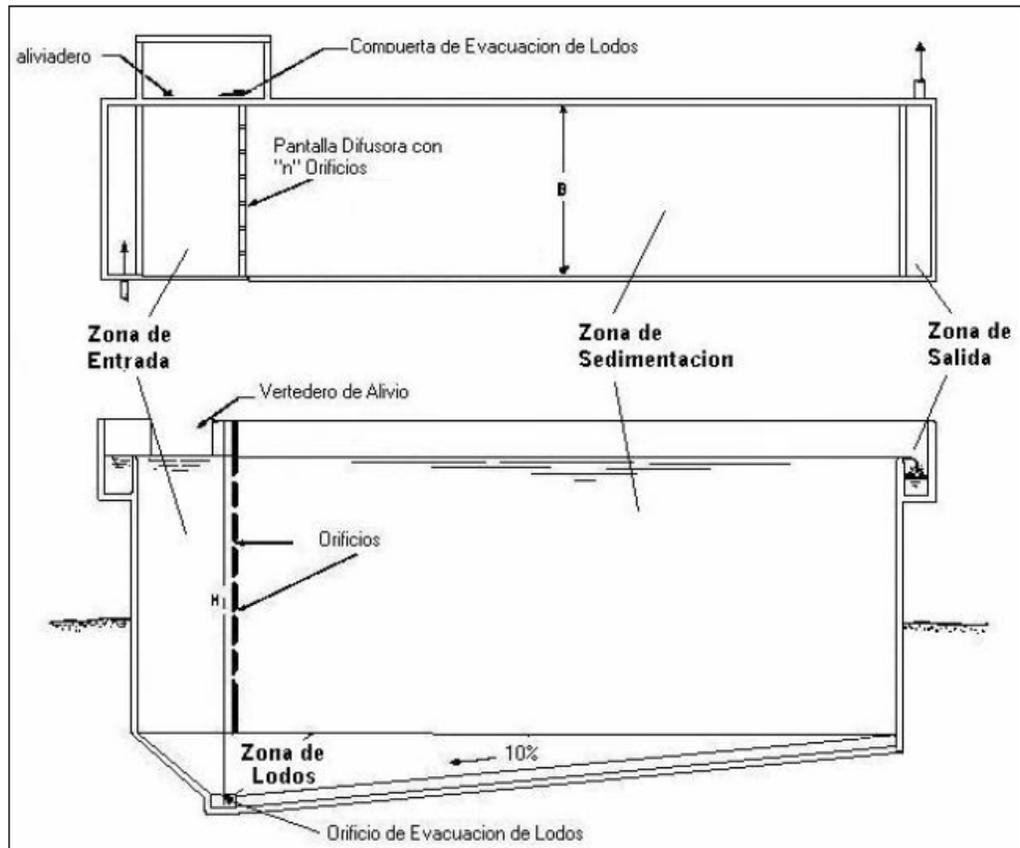
## F. Sedimentación primaria

La sedimentación es una operación de separación de sólidos suspendidos en un líquido gracias a la capacidad que tienen de descender. En su aplicación en las PTAR, estas partículas son responsables de la turbidez en el agua, por lo que llegan a inhibir los procesos biológicos, además de causar grandes pérdidas de carga. Para recuperar su calidad, se usa un sedimentador con capacidad de remover tamaños de partículas entre 0.05 a 0.5 milímetros. Sus componentes son:

- a. Zona de entrada,
- b. Zonas de sedimentación y
- c. Zona de salida

(Villareal, 2015)

Figura 2: Vista de un sedimentador y sus partes. (Arriba: vista de perfil, Abajo: vista de planta)



(Villareal, 2015)

La zona de entrada es una estructura hidráulica que se caracteriza para tener una distribución uniforme de flujo. En la zona de sedimentación, hay un canal rectangular en donde el flujo se traslada en una dirección a velocidad constante. Estas condiciones son adecuadas para la sedimentación de las partículas. La zona de salida está compuesta por un vertedero, canaletas o tubos perforados que recolectan el efluente. Luego de la separación de sólidos, estos se dirigen al fondo para que una tolva los colecte en la zona de lodos. Se cuenta con una tubería y una válvula para la descarga de estos residuos (Villareal, 2015).

Los tanques de sedimentación primaria brindan un tiempo de retención entre 1.5 a 2.5 horas con el fin de separar la mayor cantidad de sólidos suspendidos. Cuando el tiempo está entre 0.5 a 1 hora, la remoción es menor, más, sin embargo, se usan estos tiempos si las aguas continúan hacia el tratamiento biológico. (Universidad de las Américas Puebla, 2017) De este proceso se descargan los lodos primarios. La composición depende del área generadora de aguas la concentración del material orgánico. Sin embargo, es un fluido con un 92 a un 06% de humedad (Gómez, 2016).

## G. Tratamiento biológico de aguas residuales

Los objetivos generales del tratamiento biológico de aguas residuales domésticas son: transformar constituyentes biodegradables disueltos o particulados en productos finales aceptables, capturar o incorporar sólidos coloidales suspendidos o no sedimentables en un flóculo biológico o en un biofilm, transformar o remover nutrientes, como fósforo y nitrógeno, y, en algunos casos, remover trazas de compuestos o constituyentes orgánicos específicos. En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo es remover o reducir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos (Metcalf & Eddy, 2003).

Varios microorganismos, principalmente bacterias, permiten la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la estabilización de la materia orgánica presente en aguas residuales. Los microorganismos se usan para oxidar la materia orgánica disuelta y particulada en productos finales más simples y biomasa adicional. Para llevar a cabo la conversión de materia orgánica en productos más simples, como dióxido de carbono y agua, se requieren de nutrientes, como oxígeno, amoníaco y fosfato. Los microorganismos también cumplen la función de remover nitrógeno y fósforo. La biomasa adicional generada durante el proceso puede removerse usando sedimentación por gravedad. Para completar el tratamiento, es necesario remover la biomasa producida. De lo contrario, esta sería medida como DBO en el efluente. Debido a que varios compuestos en las aguas residuales industriales pueden ser tóxicos para los microorganismos, es probable que se requiera de un pretratamiento antes de poder ser descargadas a un sistema de tratamiento municipal (Metcalf & Eddy, 2003).

## H. Tipos de tratamiento secundario

Según la función metabólica de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica, los procesos de tratamiento secundario pueden ser aerobios, anaerobios, anóxicos y facultativos (Metcalf & Eddy, 2003).

### 3. Procesos aerobios

La estabilización de materia orgánica y conversión de nutrientes se realiza en presencia de oxígeno disuelto. Este puede suministrarse de forma natural o requerir de un suministro artificial (Comisión Nacional de Agua, 2007). Solo ocurre una parte del carbono se estabiliza como  $\text{CO}_2$  y se forman mayores cantidades de biomasa, que salen como lodos (De Lemos, 2007).

### 4. Procesos anaerobios

La materia orgánica se depura en ausencia de oxígeno. La mayor parte del carbono es convertida en biogás y sólo una pequeña parte es convertida en biomasa, la cual forma el exceso de lodos del afluente (De Lemos, 2007).

## 5. Procesos anóxicos

También conocido como desnitrificación, es el proceso por medio del cual el nitrógeno presente en nitratos es convertido biológicamente en nitrógeno gaseoso, en ausencia de oxígeno (Metcalf & Eddy, 2003).

## 6. Procesos facultativos

Son los llevados a cabo por microorganismos que pueden funcionar tanto en ausencia como en presencia de oxígeno (Metcalf & Eddy, 2003). Un ejemplo son las lagunas facultativas, en las cuales la parte superior tiene condiciones aerobias y la parte inferior, anaerobias (Comisión Nacional de Agua, 2007).

Dados los objetivos de este documento, se analizarán los procesos de tratamiento secundario anaerobio.

## I. Fases de la digestión anaerobia

La digestión anaeróbica puede subdividirse en varias rutas metabólicas, con la participación de diferentes tipos de microorganismos, como se muestra en la Figura 2. Las cuatro etapas principales en la digestión son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

### 1. Hidrólisis

La primera etapa del proceso consiste en la hidrólisis de material particulado complejo en material disuelto más simple. Al encontrarse en una forma más simple, los microorganismos son capaces de asimilar la materia orgánica. La materia particulada es disuelta por la acción de exoenzimas excretadas por bacterias fermentadores hidrolíticas. La hidrólisis de polímeros suele ocurrir de forma lenta y puede ser afectada por varios factores, incluyendo: temperatura del reactor, tiempo de residencia, composición del sustrato, tamaño de partículas, pH del medio, concentración de amonio y nitrógeno y concentración de los productos de hidrólisis (De Lemos, 2007).

### 2. Acidogénesis

La acidogénesis es llevada a cabo por varios grupos de bacterias fermentadoras, usualmente del grupo clostridia. Durante esta etapa, los productos de la hidrólisis son metabolizados dentro de las bacterias y son convertidos en compuestos más simples, que son excretados por las células. Los productos incluyen ácidos grasos volátiles, alcoholes, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrógeno, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y nuevas células bacterianas (De Lemos, 2007).

### 3. Acetogénesis

Durante esta etapa, bacterias acetogénicas convierten los productos generados en la acidogénesis en sustratos apropiados para los microorganismos metanogénicos. De todos los

productos de la acidogénesis, solo el hidrógeno y el acetato pueden ser utilizados de forma directa en la metanogénesis. Sin embargo, al menos el 50% de la DQO biodegradable es convertida en ácido propiónico y ácido butírico, que luego son descompuestos en ácido acético e hidrógeno por bacterias acetogénicas. Además, se produce dióxido de carbono como producto de esta etapa (De Lemos, 2007).

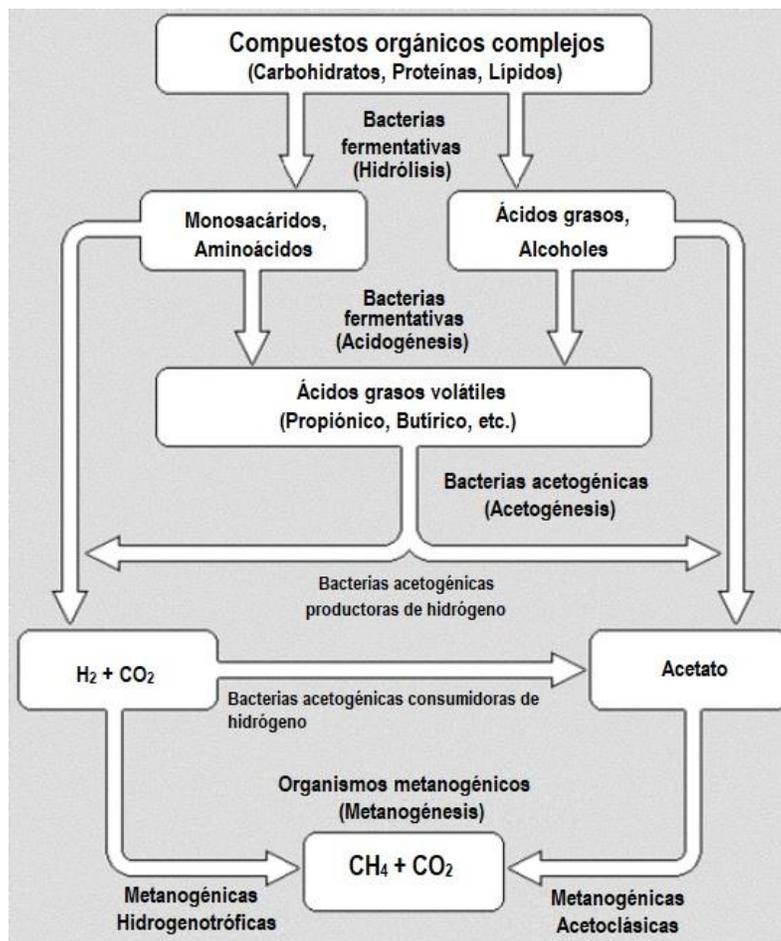
Durante la formación de ácido acético y propiónico, se forman grandes cantidades de hidrógeno, haciendo que se reduzca el pH del medio. Sin embargo, el hidrógeno se consume de dos formas: (1) por organismos metanogénicos que usan hidrógeno y dióxido de carbono para producir metano, y (2) por la formación de ácidos orgánicos por reacción de hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético (De Lemos, 2007).

#### 4. Metanogénesis

La última etapa en la degradación de materia orgánica a metano y dióxido de carbono es llevada a cabo por arqueas metanogénicas. Estas utilizan solo algunos sustratos, incluyendo: ácido acético, hidrógeno, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas y monóxido de carbono. Con base en su afinidad por los sustratos, los microorganismos metanogénicos se dividen en dos grupos (De Lemos, 2007):

- Metanógenos acetoclásticos: forman metano a partir de ácido acético y metanol. Son los microorganismos predominantes en esta etapa, responsables del 60-70 % de la producción de metano (De Lemos, 2007).
- Metanógenos hidrogenotróficos: forman metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono (De Lemos, 2007).

Figura 2. Rutas metabólicas de la digestión anaeróbica.



(De Lemos, 2007).

## J. Factores que afectan el tratamiento secundario anaerobio

En la siguiente tabla, se detallan los factores generales que afectan el tratamiento secundario anaerobio, así como sus implicaciones en el diseño de los sistemas.

Tabla 7. Consideraciones de diseño para el tratamiento anaerobio, según los factores que lo afectan.

Factor	Consideraciones en el diseño
Características del agua residual	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los procesos anaerobios son atractivos para aguas con cargas y temperaturas altas.</li> <li>- Deben considerarse la DQO, presencia de corrientes tóxicas, variaciones de flujo, concentraciones inorgánicas y variaciones estacionales de carga en el agua residual.</li> <li>- En climas cálidos, se han usado tratamientos anaerobios para aguas municipales.</li> </ul>
Variaciones de carga y flujo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplias variaciones de flujo y carga orgánica pueden alterar el balance entre fermentación y metanogénesis.</li> <li>- Las temperaturas que se prefieren para que el reactor tenga velocidades de reacción óptimas y tratamiento estable son de 25 a 35 °C.</li> </ul>
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para procesos de crecimiento suspendido y adjunto, se puede aplicar tratamiento anaerobio con temperaturas de 10-20 °C. Se tienen menores velocidades de reacción, mayores tiempos de retención, reactores de mayor volumen y se necesita una menor DQO en el agua residual.</li> </ul>
Fracción de materia orgánica no disuelta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La composición del agua en función de fracciones particuladas o solubles influye en el tipo de reactor seleccionado.</li> <li>- Aguas con concentraciones altas de sólidos se tratan en reactores de crecimiento suspendido.</li> </ul>
Alcalinidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se requieren concentraciones de 2000 a 4000 mg/L de CaCO<sub>3</sub>, dependiendo de la cantidad de CO<sub>2</sub> en el gas, para mantener un pH neutro.</li> <li>- Es posible que el agua residual ya tenga el nivel de alcalinidad requerido o que este se alcance por degradación de proteínas y aminoácidos. De no ser así, deben agregarse químicos.</li> </ul>

Factor	Consideraciones en el diseño
Nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requerimientos en el agua residual, dependiendo de características de sustrato y tiempo de retención, por cada 100 mg de biomasa: 10-13 mg de nitrógeno, 2.0-2.6 mg de fósforo y 1-2 mg de sulfuro.</li> <li>- Para mantener máxima actividad metanogénica, la fase líquida requiere 50 mg/L de nitrógeno, 20 mg/L de fósforo y 5 mg/L de sulfuros.</li> </ul>
Macronutrientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requerimiento en mg metal/g acetato producido: hierro 0.02, cobalto 0.004, níquel 0.003 y zinc 0.02.</li> <li>- Se recomiendan adiciones de 1.0 mg FeCl<sub>2</sub>, 0.1 mg CoCl<sub>2</sub>, 0.1 mg NiCl<sub>2</sub> y 0.1 ZnCl<sub>2</sub>.</li> </ul>

Elaboración propia, con información de Metcalf & Eddy (2003).

## K. Comparación entre el tratamiento biológico anaerobio y aerobio

Tabla 8. Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio de aguas residuales, en comparación con el tratamiento aerobio.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se requiere de menos energía.</li> <li>- Menor producción de lodos.</li> <li>- Menores requerimientos de nutrientes.</li> <li>- Se produce metano, una potencial fuente de energía.</li> <li>- Menores volúmenes de reactores.</li> <li>- Respuesta rápida a adición de sustrato después de períodos largos sin alimentación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor tiempo para puesta en marcha y para desarrollo de biomasa inicial.</li> <li>- Puede requerir de adición de alcalinidad.</li> <li>- Puede requerir de tratamiento posterior para cumplir con requisitos de descarga.</li> <li>- No permite la remoción biológica de nitrógeno y fósforo.</li> <li>- Mayor sensibilidad al efecto de la temperatura sobre el tiempo de retención.</li> <li>- Puede ser propenso a sustancias tóxicas.</li> <li>- Potencial producción de olores y gases corrosivos.</li> </ul>

(Metcalf & Eddy, 2003).

## L. Tipos de tratamiento secundario anaerobio, según tipo de proceso

### 1. Procesos de crecimiento suspendido

En los procesos de crecimiento suspendido, los microorganismos se mantienen en suspensión en el líquido por medio de agitación. Estos procesos pueden utilizarse en plantas de tratamiento de forma aerobia y de forma anaerobia. Inicialmente, los procesos de crecimiento suspendido anaerobio fueron diseñados de forma similar a los procesos de lodos activados aerobios. Los procesos anaerobios son más comunes para aguas residuales industriales con altas concentraciones orgánicas y para lodos (Metcalf & Eddy, 2003).

Este tipo de procesos incluyen a los digestores anaeróbicos agitados de crecimiento suspendido, el proceso anaeróbico de contacto y el reactor anaeróbico por lotes. El primero consiste en un reactor agitado en que el tiempo de retención hidráulica y de sólidos es igual. En el segundo, se agrega un floculador y un clarificador para separar la biomasa y recircularla al reactor. Por último, en los reactores por lotes, se lleva a cabo un proceso de sedimentación y decantación para separar sólidos y líquidos, en el mismo tanque en el que se realiza la agitación (Metcalf & Eddy, 2003).

### 2. Reactores anaerobios de flujo ascendente

Más comúnmente conocidos como reactores UASB por sus siglas en inglés (*Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor*), son procesos en el que el agua residual ingresa por la parte inferior del reactor y fluye de forma ascendente por medio de un lecho de lodos. Una de las características de este proceso son las condiciones necesarias para formar el lecho granular de sólidos. Estas incluyen un pH cercano a 7.0, aguas con altas cargas de DQO, la velocidad ascendente, el tipo de sólidos suspendidos y la adición de nutrientes. Estos procesos incluyen, además de los RAFA originales, el RAFA modificado, el reactor anaeróbico con deflectores (ABR, por sus siglas en inglés) y el reactor anaerobio de lecho migrante (AMBR) (Metcalf & Eddy, 2003).

### 3. Procesos de crecimiento adjunto

En los procesos de crecimiento adjunto, los microorganismos se encuentran adjuntos a un material empacado, llamado biofilm. Cuando el agua residual pasa a través de este material empacado, el material orgánico y los nutrientes son removidos. Los materiales de empaque usados en este tipo de procesos incluyen roca, grava, arena, escoria, y varios tipos de plásticos y materiales sintéticos. Los procesos de crecimiento adjunto pueden operarse tanto de forma aerobia como de forma anaerobia. El empaque puede sumergirse completamente en el líquido o no sumergirse, con aire o un gas sobre la capa líquida del biofilm (Metcalf & Eddy, 2003).

Los procesos de crecimiento adjunto incluyen: los filtros anaerobios de flujo descendente y de flujo ascendente (de los cuales se presentan más adelante), los reactores anaerobios de lecho

expandido y los reactores anaerobios de lecho fluidizado. Los reactores de lecho expandido usan arena fina para el crecimiento del biofilm. Se utilizan recirculaciones para aumentar las velocidades de flujo y expandir el lecho un 20%. En los reactores de lecho fluidizado se utilizan velocidades aún más altas, para que haya una fluidización y mezcla del lecho. Los reactores de lecho fluidizado y lecho expandido tienen mayor área de contacto y mejor transferencia de masa, pero menor captura de sólidos (Metcalf & Eddy, 2003).

#### 4. Procesos en lagunas

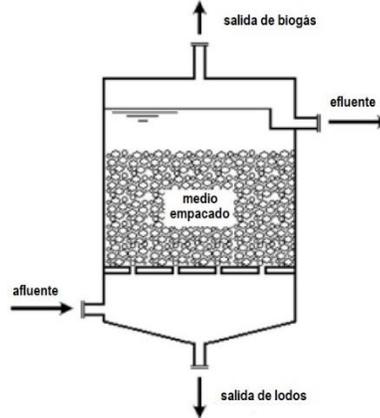
Las lagunas de estabilización son excavaciones en el suelo donde se almacena agua residual mientras se logra su tratamiento por actividad bacteriana y acciones simbióticas de algas y otros organismos. Se logra una estabilización natural del agua por medio de varios procesos físicos, químicos y biológicos. La materia suspendida se remueve por medio de procesos físicos. Las lagunas de estabilización pueden ser del tipo aerobio, anaerobio y facultativo. En las lagunas anaerobias, ocurren procesos anóxicos y anaeróbicos (Comisión Nacional de Agua, 2007).

#### M. Filtros anaerobios de flujo ascendente

Los Filtros Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) son un tipo de tratamiento secundario de aguas residuales, en el cual el crecimiento de los microorganismos es adjunto a un material empacado dentro del filtro. El agua de fluye forma ascendente a través de los intersticios de dicho material empacado. Una cantidad alta de los microorganismos encargados del tratamiento se almacenan en los espacios vacíos del lecho y no directamente en el material de empaque. Por ello, se emplean velocidades bajas de flujo que eviten la pérdida de los microorganismos. Al pasar el tiempo, se acumulan sólidos y biomasa en el empaque que puede causar obstrucción en el flujo. En este momento es necesario retirar los sólidos del empaque por enjuague y drenaje (Metcalf & Eddy, 2003).

En los filtros anaeróbicos de flujo ascendente cuentan con tres secciones: el fondo, el lecho filtrante y el borde superior, como se muestra en la Figura 3. El agua ingresa por el fondo del filtro, luego fluye de forma ascendente por el lecho y se descarga por el borde superior. Además, pueden usarse como tratamiento complementario después de un tanque séptico o como único tratamiento biológico. Este tipo de filtros tienen un alto potencial en la aplicación de aguas residuales con bajas cargas contaminantes, por sus altos tiempos de retención de sólidos asociados a bajos tiempos de retención hidráulica. La recirculación de los efluentes no se acostumbra si la carga orgánica de entrada es baja (De Lemos, 2007).

Figura 3. Representación esquemática de un filtro anaerobio de flujo ascendente.



(De Lemos, 2007).

Las ventajas de los filtros anaerobios son altas cargas de DQO, volúmenes de reactor relativamente pequeños y simplicidad en la operación. Sus principales limitantes son el costo del empaque y los problemas de operación y mantenimiento asociados a la acumulación de sólidos y taponamiento del empaque. Este proceso se adecúa mejor a aguas con niveles bajos de sólidos suspendidos (Metcalf & Eddy, 2003).

El propósito del material de empaque en el filtro es retener los sólidos dentro del reactor, en forma de una capa formada sobre su superficie o por la retención de sólidos en sus intersticios. Se han utilizado varios materiales como empaque. Estos incluyen cuarzo, bloques cerámicos, conchas, piedra caliza, anillos plásticos, cilindros huecos, bloques modulares de PVC, granito, bolas de polietileno, bambú, etc. El taponamiento de los filtros es uno de los mayores problemas, asociado al uso de piedra como material de empaque. Los filtros que utilizan plástico no se han asociado con problemas de taponamiento, incluso cuando tienen grandes superficies específicas. Los aspectos operacionales son importantes para evitar los taponamientos. Otras características deseables de los medios empacados se muestran en la Tabla 9 (De Lemos, 2007).

Los primeros filtros anaerobios de flujo ascendente contenían roca como material de empaque. En la actualidad, se emplean varios diseños con plásticos sintéticos. Los materiales de empaque más comunes son plásticos corrugados de flujo cruzado o anillos Pall de plástico. El área específica de los empaques es, en promedio, de  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y no se reportan mejoras en la eficiencia del proceso a mayores densidades de empaque (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 9. Requerimientos del material de empaque en filtros anaeróbicos.

Requerimiento	Objetivo
Ser estructuralmente resistente	Soportar su propio peso y el peso de los sólidos biológicos adheridos a su superficie
Ser inerte química y biológicamente	Evitar la reacción entre el lecho y los microorganismos
Ser lo suficientemente ligero	Evitar estructuras caras y pesadas, que permitan la construcción de filtros altos, necesarios para reducir el área de instalación necesaria
Tener gran área específica	Permitir la adhesión de una mayor cantidad de sólidos biológicos
Tener alta porosidad	Permitir una mayor área libre para la acumulación de bacterias y reducir la posibilidad de taponamiento
Permitir una acelerada colonización de microorganismos	Reducir el tiempo de puesta en marcha del reactor
Presentar una superficie rugosa, carente de formas planas	Asegurar una buena adherencia y alta porosidad
Tener un precio reducido	Hacer del proceso económicamente viable

Tomado de De Lemos (2007).

## 1. Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo promedio de residencia del líquido dentro del filtro, calculado con la ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

(Ecuación 1)

(De Lemos, 2007)

En donde:

V = volumen del filtro (m<sup>3</sup>)

Q = caudal promedio (m<sup>3</sup>/d)

TRH = tiempo de retención hidráulica (d)

De Lemos (2007) indica que el tiempo de retención hidráulica es de 4 a 10 horas para filtros que tratan los efluentes de tanques sépticos y de reactores tipo UASB, para el cumplimiento de regulaciones menos exigentes. Por otra parte, Metcalf & Eddy (2003) reportan tiempos de retención desde 0.5 hasta 37 días, para aguas residuales generadas por diferentes procesos.

## 2. Dimensiones

Los filtros anaerobios de flujo ascendente se utilizan en tanques que pueden ser cilíndricos o rectangulares, con anchos y diámetros en un rango de 2 a 26 metros y alturas en un rango de 3 a 13 m. Los volúmenes de los reactores varían de 100 a 10,000 m<sup>3</sup>. El material de empaque puede colocarse en toda la altura del filtro o hasta, aproximadamente, un 50 a 70% de la altura total (De Lemos, 2007).

En un FAFA, la altura del borde superior es de 0.5 m, la altura del empaque es de 0.8 m – 3.0 m y la altura del fondo es de 0.5 m – 1.0 m. El valor más comúnmente usado para el empaque es de 1.5 m, aunque se puede usar el límite máximo de 3.0 m en el caso de empaques plásticos que no presenten mayor obstrucción (Comisión Nacional de Agua, 2009).

Entonces, la altura total del filtro se calcula como:

$$H = H_s + H_L + H_f$$

(Ecuación 2)

(De Lemos, 2007)

En donde:

H = profundidad total del filtro

H<sub>s</sub> = altura del borde superior

H<sub>L</sub> = altura del lecho empacado

H<sub>f</sub> = altura del fondo

## 3. Razón de carga hidráulica

La razón de carga hidráulica (RCH) se refiere al volumen de agua residual aplicada a diario por unidad de área en el filtro, como se calcula en la siguiente ecuación:

$$RCH = \frac{Q}{A}$$

(Ecuación 3)

(De Lemos, 2007)

En donde:

RCH = razón de carga hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d)

Q = caudal promedio de entrada (m<sup>3</sup>/d)

A = área del filtro (m<sup>2</sup>)

Se han reportado efluentes de alta calidad con filtros operando con cargas hidráulicas en un rango de 6 a 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d (De Lemos, 2007).

#### 4. Carga orgánica volumétrica

La carga orgánica volumétrica se refiere a la carga de materia orgánica aplicada diariamente por unidad de volumen o del lecho filtrante. Puede calcularse en términos de la DBO o de la DQO. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{S_i Q}{V}$$

(Ecuación 4)

(De Lemos, 2007)

En donde:

$C_v$  = carga orgánica volumétrica (kg DBO/m<sup>3</sup>-d o kg DQO/m<sup>3</sup>-d)

$Q$  = caudal promedio de entrada (m<sup>3</sup>/d)

$S_i$  = DBO o DQO de entrada (kg DBO/m<sup>3</sup> o kg DQO/m<sup>3</sup>)

$V$  = volumen total del filtro o del lecho empacado (m<sup>3</sup>)

Las cargas orgánicas recomendadas son de 0.15 a 0.50 kg DBO/m<sup>3</sup>-d para el volumen total del filtro y de 0.25 a 0.75 kg DBO/m<sup>3</sup>-d para el volumen del lecho empacado (De Lemos, 2007).

#### 5. Eficiencia

La eficiencia esperada de los filtros anaeróbicos se puede estimar con la (Ecuación 5). Esta es una ecuación de desempeño empírica, basada en el tiempo de retención hidráulica y obtenida al ajustar datos experimentales de varios estudios. La ecuación tiene como limitaciones la falta de reportes obtenidos de filtros a escala real y un número limitado de datos para determinar las constantes empíricas, las cuales presentan desviaciones entre ellas (De Lemos, 2007).

$$\eta = 100[1 - b (TRH)^{-m}]$$

(Ecuación 5)

(De Lemos, 2007)

En donde:

$\eta$  = eficiencia

$b$  = constante empírica del sistema, con un valor de 0.87

$m$  = constante empírica del sistema, con un valor de 0.50

TRH = tiempo de retención hidráulica (h)

De Lemos (2007) ha reportado eficiencias de remoción de DBO y DQO entre 68% y 79%, para filtros que tratan aguas provenientes de un tratamiento preliminar, con tiempos de retención hidráulica entre 6 y 8 horas. Para filtros que tratan efluentes de tanques sépticos y reactores UASB, reporta eficiencias de remoción de DBO entre 75% y 85%. Metcalf & Eddy (2003), indican eficiencias de remoción de DQO que varían desde 61% hasta 96%, para efluentes de diferentes tipos y con distintos tiempos de retención.

En el caso de los sólidos suspendidos en reactores ascendentes, se ha argumentado que es inadecuado describir la eficiencia de remoción por medio del tiempo de retención hidráulica. El efecto de este parámetro podría manifestarse por medio de su relación directa con la velocidad ascendente de flujo. Se han reportado eficiencias de remoción decrecientes al aumentar la velocidad ascendente de flujo. Esto sucede debido a que se supera la velocidad de asentamiento de más partículas, deteriorando la eficiencia de remoción (Mahmoud, *et. al.*, 2003).

Se han observado eficiencias de remoción de sólidos suspendidos del 70% a velocidades de flujo de 0.75 m/h y 0.9 m/h, reduciéndose hasta 51% a velocidades de 3.4 m/h. Sin embargo, la eficiencia a una velocidad de 0.60 m/h fue solo del 60%, debido a la producción de metano, por el aumento de los tiempos de retención hidráulica y, por ende, del tiempo de retención de sólidos (Mahmoud, *et. al.*, 2003).

Otro estudio, realizado en filtros anaeróbicos de flujo ascendente, reportó una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales del 73 ( $\pm 25$ ) %, con un afluente de 132 ( $\pm 75$ ) mg/L y un efluente de 30 ( $\pm 22$ ) mg/L. Los parámetros de operación promedio del filtro fueron: cuadal de 0.078 ( $\pm 0.021$ ) m<sup>3</sup>/día, tiempo de retención hidráulica de 0.98 ( $\pm 0.33$ ) días y carga orgánica de 0.472 ( $\pm 0.285$ ) kg/m<sup>3</sup>-día (Fia, *et. al.*, 2012).

La eficiencia esperada del sistema puede relacionarse con las concentraciones del efluente por medio de la siguiente ecuación (De Lemos, 2007):

$$S_s = S_e - \eta * S_e$$

(Ecuación 6)

(De Lemos, 2007)

En donde:

$S_s$  = concentración de salida (mg/L)

$S_e$  = concentración de entrada (mg/L)

$\eta$  = eficiencia

## N. Lagunas anaerobias de estabilización

Otro tipo de tratamiento secundario biológico son las lagunas anaerobias. Estas son un tipo de lagunas de estabilización utilizadas para el tratamiento de aguas domésticas o industriales, en el que la depuración de la materia orgánica se realiza en ausencia de oxígeno libre (condiciones anóxicas) y/o combinado (anaerobia). El efluente de las lagunas normalmente se descarga hacia otras unidades para terminar su tratamiento y oxigenarlo. La estabilización de la materia orgánica se da por la combinación de los procesos de sedimentación y digestión anaerobia. Esta última convierte los desechos en gases (metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno), lodos orgánicos y nuevas células (Comisión Nacional de Agua, 2007).

Las principales ventajas de las lagunas anaerobias es su capacidad de tratar aguas de varias características, incluyendo sólidos, aceites y grasas. Otras ventajas incluyen una construcción simple y económica, un volumen amplio que permite una homogenización del efluente, el uso de cargas bajas y una calidad alta del efluente. Las desventajas incluyen el requerimiento de un área amplia, posibles ineficiencias en la distribución de la alimentación y el mantenimiento de la geomembrana (Metcalf & Eddy, 2003).

Uno de los cuidados a considerar al tratar con lagunas de estabilización es evitar la contaminación de acuíferos, evitando que el agua se infiltre al suelo. De no poder construir en un sitio con suelo impermeable, deberá procederse a impermeabilizarlo. Esto puede representar el costo máximo de construcción. Las técnicas de impermeabilización son tres: suelo natural compactado, suelo mejorado con estabilizantes químicos o adición de suelo importado, y el uso de revestimientos químicos o geomembranas (Comisión Nacional de Agua, 2007).

El uso de revestimientos sintéticos o geomembranas busca eliminar totalmente las filtraciones de agua. Las geomembranas pueden ser de plásticos (PVC, PAD y poliamida), de elastómeros, de bentonita y geotextiles. El principal requisito para considerar al seleccionar la geomembrana es su vida útil, la cual debe ser de 20 años si se trata agua municipal. Por eso, las membranas de polietileno de alta densidad son las preferidas (Comisión Nacional de Agua, 2007).

### 1. Carga orgánica volumétrica

Las lagunas anaerobias pueden diseñarse a partir de la carga orgánica volumétrica, sin tener riesgos de generar malos olores. El valor permisible para la carga orgánica aumenta con la temperatura. Sin embargo, existen pocos datos que permitan el desarrollo de una ecuación de diseño. Los valores de carga deberían encontrarse entre 100 y 400 g DBO/m<sup>3</sup>-d. Cargas orgánicas mayores al límite inferior son necesarias para garantizar las condiciones anaeróbicas y cargas menores al límite superior evitan malos olores por la generación de sulfuro de hidrógeno. (Mara y Pearson, 1998).

En la Tabla 10 se muestran los valores aceptables de carga orgánica, así como la eficiencia de remoción de DBO esperada dada la temperatura. La temperatura de diseño debe ser igual a la temperatura promedio mensual más baja. Los datos de la tabla se basan en lagunas que operan debajo de 10 °C en Alemania y a 25 °C o temperaturas más altas en Brasil. Nótese que el límite máximo para la carga en el diseño es de 350 g DBO/ m<sup>3</sup>-d. Una vez seleccionada la carga volumétrica, se calcula el volumen con la (Ecuación 4. (Mara y Pearson, 1998).

Tabla 10. Valores de diseño permisibles para la carga volumétrica de DBO y la eficiencia de remoción de DBO en lagunas anaerobias de estabilización a varias temperaturas.

Temperatura (°C)	Carga volumétrica (g/m <sup>3</sup> d)	Remoción de DBO (%)
< 10	100	40
10-20	20*T -100	2*T + 20
20-25	10*T + 100	2*T + 20
> 25	350	70

T = temperatura (°C)

Tomado de Mara y Pearson (1998).

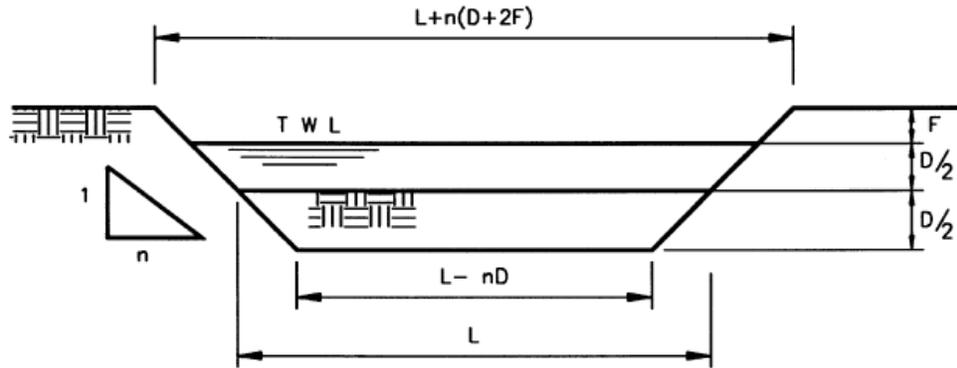
## 2. Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica debe determinarse con la (Ecuación 1, una vez seleccionada la carga hidráulica. El tiempo de retención debe ser de al menos 1 día. De obtenerse un valor menor, se deben repetir los cálculos utilizando un tiempo de retención igual a 1 día (Mara y Pearson, 1998).

## 3. Dimensiones

Generalmente, los diseños de las lagunas anaerobias son rectangulares, con relaciones largo-ancho de 2-3 a 1, para evitar que se formen bancos cerca de la entrada. La profundidad del líquido debe encontrarse entre 2 y 5 metros, además de un bordo libre de 0.5 metros, el cual evita olas provocadas por el viento. Las dimensiones de la laguna a una profundidad media del líquido pueden calcularse conociendo la profundidad y el volumen del líquido necesarios. Estas dimensiones luego se corrigen por la inclinación de los taludes de la laguna, de acuerdo con la Figura 4, para obtener las dimensiones reales de la laguna (Mara y Pearson, 1998).

Figura 4. Cálculo de las dimensiones en las partes superior e inferior de la laguna, a partir de las dimensiones basadas en la profundidad media.



Mara y Pearson (1998).

En la figura,

- $L$  = largo o ancho de la laguna, calculado a la profundidad media de líquido
- $D$  = profundidad del líquido en la laguna
- $F$  = altura del borde libre
- $n$  = factor de inclinación

#### 4. Eficiencia

El desempeño de las lagunas anaerobias de estabilización aumenta significativamente con la temperatura y con la carga asumida para el diseño. Mara y Pearson (1998) reportan eficiencias de remoción de DBO en relación con estos parámetros, las cuales pueden tomarse de la Tabla 10. La Agencia de Protección Ambiental (2002) reporta eficiencias de remoción de hasta el 80% para lagunas que operan de 25 a 30 °C con tiempos de retención de 1 a 2 días. Ferrer y Seco (2008) reportan que este tipo de lagunas pueden remover el 40% de la DQO. Para la remoción de SST, la eficiencia varía entre 50% y 80%. El último valor corresponde a tiempos de retención prolongados (Fernández, *et. al.* 2009).

#### O. Producción de lodos

Metcalf & Eddy (2003) reportan la cantidad de lodos y sus características, según diferentes procesos de tratamiento. Las características para lodos primarios generados en procesos anaerobios que son una gravedad específica de 1.025 y un porcentaje de sólidos secos del 4.0%. Para filtros biológicos, se producen de 60 a 100 kg de sólidos por cada 1000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada. El volumen de lodos se puede estimar como:

$$V_L = \frac{M_s}{\rho_w S_{sl} P_s}$$

(Ecuación 7)

(Metcalf & Eddy, 2003)

En donde:

$V_L$  = volumen de lodos ( $m^3$ )

$M_s$  = masa de sólidos secos (kg)

$\rho_w$  = densidad del agua ( $1000 \text{ kg}/m^3$ )

$S_{sl}$  = gravedad específica de los lodos

$P_s$  = porcentaje de sólidos

En el caso de las lagunas anaerobias de estabilización, Mara y Pearson (1998) indican una dotación de producción de  $0.04 \text{ m}^3/\text{persona-año}$ , a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , para la estimación de la producción de lodos. Además, se menciona que la descarga de los lodos puede hacerse cuando estos ocupen valores cercanos a un tercio del volumen de la laguna. Esto ocurre cada “n” años, dados por:

$$n = \frac{V}{3 * P * s}$$

(Ecuación 8)

(Mara y Pearson, 1998)

En donde:

$V$  = volumen de la laguna,  $m^3$

$P$  = población

$s$  = tasa de acumulación de lodos,  $m^3/\text{persona-a}$

## P. Producción de biogás durante la digestión anaerobia

En un reactor anaeróbico, la pérdida de DQO se debe a la producción de metano, por lo que pueden utilizarse los cambios en este parámetro para estimar la producción de metano. Por estequiometría, se determina el equivalente de DQO del metano, como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar un mol del gas en dióxido de carbono y agua (Metcalf & Eddy, 2003):



Con esta reacción, se deduce que la DQO necesaria por mol de metano es de  $64 \text{ g}$  de  $O_2/\text{mol}$  de  $CH_4$ . A condiciones estándar ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ atm}$ ), esto es equivalente a la producción de  $0.35 \text{ L}$  de

CH<sub>4</sub> por cada gramo de DQO disminuido. El volumen real ocupado por el metano a diferentes condiciones puede estimarse con la ecuación de los gases ideales (Metcalf & Eddy, 2003):

$$V_g = \frac{nRT}{P}$$

(Ecuación 9)

(Metcalf & Eddy, 2003)

En donde:

V<sub>g</sub>= volumen del gas (m<sup>3</sup>)

P = Presión (Pa)

T = Temperatura (K)

n = moles de gas (mol)

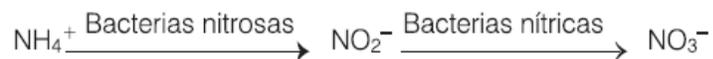
R = constante universal de gases (8314 J/mol K)

El metano producido se encuentra en un porcentaje molar de aproximadamente 65% en el biogás producido. Los otros componentes incluyen en su mayoría dióxido de carbono en alrededor del 35% y menos del 1% de nitrógeno, agua y sulfuro de hidrógeno, entre otros. Los compuestos con azufre, como el sulfuro de hidrógeno, son tóxicos y pueden causar corrosión (Rasi, 2009).

## Q. Nitrificación

Se define como el uso y transformación de amonio a nitratos por medio de microorganismos aerobios que usan el oxígeno disuelto en el agua. Se lleva a cabo en dos etapas, la primera es cuando bacterias nitrificantes usan el amonio para convertirlo en nitritos, luego las bacterias nítricas usan los nitritos para formar nitratos. La nitrificación es efectuada por bacterias autótrofas que usan los iones inorgánicos de carbono (CO<sub>2</sub> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) como fuente de alimentación (Zúñiga, 2005)

Figura 5. Reacción de nitrificación global



Tomado de (Zúñiga, 2005)

A temperatura ambiente entre 15 °C – 25 °C la velocidad de crecimiento de las bacterias nitrooxidantes es considerablemente mayor que la de las amoniooxidantes, por lo que la velocidad de nitrificación se modela usando la conversión de amonio a nitrito como fase limitante (Polo & Torrecillas, 2008).

Es necesaria la operación debido a que el amonio en cuerpos receptores reduce la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, y es tóxico para la vida marina y es una de las causas principales de la eutrofización (Metcalf & Eddy, 2003).

## 1. Microbiología

La nitrificación se da en dos pasos por medio de bacterias autótrofas como se mencionó con anterioridad, en la primera etapa las bacterias responsables de la transformación del amonio a nitrito y posteriormente a nitrato son las *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Otras bacterias que se han encontrado capaces de realizar la reacción son *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* y *Nitrososorbrio*. Siendo las bacterias más comunes en sistemas de lodos activados (Metcalf & Eddy, 2003).

## 2. Cinética de crecimiento

Para sistemas operados a temperaturas menores de 28 °C la cinética de oxidación del amonio y la cinética de oxidación de nitrato son limitantes, por lo que los diseños de sistemas de tratamiento se basan en la cinética de saturación para la oxidación del amonio, asumiendo un exceso de oxígeno disuelto disponible en el agua.

El crecimiento de bacterias nitrificadoras y la nitrificación en general se ve seriamente afectada por la concentración de oxígeno disuelto (DO), en el sistema, el valor óptimo de oxígeno disuelto en el agua para maximizar las tasas de nitrificación se encuentra entre 3 – 4 g/m<sup>3</sup>. (Metcalf & Eddy, 2003)

$$\mu_n = \left( \frac{\mu_{n,m} N}{K_n + N} \right) \left( \frac{DO}{K_o + DO} \right) - k_{dn}$$

(Ecuación 10)

Donde:

$\mu_n$  = Tasa de crecimiento específico de bacterias nitrificadoras expresado en g células nuevas/ g células \*día

$\mu_{n,m}$  = Tasa de crecimiento específico máximo de bacterias nitrificadoras expresado en g células nuevas/ g células \*día

N = Concentración de nitrógeno en el agua residual g/m<sup>3</sup>.

$K_n$  = Constante de velocidad de la concentración de sustrato a la mitad de la tasa máxima de uso, g/m<sup>3</sup>.

$k_{dn}$  = Coeficiente de decaimiento endógeno para organismos nitrificadores, gVSS/gVSS\*día.

DO = Concentración de oxígeno disuelto, g/m<sup>3</sup>

$K_o$  = Coeficiente de saturación media de oxígeno disuelto, g/m<sup>3</sup>.

### 3. Factores ambientales que afectan la nitrificación

La nitrificación es sensible al pH, tienden a decrecer si la concentración de ion hidrógeno en el agua es menor a 6.8. Según la EPA la tasa de nitrificación óptima disminuye entre 10% y 20% al encontrarse en pH entre 5.8-6.0, siendo el valor óptimo en un rango 7.5 a 8.0.

Los organismos nitrificadores son sensibles a un amplio rango de compuestos orgánicos e inorgánicos, tales como solventes orgánicos, aminas, proteínas, taninos, compuestos fenólicos, alcoholes, éteres etc. Debido a la diversidad de compuestos orgánicos e inorgánicos que afectan la nitrificación es necesario realizar un análisis físico químico del agua previo al diseño del sistema (Metcalf & Eddy, 2003).

La dependencia de la temperatura de todas las ecuaciones cinéticas de crecimiento y reacción microbiana es de gran importancia pues define la eficiencia biológica del proceso, ya que influye no solo en el crecimiento sino también en la tasa de transferencia de gas y características de sedimentación de los sólidos biológicos. Para realizar las correcciones por temperatura existen diversos coeficientes experimentales como se listan en la Tabla 11, que deben aplicarse a la siguiente ecuación general:

$$K_T = K_{20} \theta^{(T-20^\circ C)}$$

(Ecuación 11)

Donde:

$K_{T^\circ C}$  = tasa de reacción a la temperatura T °C

$K_{20}$  = Coeficiente obtenido de tabla 1 a 20°C

$\theta$  = coeficiente de actividad dependiente de la temperatura

T = temperatura, °C

Tabla 11 Coeficientes cinéticos de nitrificación a 20°C y sus coeficientes de corrección por temperatura  $\theta$ .

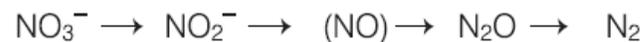
Coeficientes	Unidades	Rango	Valor típico
$\mu_{mn}$	gVSS/ g VSS*día	0.20 - 0.90	0.75
$K_o$	gNH <sub>4</sub> -N/m <sup>3</sup>	0.5 - 1.0	0.74
$Y_n$	gVSS/ gNH <sub>4</sub> -N	0.10 - 0.15	0.12
$k_{dn}$	gVSS/gVSS*día	0.05 - 0.15	0.08
$K_o$	g/m <sup>3</sup>	0.40 - 0.60	0.50
Valores $\theta$			
$\mu_n$	Sin unidades	1.06 - 1.123	1.07
$K_n$	Sin unidades	1.03 - 1.123	1.053
$k_{dn}$	Sin unidades	1.03 - 1.08	1.04

Tomado de (Metcalf & Eddy, 2003)

## R. Desnitrificación

Se conoce como la reducción de las formas oxidadas del nitrógeno a nitrógeno molecular. En este proceso las bacterias aerobias que usan el oxígeno molecular como aceptor de electrones, cambian su metabolismo ante la presencia de nitritos y nitratos utilizándolos como aceptor de electrones, cambiando la reacción como se muestra a continuación:

Figura 6. Reacción de desnitrificación



Tomado de: (Zúñiga, 2005)

En este proceso se utilizan bacterias heterótrofas, por lo que es necesario una fuente de carbono asimilable en condiciones anóxicas para hacer la desnitrificación. (Zúñiga, 2005).

### 1. Cinética de reacción

La cinética de reacción de desnitrificación puede modelarse de la misma manera que la nitrificación utilizando ecuaciones de Monod, depende de las características y naturaleza del efluente a tratar y la configuración a emplear para lograr la remoción de nitrógeno. A diferencia de la nitrificación en la desnitrificación el efecto del pH no tiende a ser muy representativo, sin embargo, en valores por debajo de 6 y mayores a 8 la tasa tiende disminuir debido a que la desnitrificación fomenta la producción de alcalinidad en el agua al remover grandes cantidades de nitrógeno (Environmental Protection Agency, EPA, 1983).

### 2. Efectos del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto puede inhibir la desnitrificación al inhibir la enzima encargada de la reducción del nitrato a nitrógeno molecular. En los flóculos de lodos activados y biopelículas, la desnitrificación puede proceder en presencia de concentraciones de oxígeno disuelto menores a 0.2 g/m<sup>3</sup>, concentraciones mayores han sido reportadas como inhibitorias del proceso (Raboni & Vincenzo, 2014).

## S. Proceso de lodos activados

Método de remoción de nitrógeno que consiste en 3 componentes básicos, el primero es un reactor con microorganismos responsables del tratamiento que se mantienen en suspensión por medio de aireación, un separador de sólidos que regularmente es un tanque de sedimentación, una zona anóxica a la cual se recirculan los sólidos removidos del sedimentador. La parte vital del proceso es la formación de flóculos que puedan ser removidos mediante gravedad.

## 1. Métodos pre anóxicos y post anóxicos

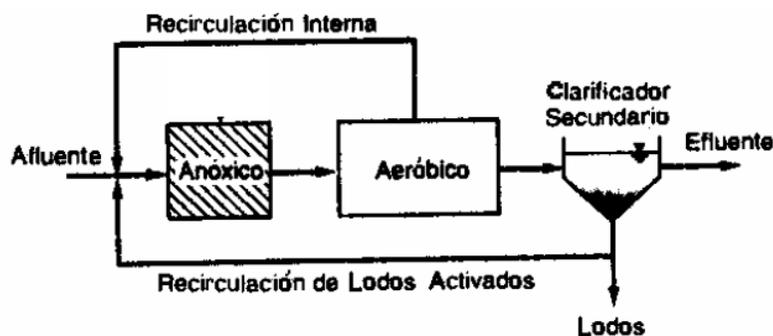
Estos métodos se definen con base en la ubicación en la que se encuentran los tanques anóxicos y aeróbicos en el arreglo dentro de la planta de tratamiento. En los procesos pre anóxicos el tanque anóxico es el que recibe el efluente del tratamiento secundario, que posteriormente pasa al tanque aeróbico; a diferencia del proceso post anóxico donde el tanque aerobio es el que recibe el efluente del tratamiento secundario y luego pasa al tanque anóxico.

Entre las desventajas del arreglo post anóxico se encuentra el uso de sustancias ajenas, como metanol, para aumentar la tasa de desnitrificación, se emplean tiempos de retención mayores, pues la tasa de desnitrificación depende de la respiración endógena de la mezcla nitrificada. Mientras que los procesos pre anóxicos requieren tiempos de retención menores, ahorran energía pues el oxígeno disuelto se remueve antes de la zona aeróbica, se alcaliniza el agua antes de la zona aeróbica brindando mejores condiciones para garantizar la nitrificación, sin agregar compuestos adicionales (Metcalf & Eddy, 2003).

## 2. Proceso Ludzack- Ettinger modificado MLE

Se basa en que el nitrato que se forma en la zona aeróbica es regresado mediante la recirculación de lodos a la zona anóxica. Esto se debe a que la principal alimentación de nitratos es la proveniente de los lodos y la recirculación interna que se maneja de la zona aeróbica a la anóxica. La eficiencia y la velocidad de desnitrificación aumentan al momento de tener una recirculación interna. La relación de recirculación óptima se define como el gasto de recirculación dividido el gasto del agua residual de entrada. El intervalo de gasto de alimentación es de 3 a 4 veces con suficiente DBO en la entrada y tiempo de contacto anóxico. Las relaciones arriba de 4 no garantizan un buen funcionamiento, ya que la remoción de nitrógeno es baja y el oxígeno disuelto recirculado se encuentra en mayores proporciones.

Figura 7 Diagrama del proceso Ludzack-Ettinger Modificado (MLE)



Tomado de: (Arrazola, 2007)

Es el proceso más utilizado para la remoción biológica de nitrógeno. La cantidad de nitrógeno removido está limitado por niveles prácticos de recirculación interna en la zona pre anóxica, el proceso es utilizado generalmente para alcanzar concentraciones de nitrógeno total en el efluente entre 5-10 g/m<sup>3</sup>. El control de oxígeno disuelto debe ser en la zona aeróbica para limitar la cantidad de DO alimentado a la zona anóxica (Arrazola, 2007).

## T. Parámetros de diseño y operación del proceso de lodos activados

Los principales parámetros de operación y diseño de un proceso de lodos activados son el tiempo de retención de sólidos, la tasa de alimentación y cantidad de biomasa (F/M) y la tasa volumétrica de carga orgánica, que se describirán a continuación pues el tiempo de retención es un parámetro básico de diseño, mientras que la tasa de carga volumétrica y la tasa F/M dan valores útiles para las condiciones óptimas de operación.

### 1. Tiempo de retención de sólidos y tasas de alimentación

Representa el tiempo promedio que el lodo permanece en el sistema. Este es el parámetro más crítico para el tratamiento de lodos activados, pues afecta la eficiencia del proceso en el tanque aireado, en la calidad de los lodos y su producción al igual que la cantidad de oxígeno requerido. Un rango de 3 a 15 días es el sugerido por la literatura para tener una nitrificación completa, pues el proceso depende de la temperatura.

$$SRT = \frac{1}{\mu_n}$$

(Ecuación 12)

El factor de seguridad utilizado se basa en el pico de nitrógeno total de Kjeldahl que pueden tener las aguas y el promedio, sin embargo, valores entre 1.3 y 2 son los típicos.

Tasa de alimentación y cantidad de biomasa: se define como la tasa de demanda biológica de oxígeno aplicada por unidad de volumen al licor mixto.

$$\frac{F}{M} = \frac{QS_0}{XV}$$

(Ecuación 13)

Donde:

Q = caudal de entrada al tratamiento en m<sup>3</sup>/d

S<sub>0</sub> = Concentración de entrada de DBO o bsDQO en g/m<sup>3</sup>

V = Volumen del tanque de aireación en m<sup>3</sup>

X = Concentración de biomasa en el tanque de aireación en g/m<sup>3</sup>

Tasa de carga orgánica volumétrica: es la cantidad de demanda biológica de oxígeno aplicada al tanque aireado por día parámetro necesario en el diseño pues estima la cantidad de volumen mínimo requerido para el tratamiento adecuado de las aguas según la carga orgánica que tenga, sin embargo, no es considerado una buena aproximación para la calidad de salida del efluente.

$$L_{org} = \frac{QS_o}{V}$$

(Ecuación 14)

Donde:

$L_{org}$  = carga orgánica volumétrica en kgDBO/m<sup>3</sup>\*día

Q = caudal de entrada al tanque m<sup>3</sup>/día.

S<sub>o</sub> = concentración de entrada de DBO g/m<sup>3</sup>

V = volumen del tanque de aireación, m<sup>3</sup>

## 2. Producción de lodos

Esta parte del diseño es crítica pues una mala estimación puede comprometer el funcionamiento de toda la operación del sistema, pues si las dimensiones del tratamiento de lodos posterior no cubren la cantidad de lodos producidos, el sistema comenzaría a acumularlos en el equipo comprometiendo la calidad del efluente con la posibilidad de no separarse de manera adecuada. La cantidad de lodos producidos son proporcionales a la cantidad de DBO removida y también al volumen del tanque. (Metcalf & Eddy, 2003).

Para determinar de manera teórica la producción de lodos se estima la cantidad a partir de datos teóricos recolectados de plantas existentes, dependiendo de los parámetros de DBO, bCOD, DQO, el crecimiento microbiano, la biomasa de bacterias nitrificadoras y los sólidos volátiles no biodegradables.

$$P_{x,bio} = \frac{QY(S_o - S)}{1 + (k_d)SRT_d} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_o - S)SRT_d}{1 + (k_d)SRT_d} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})SRT_d} + Q(nbVSS)$$

(Ecuación 15)

Donde:

$P_{x,bio}$  = cantidad de lodos producidos por día kg/VSS/día

Q = caudal de entrada al tanque aireado m<sup>3</sup>/día

S<sub>o</sub> = concentración de sustrato en la entrada mg/L

S = Concentración de salida del sustrato mg/L

NO<sub>x</sub> = concentración de NH<sub>4</sub>-N en el flujo de entrada al nitrificador en mg/L

k<sub>dn</sub> = coeficiente de decaimiento endógeno para organismos nitrificadores, gVSS/gVSS\*d

nbVSS = sólidos suspendidos volátiles no biodegradables mg/L

Y = rendimiento de biomasa formada por cantidad de sustrato consumido

Cada término de la ecuación representa un factor a considerar de distintos microorganismos, el primero representa la biomasa formada bacterias heterótrofas, el segundo es para restos celulares, el tercero toma en cuenta la biomasa producida por bacterias nitrificadoras y el último término corresponde a los sólidos suspendidos volátiles no biodegradables en el efluente.

Al seleccionar una concentración de sólidos suspendidos en el licor mixto apropiada para el diseño, se puede determinar el volumen adecuado del tanque de aireación que varía en un rango entre 1200 y 4000 g/m<sup>3</sup>, que a su vez debe ser compatible con las características de diseño del clarificador secundario y las características de sedimentación del lodo.

### 3. Requerimientos de oxígeno

Se le conoce así a la cantidad de oxígeno necesario para llevar a cabo la biodegradación de materia con carbonos, el cual se obtiene a partir de un balance de masa usando la concentración de demanda química de oxígeno biodegradable (bDQO). Debido a que una parte de la concentración de bDQO, se usa dar energía y alimento al crecimiento celular, no se puede asumir que la concentración de bDQO, es oxidada a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y NH<sub>3</sub>.

Esto es cierto para sistemas donde solo se considerará la remoción de DBO como parámetro de diseño, para sistemas donde se incluye la nitrificación la cantidad de NO<sub>x</sub> (concentración de nitrógeno de Kjeldahl) oxidado a nitrato debe considerarse, para obtenerla es necesario realizar un balance de masa de nitrógeno para el sistema para conocer la cantidad de nitrógeno removido por síntesis celular.

$$R_o = Q(S_o - S) - 1.42P_{X,bio} + 4.33Q(NO_x)$$

(Ecuación 16)

Donde:

R<sub>o</sub> = cantidad total de oxígeno requerido, g/d

P<sub>X,bio</sub> = biomasa como SSV (lodos producidos al día) en g/d

Q = Caudal de entrada al sistema m<sup>3</sup>/d

NO<sub>x</sub> = TKN oxidado a nitratos mg/L

#### 4. Características de sedimentación del licor mixto

Al diseñar el clarificador secundario se debe considerar las características de sedimentación de los lodos producidos, este debe ser capaz de poder separar los sólidos del proceso asumiendo datos de otras instalaciones pues no se conocen inicialmente las características de los sólidos producidos en el sistema. Este puede basarse en una zona esperada de sedimentación de lodos determinada a partir de la velocidad de sedimentación. Partiendo de datos teóricos de diseño que indican que el flujo de entrada al clarificador debe estar en un rango de 16 a 28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día y valores de factores de seguridad que se encuentran entre 1.75 y 2.5, como se muestra en la (Ecuación 17).

$$V_i = \frac{(OR)(SF)}{24} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Donde:

OR = flujo de entrada al clarificador m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día

SF = factor de seguridad (adimensional)

#### 5. Consideraciones de diseño de un sistema anóxico / aeróbico

Para sistemas de diseño de teóricos se utiliza la tasa de reducción de nitrato regulado con la concentración de sólidos suspendidos en el licor mixto, que recibe el nombre de la tasa de desnitrificación específica. A partir de estos valores se puede conocer la cantidad de nitrato removido en el tanque anóxico como se expresa en la (Ecuación 18).

$$NO_r = (V_{nox})(SDNR)(MLVSS) \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Donde:

$NO_r$  = nitrato removido g/día

$V_{nox}$  = Volumen del tanque anóxico m<sup>3</sup>

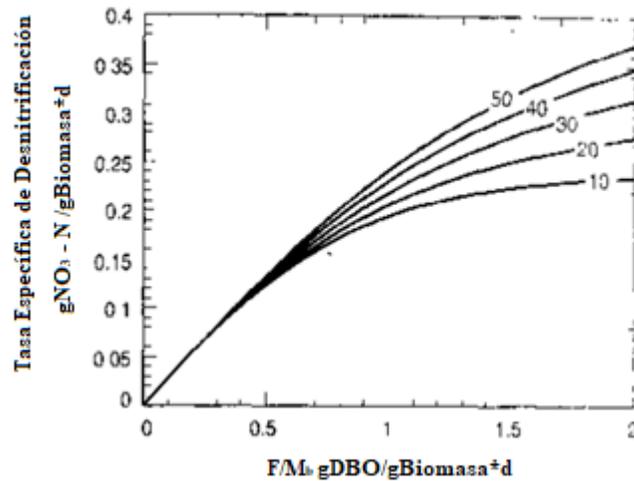
SDNR = tasa de desnitrificación específica gNO<sub>3</sub>-N/gMLVSS\*día

MLVSS = Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto, mg/L

Los valores de SDNR para tanques preanóxicos observados en otros sistemas varían entre 0.04-0.42 gNO<sub>3</sub>-N/gMLVSS\*d, sin embargo, estos valores son bastante conservadores pues para determinar el valor preciso se requieren de muchos datos reales de la planta en operación, como volumen real del tanque, la fracción de biomasa activa en el licor mixto, la concentración de (demanda química de oxígeno fácilmente biodegradable) rbdQO en la zona anóxica y temperatura.

Los valores de SDNR a 20 °C se obtiene a partir de la Figura 8 a distintas relaciones de sustrato microorganismo.

Figura 8. Tasa específica de desnitrificación basada en la concentración de biomasa a 20 °C versus la relación de sustrato microorganismo para varios porcentajes de rbdQO en relación a la bDQO en el agua de entrada.



Tomado de (Metcalf & Eddy, 2003)

En la gráfica demuestra el comportamiento de la tasa de desnitrificación únicamente a 20 °C, varias correlaciones experimentales se han obtenido para corregir este valor a diversas temperaturas como se demuestra en la ((Ecuación 19).

$$SDNR_T = SDNR_{20} \theta^{T-20}$$

(Ecuación 19)

A su vez se debe agregar una segunda corrección según la cantidad de recirculaciones internas realizadas en el sistema ya que a mayores tasas de recirculación la cantidad de rbdQO se diluyen en la zona anóxica resultando en menores tasas de desnitrificación como se observa en las ecuaciones 10 y 11<sup>3</sup>. (Raboni & Vicenzo, 2014)

---

<sup>3</sup> IR representa la cantidad de recirculaciones internas propuestas, y SDNR<sub>r</sub> la lectura realizada en la Figura 7 para una recirculación.

$$IR = 2 \quad SDR_{adj} = SDR_R - 0.0166 \ln\left(\frac{F}{M_b}\right) - 0.0078$$

(Ecuación 20)

$$IR = 3 - 4 \quad SDR_{adj} = SDR_R - 0.029 \ln\left(\frac{F}{M_b}\right) - 0.012$$

(Ecuación 21)

Debido a que las caracterizaciones iniciales del agua residual no suelen ser tan completas se asumen valores de rbdQO entre el 15% al 25% del total de bDQO que puede ser utilizado, siendo un parámetro crítico de diseño para la desnitrificación del agua. (Metcalf & Eddy, 2003)

El número de recirculaciones internas se basa en la cantidad de nitratos producidos en la zona aerobia y la concentración de nitrato que se desea obtener en la salida. Para determinarlo se emplea la (Ecuación 22). A mayores cantidades de nitrato producido mayores tasas de recirculación interna son necesarias para satisfacer y lograr la desnitrificación, sin embargo, una tasa de recirculación normal se da entre 3 y 4 veces, tasas mayores no están garantizadas pues al incrementar las recirculaciones incrementa la cantidad de oxígeno disuelto agregado al tanque anóxico inhibiendo la reacción (Ollero, 2015).

## U. Sistemas de aireación

### 1. Transferencia de oxígeno

La forma en que se transfiere de una fase gaseosa a una fase líquida el oxígeno es una parte vital en el proceso de lodos activados para su procesamiento. Debido a la baja solubilidad y la baja transferencia de oxígeno, el tratamiento aeróbico no entra el agua de una manera convencional, se deben formar más interfaces, para formar gotas que puedan estar expuestas a la atmósfera. Existen diversas formas de inducción de aire al agua, sin embargo, el más empleado es el sistema de dispersión de burbujas de aire desde la profundidad del tanque.

Para determinar la cantidad de oxígeno requerido en el sistema se deben aplicar factores de corrección por transferencia de oxígeno en el agua, por la geometría del tanque, salinidad del agua, temperatura, elevación y profundidad de difusión si el tipo de aplicación fuera a darse por medio de difusores, como se observa en las ecuaciones 22 y 23.

$$SOTR = AOTR \left[ \frac{C_{s,20}}{\alpha F (\beta C_{i,TH} - C)} \right] (\theta^{T_{a20} - T})$$

(Ecuación 22)

$$C_{s,TH} = \frac{1}{2} (C_{s,TH}) \left( \frac{P_d}{P_{atm}} + \frac{O_2}{21} \right)$$

(Ecuación 23)

Donde:

SOTR = Tasa de transferencia de oxígeno en agua de grifo a 20°C y cero oxígeno disuelto en kg O<sub>2</sub>/h.

$C_{i,TH}$  = oxígeno disuelto saturado promedio en agua limpia dentro del tanque de aireación a la temperatura T y elevación H en mg/L.

AOTR = Tasa actual de oxígeno requerida a condiciones de campo en Kg O<sub>2</sub>/h.

$C_{s,20}$  = Concentración en agua limpia a 20°C de oxígeno disuelto saturado.

$\alpha$  = corrección por ensuciamiento en la transferencia de oxígeno.

$P_d$  = Presión en la profundidad del tanque donde se libera el aire kPa.

$F$  = factor de ensuciamiento 0.65- 0.9

## 2. Aireación mediante difusión de aire

Los dos métodos de airear aguas residuales son, ingresar aire utilizando difusores sumergidos u otro sistema de aireación, o agitar para obtener aireación mecánica y que el aire de la atmósfera ingrese al agua. Los difusores de aire se clasifican según sus propiedades constructivas y forma de difusión de aire se encuentran los difusores de poro fino, difusores no porosos, aireadores tipo jet y aireadores en tubos U.

Los difusores de poro son los más comunes y se montan sobre manifolds de aire que deben estar instalados a lo largo de todo el tanque, su construcción puede ser plástica, de cerámica rígida o plástico flexible. Los difusores de cerámica tienen la particularidad que al ingresar el aire a través de la superficie porosa la tensión y el flujo de aire interactúan de tal forma que produce burbujas finas, entre los requerimientos de diseño para estos sistemas es que el aire que ingresa sea libre de polvo, dependiendo del tipo de instalación y lugar se colocan filtros en la succión del aire para prevenir el ensuciamiento prematuro de los difusores en el sistema (Metcalf & Eddy, 2003).

## 3. Eficiencia de los difusores de burbuja

Tabla 12 Eficiencias de distintos tipos de difusores de burbuja a 4.5 m de profundidad

Tipo de difusor	Flujo de aire ft <sup>3</sup> /min	Flujo de aire m <sup>3</sup> /min	SOTE % a 4.5m de profundidad (1.5ft)
Discos de cerámica	0.6-3.4	0.01-0.1	25-35
Domos de cerámica	0.5-2.5	0.015-0.07	27-37
Platos de cerámica	2.0-5.0	0.6-0.5	26-33

Tomado de: (Metcalf & Eddy, 2003)

## 4. Sopladores

Existen tres tipos de sopladores utilizados para los sistemas de aireación, centrífugos, desplazamiento positivo con lóbulos rotatorios y difusores de paleta con guía de entrada. Los sopladores centrífugos son los más usados con capacidades mayores a 425 m<sup>3</sup>/min de aire libre, con presiones de descarga de 48 a 62 Pa. Los sopladores deben dar un rango variado de flujos de aire con un rango de presión relativamente cercano. En aplicaciones donde la presión es mayor a 55 Pa y la capacidad es menor a 425 m<sup>3</sup>/min de aire libre, se utilizan sopladores de desplazamiento positivo con lóbulos rotatorios. El control de la capacidad se realiza variando la presión. Estas unidades no pueden estrangularse, por lo que el control de capacidad se obtiene usando varias unidades o un variador de velocidad. Una entrada robusta y silenciadores de salida son esenciales (Metcalf & Eddy, 2003).

## 5. Consideraciones de diseño de un sistema de aire comprimido

El diseño de tubería de aire incluye accesorios, válvulas, manómetros y otras uniones para transportar el aire comprimido desde el compresor hasta los difusores. La tubería debe seleccionarse en base a las caídas de presión de los difusores, uniones y accesorios.

Para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías de aire comprimido se utiliza la relación de las ecuaciones 24, 25 y 26.

$$h_L = 9.82 \times 10^{-8} \left( \frac{fLTQ^2}{PD} \right)$$

(Ecuación 24)

$$f = \frac{0.029(D)^{0.027}}{Q^{0.148}}$$

(Ecuación 25)

$$T = T_o \left( \frac{P}{P_o} \right)^{0.283}$$

(Ecuación 26)

Donde:

P = presión de entrada del aire, atm

Q = flujo de entrada en m<sup>3</sup>/min a las condiciones de presión y temperatura

T = Temperatura en la tubería, K

f = factor de fricción para tuberías de acero

T<sub>o</sub> = Temperatura ambiente del aire, K

P<sub>o</sub> = Presión barométrica a la temperatura ambiente, atm

Todas las pérdidas por fricción de accesorios se cuantifican en términos de longitud equivalente de tubería al multiplicar el factor de resistencia de cada accesorio por la cantidad de accesorios según la ecuación 18.

$$L = 55.4 CD^{1.2}$$

(Ecuación 27)

Donde:

C = factor de resistencia (ver tabla)

D = diámetro de tubería, (m)

L = longitud equivalente de tubería, (m)

## V. Sistema de clarificación secundario

La sedimentación es una operación unitaria basada en el fenómeno de desplazamiento de fases particuladas en un medio fluido, implicando un mecanismo de transferencia de cantidad de movimiento por flujo viscoso. El objetivo principal es separar un material denso de la suspensión que le da turbidez al líquido, recuperando el solvente en la mayor cantidad y lo más cristalino posible. Una sedimentación secundaria se da en aquellas suspensiones en las que por la estabilidad del proceso la cinética sea muy lenta y haya de recurrirse a procedimientos auxiliares de tipo físico, químico o biológico. (Fayed & Otten, 1997)

### 1. Tipos de clarificadores secundarios

Sedimentadores dinámicos, combinan el mecanismo de sedimentación con sistemas de movilización del sedimento por flujo continuo con el fin de producir efectos complementarios de arrastre o de filtración de sobrenadantes, de asentamiento o de recirculación de este, en condiciones de baja carga externa.

Sedimentadores estáticos realizan su funcionamiento mediante sedimentación gravitacional, se sedimentan por superficie libre o por barrido. Los sedimentadores por superficie libre no tienen un sistema específico de acarreamiento de sedimentos para retirar los sólidos, por lo que son pequeños y se emplean en aguas poco cargadas de sólidos. Los sedimentadores con barrido de sólidos depositados son retirados del tanque por algún medio mecánico o hidráulico consiguiéndose un mayor espesamiento de los lodos.

Los clarificadores circulares, son sedimentadores por gravedad, que se clasifican en dos tipos: los de alimentación central y los de alimentación periférica, los cuales a su vez se clasifican según el tipo de mecanismo de succión que son de extracción mediante bombeo o por altura estática. (Gutiérrez & Bueno de las Heras, s.f.)

## 2. Tipos de sedimentación

Coalescente o difusa: es aquella en la cual las partículas interfieren entre ellas y la velocidad de sedimentación depende de la concentración, tamaño y características superficiales de las partículas, esta es la forma en la que ocurre la sedimentación primaria.

Masiva o impedida: es aquella en la que las partículas interaccionan entre ellas logrando que sus posiciones se mantengan fijas, unas respecto a las otras logrando sedimentar las partículas en conjunto. Este es el modelo típico de sedimentación secundaria.

Compresión o espesamiento: esta ocurre cuando la interacción entre las partículas es total, no sólo son soportadas de forma hidráulica, sino que también por otras partículas produciendo reducciones de volumen debidas a la evacuación de fluido ocluido. Estas son las formas de sedimentación en espesadores. (Porter & Raynor, 1966)

## 3. Nivel y descarga de lodos

Las características de sedimentación de lodos varían temporalmente debido a los cambios en la cantidad y peso de los sólidos suspendidos, es por esto que surge la necesidad de adoptar criterios conservadores que eviten el escape ocasional de sólidos en el efluente. Para tener criterios acertados de diseño las cargas superficiales deben calcularse dividiendo el flujo del caudal de entrada entre la superficie del tanque como se muestra a continuación:

$$\text{área} = \frac{Q}{\text{carga volumétrica}}$$

(Ecuación 28)

Para determinar la carga de sólidos y ver que sea la adecuada para el área calculada según parámetros de diseño establecidos, se utiliza la siguiente relación:

$$\text{carga de sólidos} = \frac{(1 + R)(MLSS)}{A}$$

(Ecuación 29)

Los valores aceptables en relación al caudal de entrada al clarificador son entre 4 y 6 kg/m<sup>2</sup>d. (Metcalf & Eddy, 2003)

Según mediciones realizadas experimentalmente se determinó que el ángulo de deslizamiento de lodos para clarificadores secundarios se encuentra entre 35° y 60° sobre la horizontal, por encima de 60° disminuye la eficacia del clarificador y por debajo de los 35° el lodo se acumula en el fondo y juntas del clarificador. (Gutiérrez & Bueno de las Heras, s.f.)

## W. Bombas

En muchas ocasiones los líquidos se trasladan de un lugar a otro por gravedad, desde tanques elevados o desde sopladores, que son recipientes de almacenamiento presurizados por una fuente externa de gas comprimido, no obstante, cuando el fluido se encuentra al mismo nivel o debe ser enviado a otro recipiente de mayor elevación a través de tuberías o canales de conducción se requiere de bombas ya que estas incrementan la energía mecánica del líquido, aumentando su velocidad presión o elevación. Estas se dividen en dos grandes ramas, las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo.

### 1. Bombas centrífugas

Son aquellas que generan altas velocidades de rotación, entonces convierten la energía cinética en resultante del líquido en energía de presión.

Las bombas típicamente se instalan en una tubería de conducción donde suministra la energía necesaria para realizar la succión del fluido de un tanque de almacenamiento y descargarlo con una velocidad volumétrica de flujo constante al final de la tubería. A este proceso se le conoce como la carga desarrollada por la bomba ( $W_p$ ) y puede calcularse mediante la ecuación de Bernoulli.<sup>4</sup>

### 2. NPSH

La potencia depende de la diferencia de presión entre la descarga y la succión de la bomba siendo independiente del nivel de presión sea superior o inferior a la presión atmosférica, siempre que el fluido permanezca líquido, sin embargo, si una pequeña parte del líquido se convierte en gas dentro de la bomba esta cavitará. Se conoce como fenómeno de cavitación cuando la presión de succión es menor que la presión del vapor se vaporizará el líquido en la línea de succión reduciendo considerablemente la capacidad de la bomba (McCabe & Smith, 2007).

Para evitar la cavitación es preciso que la presión de entrada de la bomba exceda la presión de vapor en un valor representativo que se conoce como la carga neta de succión positiva (NPSH) la cual puede ser calculada como se presenta a continuación:

$$NPSH = \frac{1}{g} \left( \frac{p_a - p_v}{\rho} - h_{fs} \right) - z_a$$

(Ecuación 30)

---

<sup>4</sup> Definida en la sección de tubería y accesorios del marco teórico.

Donde:

$P_a$  = presión absoluta en la superficie del depósito

$P_v$  = presión de vapor

$h_{fs}$  = fricción en la línea de succión

### 3. Bombas de desplazamiento positivo

Son las bombas que aplican presión directamente al líquido por un pistón o por miembros rotatorios, que van formando cámaras alternas llenas o vacías de líquido. En estas bombas el líquido no cambia en forma apreciable y se puede considerar constante. Un volumen determinado de líquido es encerrado en una cámara la cual se llena desde la entrada y se vacía a una presión más alta a través de la descarga.

Se dividen en dos subclases, las bombas reciprocantes y rotatorias donde la cámara se mueve desde la entrada hasta la descarga y regresa de nuevo a la entrada. Las bombas reciprocantes son aquellas en las cuales el líquido pasa a través de una válvula de retención de entrada al interior del cilindro y mediante un pistón es obligado a salir por una válvula de retención de descarga en el recorrido de regreso. La presión máxima para una bomba de pistón es de 50 atm. Para presiones más elevadas se usan bombas de émbolo, 1500 atm para bombas de émbolo y 100 atm o más para bombas de diafragma.

Las bombas rotatorias no contienen válvulas de retención, cuanto menor sea la tolerancia entre las partes móviles y las estacionarias, menor probabilidad de fugas desde el espacio de la descarga hacia el espacio de la succión, limitando la velocidad de operación, estas bombas operan de mejor manera con fluidos limpios y moderadamente viscosos con presiones de operación superiores a 200 atm. (McCabe & Smith, 2007)

## X. Tuberías y accesorios

### 1. Ecuación de Bernoulli

Según la ecuación de continuidad la rapidez de flujo de un fluido puede variar a lo largo de las trayectorias de un fluido, al igual que la presión dependiendo de la altura donde se encuentre. La ecuación de Bernoulli relaciona la presión, rapidez de flujo y altura para el flujo de un fluido ideal incompresible.

$$\eta W_p = \left( \frac{P_b}{\rho} + gZ_b + \frac{\alpha_b \bar{V}_b^2}{2} \right) - \left( \frac{P_a}{\rho} + gZ_a + \frac{\alpha_a \bar{V}_a^2}{2} \right)$$

(Ecuación 31)

La ecuación de Bernoulli dice que el trabajo efectuado sobre una unidad de volumen del fluido por el fluido circundante es igual a la suma de los cambios de la energía cinética y potencial por unidad de volumen que ocurren durante el flujo. (Young & Freedman, 2013)

## 2. Pérdidas por fricción por expansión, contracción y accesorios

La rugosidad en las tuberías conduce a un factor de fricción mayor que la tubería lisa para un determinado número de Reynolds, en flujos laminares la rugosidad no ejerce un efecto apreciable sobre el factor de fricción. Para fines de diseño las características de fricción para tuberías rugosas están resumidas en una carta gráfica del factor de fricción<sup>5</sup>.

Las pérdidas por fricción debido a la expansión súbita de la sección transversal se dan cuando la corriente del fluido se separa de la pared y se proyecta en forma de un torrente en la sección expandida creando un vórtice en el espacio vacío entre la pared y el torrente, que es un efecto característico de la expansión de la capa límite logrando una fricción considerable. Estas pérdidas se definen según la siguiente ecuación:

$$h_{fe} = K_e \frac{\bar{V}_a^2}{2}$$

(Ecuación 32)

$$K_e = \left(1 - \frac{S_a}{S_b}\right)^2$$

(Ecuación 33)

Donde:

$K_e$  = coeficiente de pérdidas por expansión

$\bar{V}_a$  = Velocidad media en la parte estrecha del conducto

$S_a$  = sección transversal estrecha

$S_b$  = sección transversal expandida

Las pérdidas por fricción debidas a una contracción súbita de la sección transversal ocurren debido a que el flujo no puede adaptarse al borde pronunciado y la corriente pierde contacto con la pared del conducto formando un torrente que se proyecta en la parte interior del fluido estancado,

---

<sup>5</sup> Diagrama de Moody Figura 131 en anexos.

creando que el torrente primero estancado luego se expanda nuevamente hacia las paredes de la nueva sección, formando vórtices a la salida de la contracción.

$$h_{fc} = K_c \left( \frac{\bar{V}_b^2}{2} \right)$$

(Ecuación 34)

$$K_c = 0.4 \left( 1 - \frac{S_b}{S_a} \right)$$

(Ecuación 35)

Los accesorios que se colocan a lo largo de todo el tramo de tubería aumentan la caída de presión de la tubería se calcula de manera similar a la (Ecuación 33), con la variante que cada accesorio posee su propio factor de caída de presión (McCabe & Smith, 2007).

### 3. Velocidades de flujo según el tipo de fluido dentro de tubería

Tabla 13 Velocidades típicas de flujo y caída de presión de líquidos en tuberías.

Tipo líquido	Velocidad m/s	$\Delta P$ kPa/m
Líquido, bombeado no viscoso	1 – 3	0.5
Líquido, flujo gravitacional	-	0.05
Gases y Vapores	15 – 30	0.02% en línea de presión
Vapor de alta presión >8 bar	30 – 60	-

Tomado de (Towler & Sinnott, 2008)

Tabla 14 Velocidades típicas de flujo para aire comprimido en tuberías varían según el diámetro de tubería a utilizar

Diámetro de tubería m (in)	Velocidad (m/min)
0.0254- 0.0762 (1-3)	360-540
0.1016- 0.254 (4-10)	540-900
0.3048-0.6096 (12-24)	800-1200
0.762-1.524 (30-60)	1100-2000

Tomado de (Metcalf & Eddy, 2003)

## Y. Pérdidas por evaporación de un tanque abierto

Para determinar las pérdidas por evaporación de tanques abiertos considerando las condiciones climáticas de la región donde se encuentra se utiliza la ecuación de Penman que relaciona la temperatura ambiente, con la altitud a la que se encuentra y la temperatura del punto de rocío del lugar (Linacre, 1977).

$$E_0 = \frac{\frac{700T_m}{100-A} + 15(T - T_d)}{80 - T}$$

(Ecuación 36)

Esta fórmula es empleada para relacionar la evaporación de superficies abiertas con récords climatológicos conocidos, sin embargo, no es utilizada en lagos y mares debido a que no toma en cuenta el calor almacenado en el agua en función de la profundidad del tanque. Y tiene una variabilidad en la tasa de evaporación cuando los cuerpos de agua exceden el metro de profundidad pues el calor almacenado en el agua aumenta en primavera y se reduce en invierno. Para corregir este error la temperatura ingresada en la ecuación debe ser medida como una función de la profundidad (Monteith, 1981).

## Z. Desinfección

Lo que se busca en un proceso de desinfección es destruir parcialmente los organismos causantes de enfermedades, como bacterias y protozoos. Se diferencia de los procesos de esterilización en que estos últimos logran la destrucción total de los organismos, mientras la desinfección destruye las formas no vegetativas (no formadores de endosporas) de los patógenos (Metcalf & Eddy, 2014). En el presente trabajo en ocasiones será llamado tratamiento cuaternario, por el orden de los sistemas propuestos para la planta de tratamiento diseñada.

Se han propuesto cinco mecanismos distintos para explicar el funcionamiento de los desinfectantes: destrucción de la pared celular, alteración de la permeabilidad celular, modificación de la naturaleza coloidal del protoplasma, alteración del ADN o ARN del organismo, e inhibición de la actividad enzimática. La destrucción de la pared celular produce la lisis de la célula, provocando su muerte. El alterar la permeabilidad de la membrana genera el escape de nitrógeno y fósforo, nutrientes vitales para los organismos (Metcalf & Eddy, 2014). La alteración del protoplasma es causada por calor, ácidos o bases, que pueden desnaturalizar las proteínas. Al perder su estructura tridimensional pierden sus propiedades funcionales, que son necesarias para las actividades celulares. Esto se relaciona de igual forma con la inactivación de enzimas. Por último, dañar los ácidos nucleicos también resulta letal para los microorganismos. El ADN y ARN portan

la información genética de la célula, por lo que ya no pueden replicarse ni realizar funciones metabólicas normales, como la síntesis de enzimas (Tortora, 2007)

## AA. Desinfectantes

Alrededor del mundo se utilizan distintos desinfectantes para lograr reducir la concentración de patógenos. La siguiente tabla muestra las características que posee un desinfectante ideal. No es posible encontrar un desinfectante que cumpla con todas ellas, pero resulta útil al momento de comparar y evaluar las distintas propuestas.

Tabla 15. Características de un buen desinfectante

Disponibilidad	Debe estar disponible en grandes cantidades a un precio razonable
Desodorizante	Capacidad de desodorizar durante la desinfección
Homogeneidad	La solución debe ser uniforme en composición
Interacción con material extraño	No debe ser absorbido por materia orgánica u otros compuestos que no sean los microorganismos
No corrosivo	No debe corroer el material utilizado para su transporte y almacenamiento
No tóxico para formas superiores de vida	Debe ser tóxico para los microorganismos y no tóxico para humanos y otros animales
Penetración	Debe ser capaz de penetrar superficies
Seguridad	Debe ser seguro de transportar, almacenar, manejar y utilizar
Solubilidad	Debe ser soluble en agua o en el tejido celular
Estabilidad	No debe perder su capacidad germicida durante el tiempo
Tóxico para los microorganismos	Debe ser efectivo a diluciones altas
Tóxico a temperatura ambiente	Debe ser efectivo a temperatura ambiente

Tomado de: (Metcalf & Eddy, 2014)

### 1. Cloro

El cloro es el químico desinfectante más utilizado. A temperatura y presión ordinarias, el cloro molecular ( $\text{Cl}_2$ ) es un gas compresible de color amarillo verdoso, 2.5 veces más pesado que el aire, por lo que se acumula en los lugares bajos. Al comprimirlo a alta presión y baja temperatura, se vuelve un líquido de color ámbar, 1.5 veces más pesado que el agua. Durante su vaporización sufre una expansión volumétrica del 450 %. Es moderadamente soluble en agua, con un valor máximo de 1 g/100 mL a los 50 °C (Metcalf & Eddy, 2014).

A pesar de su amplio uso en sistemas de potabilización y de tratamiento de aguas residuales, existen riesgos que han limitado su uso. El cloro es una sustancia altamente tóxica, lo que representa un riesgo de salud para los operadores, y para el público en general al momento de cualquier accidente durante el transporte. Al inhalarlo causa daños en las vías respiratorias, sobre todo cuando proviene de una solución acuosa. La humedad que acompaña al gas de cloro lo hace parecer más tolerable, y la víctima inhalará una gran cantidad. Esto le puede llegar a producir un edema pulmonar, y en última instancia la muerte. Debido a esto, se han creado normativas con las medidas necesarias para contener y neutralizar cualquier incidente (White, 2010).

Cuando se inyecta en el agua, se disuelve y reacciona rápidamente para formar ácido hipocloroso y ácido clorhídrico.



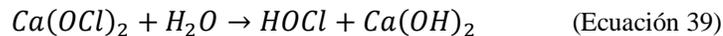
#### a. Hipoclorito de sodio

El hipoclorito de sodio (NaOCl) se utiliza en el proceso de desinfección para eliminar los riesgos que supone transportar, almacenar y utilizar cloro líquido/gaseoso en una instalación. En el mercado se encuentra únicamente en solución, que contiene entre el 10 y 17 % de cloro activo al momento de su producción. Cuando se expone a la luz y calor se descompone con facilidad, lo cual debe tomarse en cuenta al momento de su almacenamiento (Metcalf & Eddy, 2014).



#### b. Hipoclorito de calcio

El hipoclorito de calcio [Ca(OCl)<sub>2</sub>] se suele encontrar como polvo, tabletas comprimidas o pellets. Posee una solubilidad en agua de 21.5 g/100 mL a 0°C y 23.4 g/100 mL a 40 °C. Se debe almacenar en lugares secos dentro de contenedores resistentes a la corrosión, lejos de otros químicos debido a su poder oxidante (Metcalf & Eddy, 2014)



## 2. Ozono

El ozono es un gas de color azul a temperatura ambiente con un olor distintivo. Posee mayor estabilidad en el aire que en agua, pero en ambos se encuentra en el orden de minutos. Su inestabilidad hace necesaria su producción en el sitio para poder ser utilizado como desinfectante. El método más utilizado para su producción es por medio de descargas eléctricas. Al ser sometido a por un pulso de alta energía el doble enlace del oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) se rompe en oxígeno atómico y estos se recombinan para formar la molécula de ozono (Metcalf & Eddy, 2014).

### 3. Dióxido de cloro

El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) es un fuerte oxidante, por lo que posee un gran poder desinfectante. Posee una mayor capacidad de inactivación de virus en comparación al cloro. A condiciones atmosféricas es un gas inestable con una alta gravedad específica. Es irritante, de color amarillo rojizo, y de un olor desagradable. Se genera en el sitio previo a su uso como desinfectante debido a su inestabilidad. Se obtiene a partir de la reacción entre una solución de cloro en agua, con una solución de clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ). Este último se almacena en lugares fríos en forma líquida al 25%. La química del dióxido de cloro en agua no se comprende del todo por lo que, al no formarse cloro libre, el poder oxidante de este compuesto se conoce como cloro disponible equivalente. En números, el poder oxidante del  $\text{ClO}_2$  es 2.63 veces el del cloro (Metcalf & Eddy, 2014).

### 4. Radiación UV

La luz UV posee una longitud de onda menor a la luz visible y mayor a la de los rayos X, por lo que se encuentra entre los 100 y 400 nm, aproximadamente. Esta región del espectro electromagnético es efectiva como germicida entre los 200 y 315 nm, en donde la longitud óptima es 254 nm. A estas longitudes de onda la radiación penetra la pared celular de los organismos y el ADN y ARN la absorben. Esto dificulta la duplicación al distorsionar la estructura helicoidal. Una célula se considera inactiva cuando es incapaz de duplicarse (Comisión Nacional del Agua, 2016).

La radiación UV fue abandonada como método de desinfección por sus altos costos de operación y los problemas que presentaba con relación al mantenimiento y disponibilidad de los equipos. Sin embargo, ha ganado popularidad por el surgimiento de reglamentaciones que establecen límites en la concentración de cloro residual que genera la cloración. Comparada con esta sus tiempos de contacto son más cortos, reduciendo el tamaño de los tanques de tratamiento. Las lámparas que utilizan deben recibir un mantenimiento constante para evitar el ensuciamiento sobre su superficie, disminuyendo la radiación absorbida por los microorganismos, y poseen una vida útil de 8000 horas, aproximadamente (Comisión Nacional del Agua, 2016).

### 5. Ácido peracético

En la búsqueda métodos alternativos se han propuesto otros químicos desinfectantes que puedan ser efectivos sin la formación de otros subproductos, por lo que ha surgido la opción de utilizar ácido peracético, que se encuentra comercialmente y ha demostrado potencial en la desinfección de aguas residuales. Para la inactivación de los microorganismos actúa directamente sobre la pared celular, destruyéndola. Es el producto de la reacción entre ácido acético y peróxido de hidrógeno. Durante su uso se descompone y forma ácido acético y oxígeno, por lo que se observa un aumento de la DBO y DQO presente en el efluente del proceso de desinfección. Estudios recientes indican que una concentración mayor a 2 mg/L de ácido peracético puede resultar tóxico para ecosistemas acuáticos (Collivignarelli, Abba, Benigna, Sorlini, & Torretta, 2018).

Tabla 16. Ventajas y desventajas entre las tecnologías convencionales para la reducción de patógenos.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Cloro	Económico, concentración residual, tecnología consolidada	Alto tiempo de contacto, formación de productos secundarios, corrosivo, tóxico
Dióxido de cloro	Más efectivo que el cloro en tiempos de contacto cortos	Generación en el sitio, formación de productos secundarios, toxicidad residual para el efluente, incrementa la concentración de sólidos del efluente
Ozono	Tiempos de contacto cortos	Generación en el sitio, no existe una concentración residual, formación de productos secundarios, alta demanda energética
Ácido peracético	Concentración residual para evitar la reactivación de microorganismos	Incrementa la DBO y DQO del efluente, formación de subproductos secundarios
Radiación UV	No se forman productos secundarios, periodos cortos de contacto.	Alta demanda energética, alto costo, no es útil en agua con alto nivel de turbiedad.

Tomado de: (Collivignarelli, Abba, Benigna, Sorlini, & Torretta, 2018)

Tabla 17. Condiciones operativas para las tecnologías convencionales de desinfección

Tecnología	Cloro gas	NaOCl	Dióxido de cloro	Ozono	Ácido peracético	Radiación UV
Producción y almacenamiento	Simple	Simple	Complejo	Complejo	Simple	-
Mantenimiento	Bajo	Bajo	Moderado	Frecuente	Moderado	Frecuente
Competencia operadores/ riesgo	Alto	Bajo	Medio	Alto	Alto	Alto

Tomado de: (Collivignarelli, Abba, Benigna, Sorlini, & Torretta, 2018)

Tabla 18. Diamantes de materiales peligrosos de los distintos desinfectantes

Desinfectante	Diamante NFPA 704	Desinfectante	Diamante NFPA 704
Cloro gas		Dióxido de cloro	
Hipoclorito de sodio		Ozono	
Hipoclorito de calcio		Ácido peracético	

Tomado de: (National Fire Protection Association, 2017)

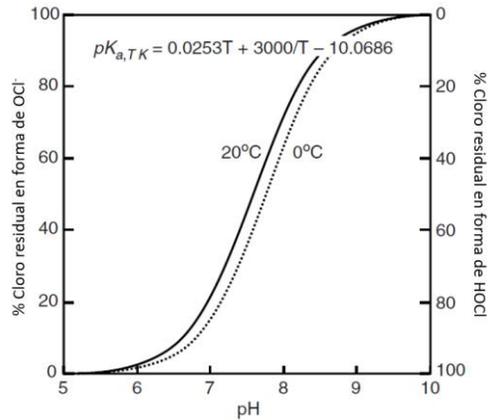
## BB. Desinfección por cloración

El cloro gaseoso, hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio, al reaccionar con agua forman ácido hipocloroso, y este se ioniza para formar ion hipoclorito (**Barrenechea & de Vargas, 2004**).



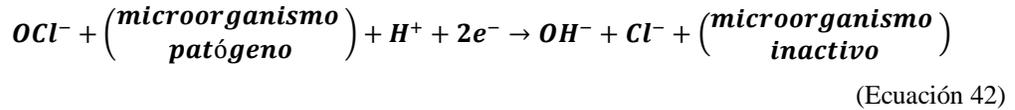
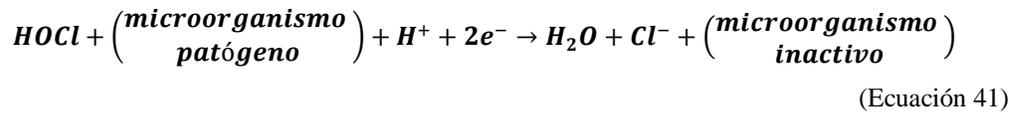
A la suma de HOCl y OCl<sup>-</sup> presente en el agua se le conoce como cloro libre. El ácido hipocloroso posee una eficiencia de desinfección, en promedio, 60 veces mayor que la eficiencia que posee el ion hipoclorito. La especie en la que se encontrará el cloro depende del pH. Por ejemplo, en la Figura 1. vemos que a un pH menor a 7.5 predomina el HOCl, pero a pH mayores de 7.5 predomina el OCl<sup>-</sup> (**Barrenechea & de Vargas, 2004**). Estudios recientes indican que una concentración mayor de 0.18 mg/L de cloro libre resulta tóxica para los ecosistemas acuáticos (**Collivignarelli, Abba, Benigna, Sorlini, & Torretta, 2018**).

Figura 9. Porcentaje de HOCl y OCl<sup>-</sup> para distintos valores de pH



Tomado de: (Howe, Hand, Crittenden, Trussell, & Tchobanoglous, 2012)

Tanto el ácido hipocloroso como el ion hipoclorito son agentes oxidantes. Los microorganismos son desactivados, mientras la especie clorada se convierte en ion cloruro.



Uno de los componentes frecuentes en el agua es el amoníaco, que forma monocloraminas, dicloraminas y tricloraminas al reaccionar con cloro. A estas se les conoce como cloro combinado, y poseen un pobre efecto desinfectante. El cloro también reacciona con las sustancias orgánicas proteicas, aminoácidos, hierro, manganeso, entre otros componentes que se encuentran en el agua. Estos compuestos no tienen capacidad desinfectante, por lo que se le conoce como demanda de cloro (Barrenechea & de Vargas, 2004).

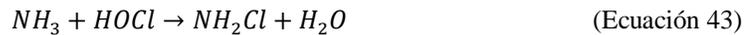
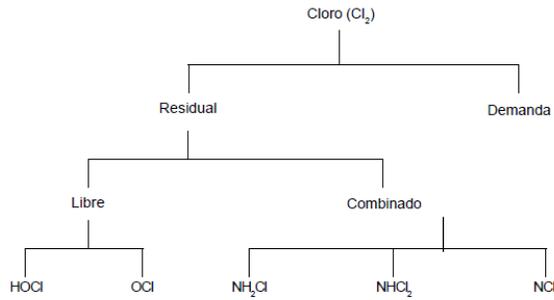


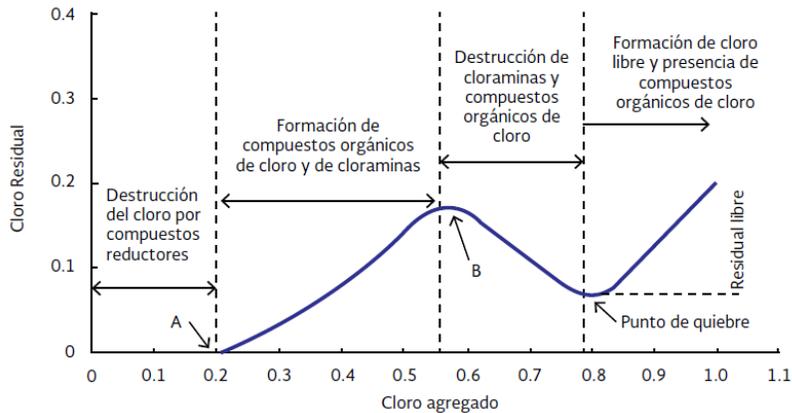
Figura 10. Formas importantes de cloro durante la cloración del agua



Tomado de: **(Barrenechea & de Vargas, 2004)**

Durante una cloración, el cloro total disponible se da como una función de la dosis de cloro y se define como la suma del cloro libre y el cloro combinado. Ya que el cloro libre requiere una dosis menor y un tiempo de contacto también menor, se recomienda clorar al punto de quiebre cuando las aguas están muy contaminadas **(Barrenechea & de Vargas, 2004)**.

Figura 11. Curva generalizada para el punto de quiebre en un proceso de cloración



Tomado de: **(Comisión Nacional del Agua, 2016)**

## CC. Parámetros de diseño para un sistema de desinfección por cloración

### 1. Dosis de cloro libre

Para estimar la dosis de cloro que debe agregarse al agua es indispensable tener presente la cantidad de organismos patógenos que se desea destruir, el organismo índice que determinará la eficiencia del proceso de desinfección, y la clase de desinfectante que se forma en base al pH y contenido de materia orgánica. Si se añade poco cloro, este se oxidará rápidamente con agentes reductores inorgánicos, como sales de hierro, y compuestos orgánicos, formando productos que no

poseen capacidad desinfectante. Si se añade suficiente cloro para que reaccione con los compuestos mencionados, el cloro reaccionará con el amoníaco y se tendrán compuestos con poca capacidad desinfectante. Por lo tanto, debe añadirse cloro suficiente para que pueda existir en forma de cloro libre e inactivar los patógenos. Para determinar la dosis necesaria se parte de modelos cinéticos que involucren la inactivación de los microorganismos, como la ley de Chick - Watson y el modelo de Selleck Collins, y se considera la disminución de la concentración de cloro durante el proceso de desinfección (Arboleda, 2000).

a. Cinética para el proceso de desinfección

La ley de Chick – Watson es el modelo más sencillo que describe el proceso de desinfección a lo largo del tiempo. Relaciona el tiempo de contacto y la concentración de desinfectante con la razón de microorganismos sobrevivientes. Parte de la cinética de una reacción de primer orden y la constante empírica  $n$  indica cuál de los dos factores antes mencionados tiene mayor impacto en el proceso. Si  $n$  es igual a 1 ambos poseen la misma importancia, si  $n$  es mayor a 1 el factor más importante es la concentración, y si  $n$  es menor a 1 el factor más importante es el tiempo de contacto.

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kC^n t$$

(Ecuación 46)

Donde:

$N_t$  es el número de microorganismos en el tiempo  $t$

$N_0$  es el número de microorganismos cuando  $t = 0$

$k$  es el coeficiente de letalidad específica

$n$  es una constante empírica adimensional

$C$  es la concentración del desinfectante en el tiempo  $t$

$t$  es el tiempo de contacto

El modelo de Selleck Collins se planteó cuando los datos experimentales para la desinfección de aguas residuales no seguían el comportamiento descrito por la ley de Chick. En la expresión propuesta se considera un periodo inicial de lag en dónde no existe inactivación y la relación  $N/N_0$  es igual a la unidad. Esto se debe a la reacción inicial que tiene el cloro con los otros agentes reductores presentes en el agua (Lin, 2007).

$$\frac{N_t}{N_0} = \left( \frac{Ct}{b} \right)^{-n}$$

(Ecuación 47)

Donde:

$N_t$  es el número de microorganismos en el tiempo  $t$

$N_0$  es el número de microorganismos cuando  $t = 0$

$C$  es la concentración residual del desinfectante

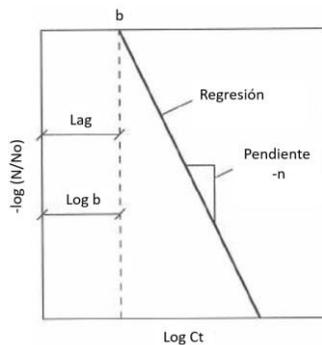
$n$  es la pendiente de la curva

$b$  es el valor de  $\ln(Ct)$  cuando  $\ln(N_t/N_0)$  es igual a 0

$t$  es el tiempo de contacto

Los valores de  $b$  y  $n$  deben encontrarse experimentalmente al graficar  $\ln(N_t/N_0)$  contra  $\ln(Ct)$ . Valores típicos para efluentes secundarios para la reducción de coliformes totales y coliformes fecales es de 2.82 y 4.0, y 2.8 y 3.0 respectivamente (Metcalf & Eddy, 2014).

Figura 12. Modelo de Selleck Collins en dónde se observa el lag debido a la reacción del cloro libre con otros compuestos presentes en el agua residual



Tomado de: (Metcalf & Eddy, 2014)

## 2. Valor Ct.

La Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA) define el valor Ct como el producto entre la concentración residual del desinfectante, en mg/L, y el tiempo de residencia en minutos y puede ser utilizado como un indicador del desempeño de la operación, o un valor objetivo que debe alcanzarse al terminar la desinfección. La OMS recomienda un valor de Ct de 15 mg min/L para un proceso de cloración; sin embargo, se recomienda obtener un valor específico para la planta de tratamiento que se está estudiando basado en los tratamientos previos, el diseño del tanque y las variaciones en temperatura y pH (The Environmental Protection Agency, 2011).

Tabla 19. Valores de Ct para diferentes niveles de inactivación de bacterias en efluentes secundarios con un pH de 7.5 y una temperatura de 20 °C

Desinfectante	Unidades	Inactivación			
		1-log (90%)	2-log (99%)	3-log (99.9%)	4-log (99.99%)
Cloro libre	mg min/L	0.4-0.6	0.8-1.2	1.2-1.8	1.6-2.4
Cloraminas	mg min/L	50-70	95-150	140-220	200-300

Tomado de: (Metcalf & Eddy, 2014)

### 3. Parámetros de diseño para el reactor

Para el proceso de cloración se debe diseñar un tanque que provea el tiempo de retención suficiente para que el químico desinfectante inactive los patógenos. Para calcular el volumen del tanque se utiliza la siguiente expresión.

$$V = \tau Q \quad (\text{Ecuación 48})$$

Donde:

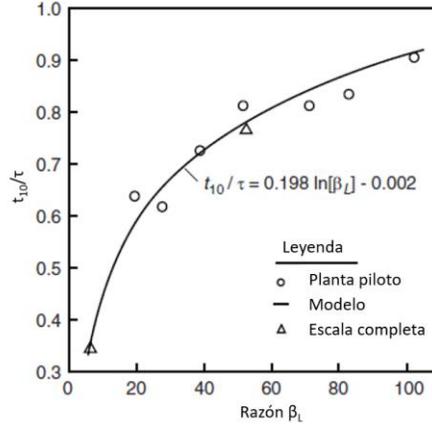
$V$  es el volumen del tanque

$\tau$  es el tiempo de residencia

$Q$  es el caudal

Esta ecuación se cumple únicamente para flujo pistón. Esta idealidad no se observa en sistemas de tratamiento de agua por la existencia de zonas muertas. Para corregir esto se utiliza el factor  $t_{10}/\tau$ , que puede encontrarse en la literatura en base a los distintos arreglos que puede tener un tanque de contacto (**Howe, Hand, Crittenden, Trussell, & Tchobanoglous, 2012**). Para evitar la formación de zonas muertas utilizando el menor espacio posible para la construcción del tanque se recomienda tener una relación largo/ancho de 40 (**Metcalf & Eddy, 2014**).

Figura 13. Correlación entre el factor  $t_{10}/\tau$  y  $\beta_L$



Tomado de: (Howe, Hand, Crittenden, Trussell, & Tchobanoglous, 2012)

La transferencia de masa depende de la difusión molecular de una especie al existir un gradiente de concentración. En condiciones de turbulencia, pero sin flujo, este valor puede ser sustituido en la ley de Fick por una difusión por remolino. En condiciones de turbulencia y flujo el valor se sustituye por un coeficiente de dispersión. Al diseñar un reactor el coeficiente de dispersión se utiliza para calcular el número de dispersión. Cuando este es igual a cero el reactor se comporta como un PFR, y cuando su valor se vuelve infinito el reactor se comporta como un CSTR. Los tanques de cloración también pueden diseñarse a partir de un número de dispersión, ya que se busca el comportamiento de un PFR. Si su valor es mayor a 0.015 la eficiencia de la desinfección disminuye considerablemente (Metcalf & Eddy, 2014).

$$D = 1.01\nu Re^{0.875} \quad \text{(Ecuación 49)}$$

Donde:

$D$  es el coeficiente de dispersión

$\nu$  es la viscosidad cinemática

$Re$  es el número de Reynolds

$$d = \frac{D}{uL} \quad \text{(Ecuación 50)}$$

Donde:

$d$  es el número de dispersión

$D$  es el coeficiente de dispersión

$u$  es la velocidad lineal

$L$  es la longitud del canal

Al momento de diseñar el tanque es importante conocer la caída de presión que ocasiona. Se puede trabajar como un flujo en canal abierto, por lo que es válido utilizar la expresión de Manning, en donde  $n$  es la rugosidad del canal en dimensiones de  $(\text{longitud})^{1/6}$ . En el caso del concreto este valor es  $0.015 \text{ m}^{1/6}$  (Perry & Green, 2008).

$$f = \frac{29n^2}{r_H^{1/3}}$$

(Ecuación 51)

Donde:

$f$  es el factor de fricción

$n$  es la rugosidad del canal

$r_H$  es el radio hidráulico

## DD. Almacenamiento del hipoclorito de sodio

### 1. Tanque de almacenamiento

El hipoclorito de sodio se almacena en tanques a presión atmosférica. Los materiales más utilizados a nivel comercial para la construcción de tanques son el acero al carbón y el acero inoxidable. Sin embargo, las soluciones de NaOCl son altamente corrosivas al contacto con metales. Los únicos compatibles son el titanio, tantalio, plata, oro y platino. De estos, solo el titanio podría ser utilizado como material de construcción, pero es costoso en relación con otros materiales no metálicos que también pueden ser utilizados.

El plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP) es muy utilizado para el almacenamiento de hipoclorito de sodio. Consiste en una resina resistente a varios químicos, que se refuerza estructuralmente con fibra de vidrio. El proceso de construcción es bastante complejo, debido a las distintas capas que deben unirse, además de que debe ser curado con una mezcla de peróxido de benceno y dimetil anilina. Un tanque de FRP que ha sido construido adecuadamente posee una vida útil de entre 10 a 20 años (White, 2010).

También el polietileno de alta densidad (HDPE) ofrece compatibilidad y, usualmente, se encuentra con mayor facilidad. Los tanques de HDPE deben ser fabricados siguiendo la ASTM D 1998-2006. Deben estar pintados de un color que refleje la luz de los rayos UV, y que al mismo tiempo evite absorber el calor del ambiente, ya que ambos son factores importantes en la pérdida de la concentración de cloro activo. Por la misma razón, no deben quedar expuestos a radiación provenientes del sol. Su tiempo de vida se encuentra entre los 5 a los 7 años (White, 2010).

Al comparar ambos materiales, los tanques de HDPE son menos costosos que los tanques de FRP, lo que se compensa con su vida útil más corta. De forma estimada, para tanques por arriba de los 10,000 galones, los tanques de FRP son más económicos, mientras que por debajo de los 3,000 galones los tanques de HDPE resultan ser la mejor opción en términos económicos. Dentro del rango intermedio los costos resultan ser similares y se tendrán que tener otras consideraciones para tomar la decisión (White, 2010).

## 2. Decaimiento de la concentración de cloro activo durante su almacenamiento

La concentración de una solución de hipoclorito de sodio puede expresarse de distintas maneras y todas son válidas. Debido a su uso como desinfectante, en muchas ocasiones lo que interesa conocer es la concentración de cloro libre activo en forma de  $\text{Cl}_2$ . Comercialmente este valor se expresa como la cantidad de gramos de cloro libre activo en forma de  $\text{Cl}_2$  por cada 10 L de solución, y se reporta en forma de porcentaje (White, 2010).

Tabla 20. Gravedad específica y concentración de cloro activo para soluciones con distinta concentración de NaOCl

% Comercial	Gravedad específica	Cloro activo disponible (g $\text{Cl}_2$ /L)	Cloro activo disponible (% m/m)	NaOCl (% m/m)
0.8	1.010	8	0.80	0.84
2.0	1.034	20	1.93	2.03
4.0	1.062	40	3.77	3.95
6.0	1.089	60	5.51	5.78
8.0	1.116	80	7.17	7.53
10.0	1.142	100	8.76	9.20
12.0	1.168	120	10.27	10.79
12.5	1.175	125	10.64	11.17
15.0	1.206	150	12.44	13.06

Tomado de: (White, 2010)

El hipoclorito de sodio se degrada a lo largo del tiempo, formando cloruro de sodio, clorato de sodio y oxígeno. Esto reduce el contenido de cloro activo disponible en la solución. Esta degradación se ve influenciada por la exposición a la luz UV, pH, y la temperatura. El rango óptimo de pH para almacenar la solución es básico, por lo que es común encontrar hidróxido de sodio como parte del desinfectante adquirido. Estudios reportan un rango de 11.86 a 13, que corresponde a 0.025 % - 0.35 % (m/m) de NaOH presente en la solución. Existen varios mecanismos de reacción que puede toar la degradación, pero el más predominante es la formación de ion clorato (White, 2010).



Se considera que la degradación ocurre en una reacción de segundo orden con respecto al ion hipoclorito, por lo que a menor concentración de  $OCl^-$  disminuye la rapidez de descomposición del desinfectante. Luego de evaluar datos experimentales se ha logrado obtener una ecuación capaz de modelar este proceso. Los valores de la constante de velocidad presentan una dependencia de la temperatura, ya que a mayor temperatura ocurre una mayor velocidad de reacción (Gordon, Adam, Bubnis, & Hoyt, 1993).

$$\frac{1}{[OCl^-]_t} = \left(\frac{9}{2}\right)kt + \frac{1}{[OCl^-]_0}$$

(Ecuación 55)

Donde:

$t$  es el tiempo transcurrido

$[OCl^-]$  es la concentración de ion hipoclorito presente

$k$  es la constante de velocidad de reacción

Tabla 21. Constante de velocidad de reacción para la degradación de la concentración de hipoclorito a distintas temperaturas

Temperatura (K)	$k$ (g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
283	$6.45 \cdot 10^{-7}$
288	$9.87 \cdot 10^{-6}$
297	$2.65 \cdot 10^{-5}$

Tomado de: (Gordon, Adam, Bubnis, & Hoyt, 1993).

## EE. Bombas dosificadoras de químicos

Para la alimentación de hipoclorito de sodio en el sistema de tratamiento se suelen utilizar bombas de desplazamiento positivo, entre las que destacan las bombas de diafragma y las bombas peristálticas. Las bombas de pistón, aunque son una de las tecnologías más utilizadas en el transporte de líquido, suele presentar fugas en sus sellos dinámicos. Además, también es posible que existan fugas del lubricante y que contaminen la sustancia que está siendo bombeada. Por esta razón no se acepta su uso con  $NaOCl$ , ya que es un químico corrosivo que puede corroer el metal, y que reacciona con lubricantes a base de aceite (White, 2010).

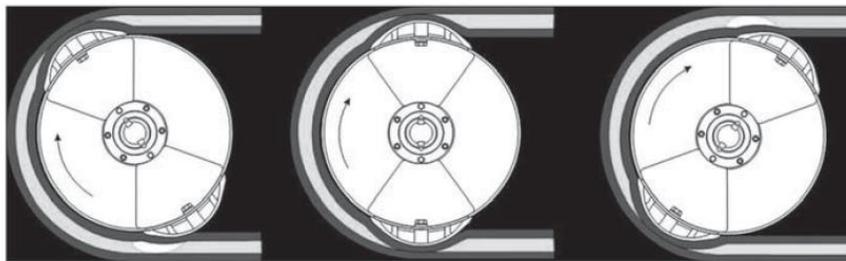
Las bombas de diafragma han sido capaces de alimentar químicos en aplicaciones industriales y adaptarse a un rango de flujos al cambiar la velocidad del ciclo o la longitud del movimiento del diafragma. El diafragma se mueve gracias a un motor y un mecanismo que convierte el movimiento rotacional en movimiento de ida y vuelta. El líquido se succiona por un vacío momentáneo que se forma cuando el diafragma se retrae, y luego se expulsa al ser empujado. Se utilizan válvulas de

cheque para asegurar que el flujo se de en una sola dirección y una válvula de contrapresión para proveer de suficiente y cerrar la válvula de cheque en la descarga de la bomba. (White, 2010).

Debido al vacío formado de forma momentánea es necesario que la cámara de succión se encuentre sumergida en el líquido. En el caso del hipoclorito de sodio, el oxígeno es uno de los productos de su degradación, y durante el bombeo puede ser liberado de la solución. La turbulencia que sufre el químico al pasar por la tubería y accesorios puede alterar el equilibrio que se tiene con el oxígeno disuelto, y puede generar gran producción de gas. Al momento de existir gas en la succión el vacío solo provocará una expansión de este, y se estará reduciendo el flujo de líquido que se está dosificando. Si el gas no se libera puede llegar al punto en que la bomba de diafragma parece trabajar normalmente, pero no está dosificando líquido. Por estas razones los sistemas que trabajan con bombas de diafragma incluyen válvulas de bypass para liberar el gas formado (White, 2010).

Para dosificar hipoclorito de sodio las bombas peristálticas se han vuelto populares. Son bombas de desplazamiento positivo que constan de un tubo flexible y un rotor con rodillos que va girando y se encarga de presionar el tubo contra la pared de la carcasa para desplazar el líquido en una dirección. Para controlar el flujo proporcionado por la bomba se cambia la velocidad de giro del rotor. No requieren válvulas de cheque ni una válvula de contrapresión para controlar la dosificación. Tampoco presentan problemas por el vacío creado al momento de impulsar el líquido ya que el sistema maneja adecuadamente la presencia de aire en el sistema. Algunos fabricantes reportan una capacidad de succión cercana a los 30 ft previo a que el tubo flexible colapse (White, 2010).

Figura 14. Funcionamiento de una bomba peristáltica



Tomado de: (White, 2010)

## FF. Mezcladores estáticos

Los mezcladores estáticos son utilizados para lograr una mezcla homogénea sin piezas mecánicas, utilizando únicamente el movimiento del fluido. Los primeros se utilizaron en polímeros viscosos, debido a la diferencia de velocidad que existía entre el centro de la tubería y las paredes. Al agregar elementos helicoidales dentro de la tubería, se forzaba al fluido que pasaba por la pared

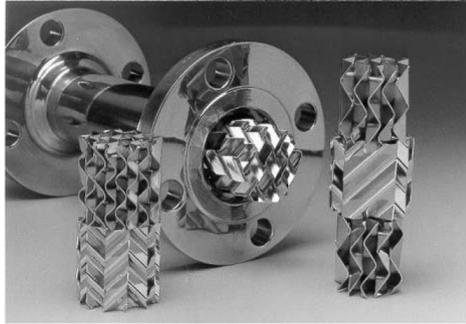
a ir hacia el centro, y viceversa (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). La importancia que tiene el mezclado inicial en el proceso de desinfección no se puede ignorar. Cuando el desinfectante se añade en un flujo que se encuentra en régimen turbulento el número de patógenos que se inactivan aumenta en dos órdenes de magnitud comparado con añadirlo a un tanque agitado. Para mejorar el desempeño del sistema de desinfección el químico desinfectante debe añadirse y mezclarse tan rápido como sea posible. El nivel óptimo de turbulencia aún se sigue estudiando (Metcalf & Eddy, 2014).

Si se pudieran tomar muestras a lo largo de la sección transversal del flujo en el mezclador y medir el nivel de segregación que existe, los resultados podrían analizarse estadísticamente. La desviación estándar de la concentración dividido el promedio de las muestras nos da una función conocida como coeficiente de variación ( $C_0V$ ) que se utiliza para medir la uniformidad del flujo en cualquier punto del mezclador. El grado de segregación buscado dependerá del proceso, al añadir un aditivo se considera que está bien mezclado con un coeficiente de variación del 5%. Este valor no cambia con la cantidad de líquido que debe mezclarse, pero sí lo hará el largo de mezclador necesario (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004).

La forma de los elementos que se colocan varía según el fabricante. Los más conocidos a nivel comercial son los siguientes:

- KMS: Los elementos forman una especie de cinta trenzada. Cada uno tiene una longitud de 1.5 o 1 diámetro. Los elementos se rotan  $90^\circ$  con respecto al anterior.
- HEV: Está formado por cuatro pestañas colocadas a lo largo de la tubería simétricamente. Poseen 1.5 diámetros de separación entre ellas.
- SMV: Láminas de metal corrugadas, apiladas una sobre la otra. Cada elemento posee una longitud de 0.5 a 1 diámetro.
- SMX: Barras con una inclinación de  $45^\circ$  con respecto al eje de la tubería. Cada elemento se rota  $90^\circ$  con respecto al anterior.
- SMXL: Similar al SMX, pero las barras tienen una inclinación de  $30^\circ$ . Usualmente posee menos barras por elemento.
- SMR: Los elementos están compuestos por tubos huecos en el que se puede transportar un fluido para mejorar la transferencia de calor. El arreglo es similar a la geometría que posee el SMX.
- KVM: Pestaña inclinada de 2.5 diámetros de longitud.

Figura 15. Mezclador estático tipo SMV



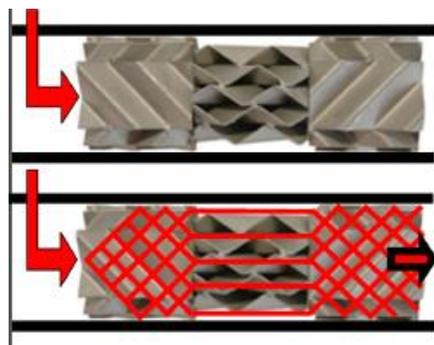
Tomado de: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Figura 16. Elementos para un mezclador estático tipo SMX



Tomado de: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

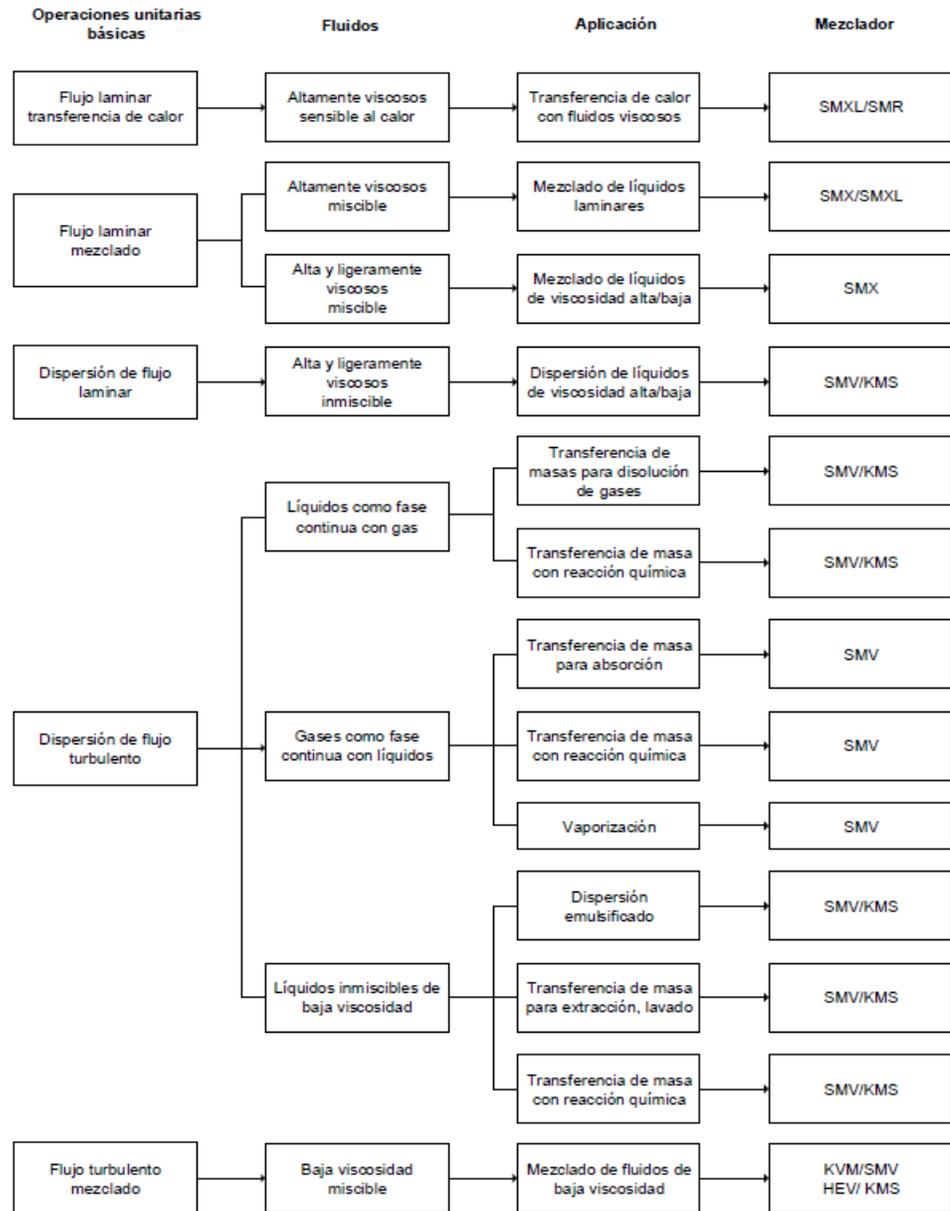
Figura 17. Patrón de flujo en un mezclador estático tipo SMV con cinco capas y rotación de 90° entre cada elemento.



Tomado de: (Abdolkarimi & Ganji, 2013)

Para seleccionar el tipo de mezclador que se utilizará debe conocerse el régimen de flujo, la viscosidad y la miscibilidad de un fluido en el otro.

Figura 18. Esquema para seleccionar el tipo de mezclador estático a partir del régimen de flujo, viscosidad, miscibilidad y aplicación.



Tomado de: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Al agregar piezas que modifican la dirección del flujo dentro de una tubería vacía, se aumenta la caída de presión. Esta caída es proporcional a la caída de presión que existiría en una tubería vacía de la longitud y diámetro del mezclador. La igualdad se logra al multiplicar por una constante de proporcionalidad que depende del régimen de flujo y el tipo de mezclador (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004).

$$\Delta P_{sm} = K_L \Delta P_{pipe} \quad (\text{Ecuación 56})$$

$$\Delta P_{sm} = K_T \Delta P_{pipe} \quad (\text{Ecuación 57})$$

Donde:

$\Delta P_{sm}$  es la caída de presión ocasionada por el mezclador estático

$K_L, K_T$  es un factor propio del tipo mezclador y que depende del régimen de flujo

$\Delta P_{pipe}$  es la caída de presión en la tubería como si estuviera vacía

Para conocer la relación de largo/diámetro que debe tener el mezclador estático seleccionado se utiliza una correlación potencial con el coeficiente de variación reducido que se desea alcanzar.

$$C_0 V_r = K_i^{L/D} \quad (\text{Ecuación 58})$$

Donde:

$C_0 V_r$  es el coeficiente de variación reducido

$K_i$  es un factor propio del tipo de mezclador y que depende del régimen de flujo

$\Delta P_{pipe}$  es la caída de presión en la tubería como si estuviera vacía

El coeficiente de variación reducido se define como el coeficiente de variación esperado dividido el coeficiente de variación inicial para una muestra no mezclada. Este último se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$(CV)_0 = \left( \frac{1 - C_v}{C_v} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 59})$$

Donde:

$(CV)_0$  es el coeficiente de variación inicial para una muestra no mezclada

$C_v$  es la fracción volumétrica

Tabla 22. Parámetros para el mezclado en un régimen de flujo laminar

Mezclador estático	$K_L$	$K_{iL}$
KMS	6.9	0.87
SMX	37.5	0.63
SMXL	7.8	0.85
SMR	46.9	0.81

Tomado de: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Tabla 23. Parámetros para el mezclado en un régimen de flujo turbulento

Mezclador estático	$K_T$	$K_{iT}$
KMS	150	0.50
KVM	24	0.42
SMX	500	0.46
SMXL	100	0.87
SMV	100-200	0.21-0.46

Tomado de: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004).

## GG. Biogás

Es uno de los productos de la digestión anaerobia de aguas residuales, que posee entre el 60 y 70% (v/v) de metano, entre 20 y 35% (v/v) de CO<sub>2</sub> y podría contener también pequeñas fracciones de otros compuestos como siloxanos (provenientes de digerir materiales que frecuentemente están presentes en jabón, desodorantes y cosméticos) que pueden generar incrustaciones en tubería y equipos cuando se combustionan ya que producen silicatos, depósitos de calcio, azufre y zinc; por lo que es necesario eliminarlos por operaciones físicas, químicas o mecánicas. (López, *et al*, 2017)

Figura 19. Composición típica del biogás en reactores anaerobios y digestores de lodo.

COMPONENTE	UNIDAD	BIOGÁS DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES	BIOGÁS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODO
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	ppmv	1 000-5 000	500-1 500
Azufre total (S)	mg/Nm <sup>3</sup>		20-2 500
Halógenos	mg/Nm <sup>3</sup>		0-100
Cloro (Cl)	mg/Nm <sup>3</sup>		1-5
Flúor (F)	mg/Nm <sup>3</sup>		1-5
Polvo/partículas (< 10 µm)	mg/Nm <sup>3</sup>		N.E.
Total de compuestos orgánicos con silicio	mg/Nm <sup>3</sup>		< 40
Compuestos aromáticos	mg/Nm <sup>3</sup>		< 10 en 100% CH <sub>4</sub>
Humedad relativa	%		90-100
Contenido de oxígeno (O <sub>2</sub> )	% en volumen	0-2	0-1
Metano (CH <sub>4</sub> )	% en volumen	60-85	60-70
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	% en volumen	5-15	20-40
Monóxido de carbono (CO)	% en volumen	0-0.3	-
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	% en volumen	2-25*	0-2
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	% en volumen	0-3	0-1.5
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	% en volumen		< 0.05
Número de metano	-		> 100
Poder calorífico superior (PCS)	kWh/Nm <sup>3</sup>	6.6-9.4	6.6-7.7
Poder calorífico inferior (PCI)	kWh/Nm <sup>3</sup>	6.0-8.5	6.0-7.0
Índice de Wobbe	kWh/Nm <sup>3</sup>	7.0-13.4	7.0-9.1

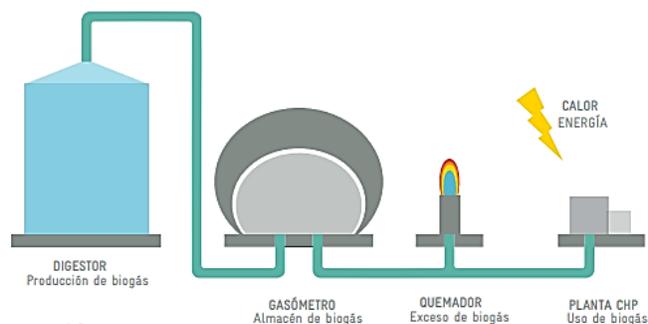
(\*) La elevada fracción de nitrógeno en el biogás de reactores anaerobios que tratan aguas residuales domésticas se debe al N<sub>2</sub> disuelto en las aguas residuales domésticas influentes en el reactor. N.E.: No especificado

(López, et al, 2017)

## 1. Almacenamiento de biogás

Es una parte del proceso de utilización del biogás que contempla su aprovechamiento energético, cuando la quema del mismo es realizada con alta eficiencia para procesos de generación de calor o se prevé su uso a futuro, para lo cual se almacena en equipos denominados gasómetros; que pueden instalarse en serie o en paralelo. (López, et al, 2017).

Figura 20. Instalación en serie de gasómetro de biogás.



(López, et al, 2017)

a. Almacenamiento de biogás para uso en motores de gas

El volumen requerido para el almacenamiento depende estrictamente de las condiciones de operación óptimas de los motores o turbinas que lo utilizarán. (López, *et al*, 2017)

Figura 21. Influencia de la operación de equipos de uso de biogás, en el volumen del gasómetro.

TIPO DE USO	MODO DE OPERACIÓN	INFLUENCIA SOBRE EL VOLUMEN DEL GASÓMETRO
Generación de energía eléctrica	Carga básica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin influencia</li> <li>• Pequeña capacidad del equipamiento de uso del biogás</li> <li>• Almacenamiento sólo para compensar oscilaciones</li> </ul>
	Pico de energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Influencia significativa</li> <li>• Mayor tamaño o número de equipos de uso de biogás</li> <li>• Almacenamiento para mayores demandas por ser atendidas en periodos de operación cortos del equipo de uso de biogás</li> </ul>
	Energía de emergencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Influencia significativa</li> <li>• Tamaño de los componentes conforme a la demanda de energía</li> <li>• Almacenamiento para demanda de energía de emergencia</li> </ul>
Generación térmica	Carga básica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin influencia</li> <li>• Pequeña capacidad del equipamiento de uso del biogás</li> <li>• Almacenamiento sólo para compensar oscilaciones</li> </ul>
	Pico de carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Influencia significativa</li> <li>• Integración de componentes adicionales</li> <li>• Almacenamiento de la demanda temporal</li> </ul>
Generación de aire comprimido	Carga básica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin influencia</li> <li>• Pequeña capacidad del equipamiento de uso del biogás</li> <li>• Almacenamiento sólo para compensar oscilaciones</li> </ul>

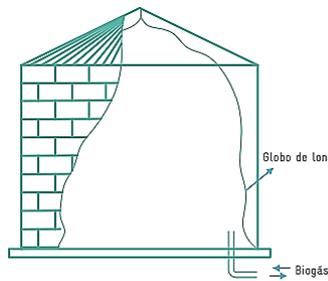
(López, *et al*, 2017)

La Figura 21 sugiere que no hay un modelo determinado para seleccionar el volumen del gasómetro, ya que depende del uso que se vaya a dar al biogás.

b. Métodos de almacenamiento de biogás

Se clasifican de acuerdo a la presión que manejan, como: no presurizado (0 – 0.1 kPa, comúnmente se requiere de un soplador para poder consumir el gas), baja presión (1 – 5 kPa) y alta presión (0.1 – 1 MPa). Se recomienda, para plantas pequeñas o medianas, almacenamientos no presurizados o a baja presión.

Figura 22. Almacenamiento de biogás no presurizado, tipo globo de lona.

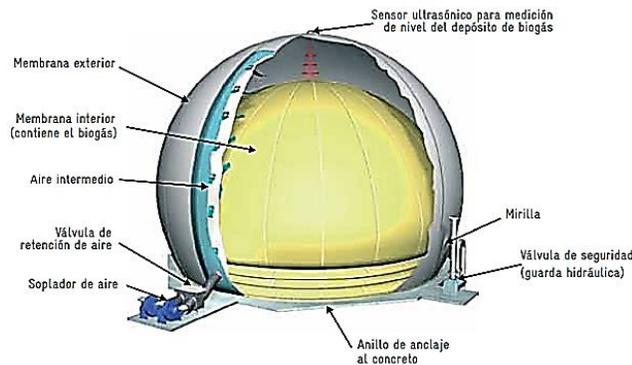


(López, *et al*, 2017)

Sistemas de alta presión: Cuando la demanda o la producción de biogás no es continua, se requiere de mayor volumen para el gasómetro. Regularmente son contenedores esféricos o cilíndricos, analizados previamente a empezar la operación. Además, se sugiere instalar antes un gasómetro de baja presión, a manera de amortiguar el flujo que llegue al gasómetro de alta presión. Es importante llevar control de flujo, así como la instalación de una válvula de alivio que permita liberar excedente de presión. (López, *et al*, 2017)

Sistemas de baja presión: Permiten amortiguar el patrón de producción de biogás, utilizando gasómetros de doble membrana, que tienen la capacidad de almacenamiento durante un tiempo determinado. La configuración que pueden tener es de media esfera o  $\frac{3}{4}$  de esfera, siendo este último el más utilizado, anclándose a una base de concreto. (López, *et al*, 2017)

Figura 23. Gasómetro de doble membrana.



(López, *et al*, 2017)

De acuerdo a la Figura 23, la membrana externa se encuentra inflada todo el tiempo, ya que se encarga de regular la presión de la membrana interna. El inflamiento se da por acción de sopladores de aire, dimensionados para que la membrana externa continúe inflada aun cuando se tiene fluctuaciones muy fuertes en el almacenamiento del biogás, por lo que usualmente se utilizan aquellos cuya capacidad es 150 – 200% mayor que el consumo máximo de biogás. El material de la membrana suele ser tela poliéster recubierta de PVC, con aditivos para protegerla frente a los rayos del sol, lo que la hace durar hasta 20 años antes de ser cambiada. (López, *et al*, 2017)

La membrana interna es la que contiene al biogás y se une a la base de concreto. La presión interna se determina por la presión del aire que la separa de la membrana externa. Se requiere protección de la membrana interna contra el azufre que contiene el biogás y su duración suele ser el doble de la duración de la membrana externa, ya que no se expone al sol. (López, *et al*, 2017)

Puede almacenarse, nominalmente, desde 50 m<sup>3</sup> hasta 5000 m<sup>3</sup> en los gasómetros de baja presión y usualmente se utiliza 1 día de producción como base de dimensionamiento. Es importante realizar control del nivel de llenado del gasómetro, evitando exceder el volumen máximo permisible y evitando dejar caer el volumen por debajo del volumen residual establecido. Para monitorear la

presión interna, se sugiere un sensor con un lazo de control cerrado que abra o cierre la válvula reguladora. (López, *et al*, 2017)

## 1. Quemado de biogás

Resulta estrictamente necesario instalar quemadores de biogás como dispositivo de seguridad del proceso cuando se tenga una tasa de producción de biogás mayor a la tasa de consumo, también sirven para la reducción del impacto ambiental y de malos olores. (López, *et al*, 2017)

Cuando el biogás no se utilice y su almacenamiento no sea posible, el quemador opera continuamente para convertir el metano en dióxido de carbono, gas de efecto invernadero con menor impacto negativo hacia el ambiente. El tamaño del quemador se determina según el volumen máximo de biogás producido y un factor de sobre diseño del 10%. (López, *et al*, 2017)

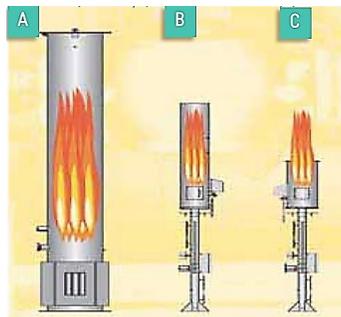
### a. Tipos de quemadores

Quemadores abiertos: Presentan la ventaja de confirmar su funcionamiento debido a la visibilidad de la llama, son más baratos, sin embargo, su eficiencia de combustión es baja y se requiere mayor área de seguridad por el calor que irradia la llama. (López, *et al*, 2017)

Quemadores cerrados: En estos, la llama se mantiene dentro de una cámara de combustión que comúnmente es de acero al carbón, aislada con cerámica para mantener la temperatura interna cerca de los 1000 °C y temperatura externa menor a 80 °C; además, presentan una alta eficiencia de combustión, lo que los hace ser los más recomendados. (López, *et al*, 2017)

Quemadores semicerrados: Es una combinación de los descritos anteriormente, no están aislados y la cámara de combustión es más pequeña; la visibilidad de la llama puede presentarse o no. De las mayores desventajas es que no se puede medir las emisiones, además de una baja eficiencia de combustión. (López, *et al*, 2017)

Figura 24. Tipos de quemadores. A. Cerrado. B. Semicerrado. C. Abierto.



(López, *et al*, 2017)

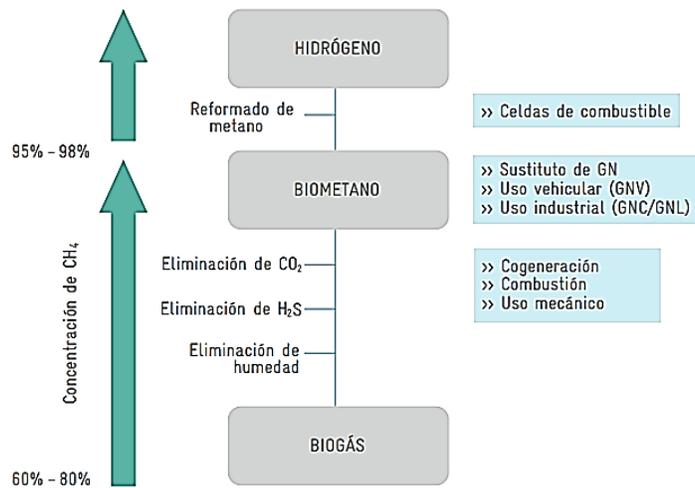
La capacidad se establece de acuerdo al tipo de quemador, aunque se conoce en términos generales desde 50 m<sup>3</sup>/h hasta 1500 m<sup>3</sup>/h para quemadores abiertos y desde 250 m<sup>3</sup>/h hasta 10000 m<sup>3</sup>/h para quemadores cerrados. (López, *et al*, 2017)

Entre algunas consideraciones operativas están que la temperatura del gas saliente debe ser por lo menos de 900 °C, el biogás debe permanecer al menos 3 segundos dentro del quemador, el contenido de H<sub>2</sub>S debe ser menor a 50 ppmv, la relación aire:biogás es de 10-15:1 usualmente, de acuerdo a la norma brasileña NBR 12209 (2011) la distancia de seguridad entre el quemador y el digestor debe ser de 30 m al menos. (López, *et al*, 2017)

### 3. Tratamiento del Biogás

La composición del biogás depende del tipo de sustrato a partir del cual se generó, lo que puede dar posibilidad a la presencia de sulfuro de hidrógeno, otros compuestos sulfurados, vapor de agua, siloxanos, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles; además de metano y dióxido de carbono; por lo que resulta necesario implementar métodos para la remoción total o parcial de estos componentes de acuerdo al uso que se le vaya a dar al biogás, ya que son tóxicos, corrosivos o con otras propiedades fisicoquímicas que pueden afectar en el potencial de aprovechamiento.

Figura 25. Requerimiento de tratamiento del biogás según su uso.



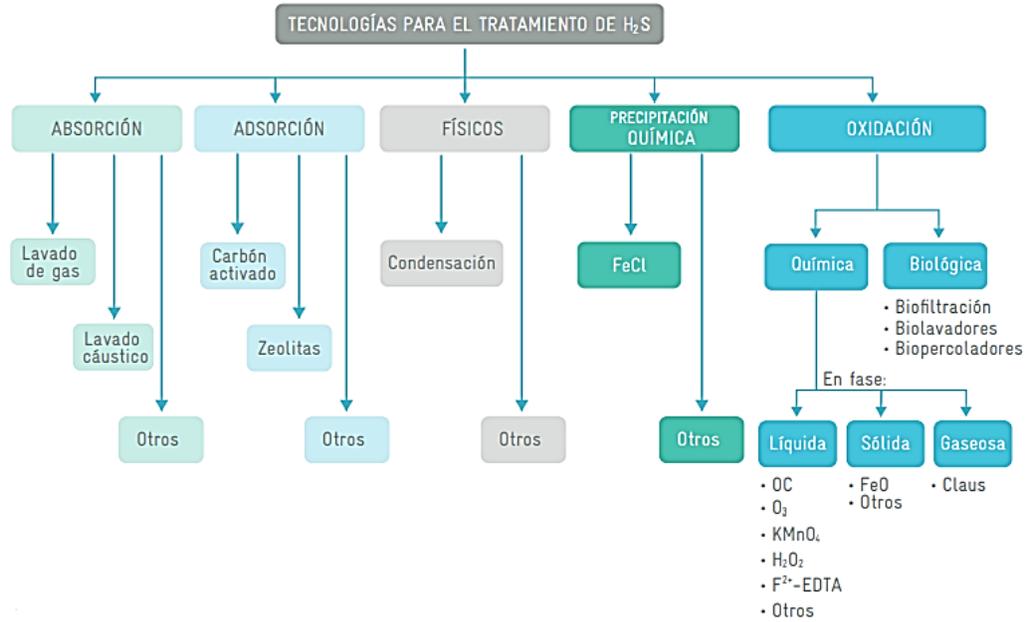
(López, *et al*, 2017)

#### a. Remoción de sulfuro de hidrógeno

La proporción de este compuesto dentro del biogás puede ser incluso de 7000 ppmv, volviéndose peligroso por su alta toxicidad, además que al reaccionar con el agua produce ácido sulfúrico, que es muy corrosivo, por lo que el material de los equipos y sistemas auxiliares para su utilización y transporte requiere de propiedades resistentes ante ese fenómeno. Debido a esto, resulta

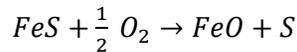
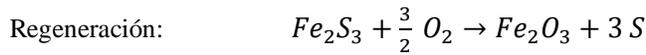
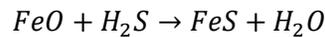
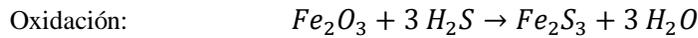
conveniente remover el H<sub>2</sub>S, a manera de reducir costos y aumentar la vida útil de los equipos. (López, *et al*, 2017)

Figura 26. Métodos de tratamiento de biogás.



(López, *et al*, 2017)

Tratándose de los métodos químicos, el H<sub>2</sub>S reacciona con FeO, Fe(OH)<sub>3</sub> o ZnO para producir sulfuro de hierro o de zinc. Estos procedimientos tienen lugar según las reacciones siguientes:

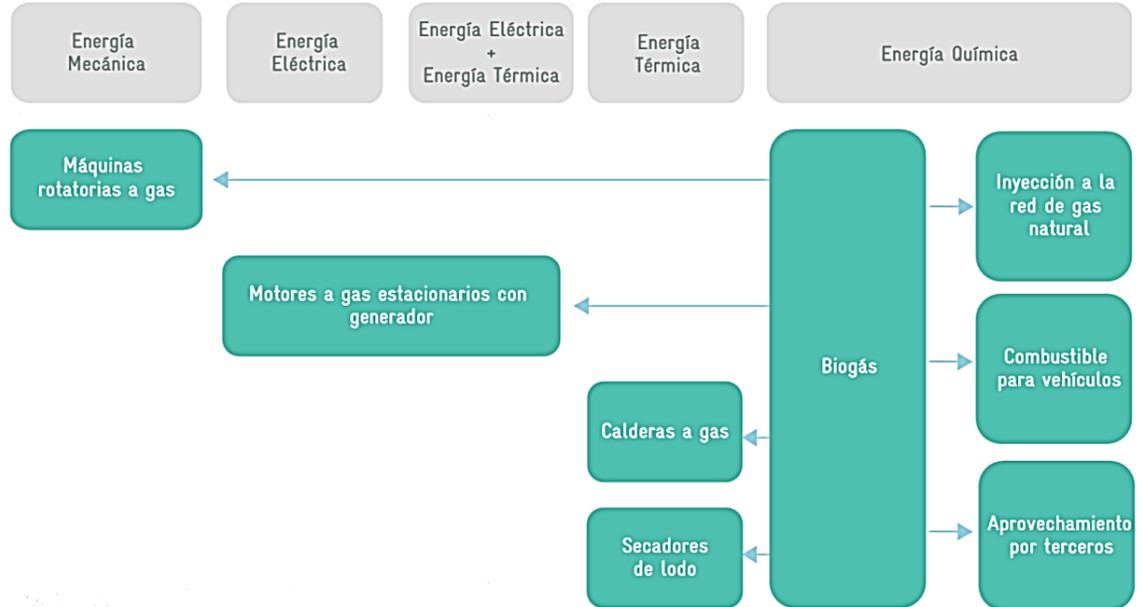


(López, *et al*, 2017)

#### 4. Usos del biogás

La implementación del biogás como fuente energética es frecuente debido al aspecto positivo que genera desde la perspectiva ambiental y económica. Luego de ser tratado, el biogás posee energía química que puede transformarse en energía térmica, eléctrica, o mecánica, usando motogeneradores y calderas.

Figura 27. Usos posibles del biogás.



(López, *et al*, 2017)

a. Generación de calor o vapor

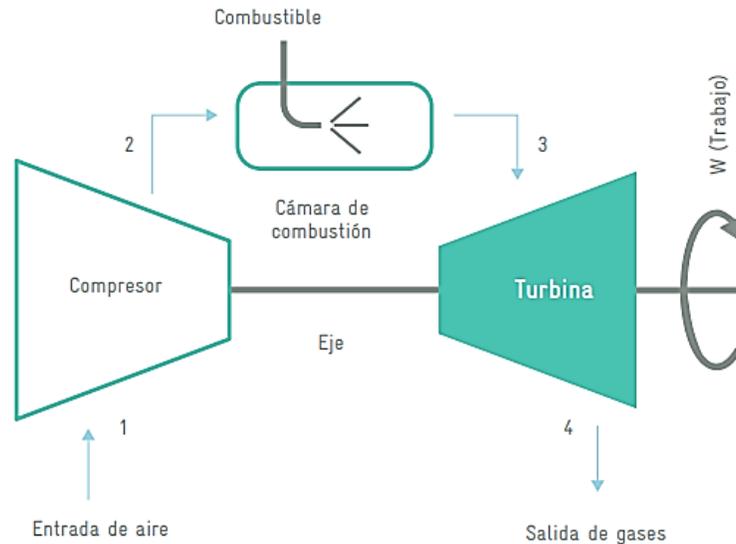
Es el uso más sencillo que puede darse al biogás, a manera de obtener energía térmica, principalmente en lugares en donde hay escasez de combustibles, ya que el biogás puede utilizarse para cocinar o calentar agua. Si se destina hacia la cocina, hay que adaptar la relación aire:gas de los quemadores simplemente y trabajar con una presión de hasta 2.5 kPa, sin embargo es importante decir que el contenido de H<sub>2</sub>S debe ser menor a 100 ppm. (FAO, 2011)

b. Turbinas

Estos equipos se integran por un compresor, una cámara de combustión y la turbina en sí. Se inyecta aire a la cámara de combustión, en donde se comprime aumentando su temperatura, posteriormente se mezcla con el biogás y una bujía genera la chispa para dar paso a la combustión, que produce una expansión súbita realizando trabajo mecánico en el eje que conecta al generador para finalmente obtener electricidad (López, *et al*, 2017).

La eficiencia de las microturbinas y turbinas se puede comparar con las de los motores de encendido por chispa y de bajo mantenimiento (FAO, 2011).

Figura 28. Mecanismo de funcionamiento de turbina de gas.



(López, *et al.*, 2017)

## HH. Lodos

Parte de los compuestos removidos durante el tratamiento de aguas residuales comprenden arenas, escoria, materia sólida y biosólidos, entre otros. Los sólidos y biosólidos, son los que comúnmente se denominan lodos y resultan de las operaciones del tratamiento, en forma de líquido o una mezcla sólido-líquido que suele contener entre 0.25 y 12% (m/m) de sólidos secos. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Los lodos constituyen de los mayores volúmenes de material a tratar, por lo que su procesamiento, reúso y disposición representan cierta complejidad y altos costos dentro de la ingeniería del tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

### 1. Tipos de lodos

#### a. Lodos de tratamiento primario

Usualmente es de color gris y liviano con un olor fuertemente ofensivo ya que se trata del inicio del tratamiento y las aguas residuales se reciben crudas. Se obtiene por procesos de sedimentación. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

#### b. Lodos de digestión anaerobia

De apariencia oscura y con elevada cantidad de gas. Sin embargo, el olor que desprende no es ofensivo. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

c. Lodos activados

Tiene aspecto oscuro y floculento. A medida en que el color se intensifica, el lodo se acerca a condiciones sépticas y libera un olor putrefacto bastante fuerte. Los lodos en buenas condiciones no generan olores ofensivos. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 29. Composición química teórica de los distintos tipos de lodos.

Parámetro	Lodo primario no tratado		Lodo primario digerido		Lodo activado no activado
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango
Sólidos secos totales (ST), %	5-9	6	2-5	4	0.8-1.2
Sólidos volátiles (% de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Grasas (% de ST):					
Éter soluble	6-30	---	5-20	18	---
Éter extracto	7-35	---	---	---	5-12
Proteína (% de ST)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrógeno (N, % de ST)	1.5-4	2.5	1.6-3.0	3.0	2.4-5.0
Fósforo (P <sub>7</sub> O <sub>5</sub> , % de ST)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11
Potasio (K <sub>2</sub> O, % de ST)	0-1	0.4	0-3.0	1.0	0.5-0.7
Celulosa (% de ST)	8-15	10	8-15	10	---
Hierro (no como sulfuro)	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4.0	---
Silicio (SiO <sub>2</sub> , % de ST)	15-20	---	10-20	---	---
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0	6.5-8.0
Alcalinidad (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
Ácidos orgánicos (mg/L de HAc)	200-2000	500	100-600	200	1100-1700
Contenido energético kJ ST/kg	23,000-29,000	25,000	9000-14,000	12,000	19,000-23,000

(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 30. Contenido típico de metales en los sólidos presentes en el agua residual.

Metal	Sólidos secos, mg/kg	
	Rango	Mediana
Arsénico	1.1-230	10
Cadmio	1-3410	10
Cromo	10-99,000	500
Cobalto	11.3-2490	30
Cobre	84-17,000	800
Hierro	1000-154,000	17,000
Plomo	13-26,000	500
Manganeso	32-9870	260
Mercurio	0.6-56	6
Molibdeno	0.1-214	4
Níquel	2-5300	80
Selenio	1.7-17.2	5
Estaño	2.6-329	14
Zinc	101-49,000	1700

(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 31. Características físicas típicas de los lodos producidos en distintos procesos del tratamiento de aguas residuales.

Operación de tratamiento o proceso	Gravedad específica de los sólidos	Gravedad específica del lodo	Sólidos secos, lb/10 <sup>3</sup> gal		Sólidos secos, kg/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	
			Rango	Típico	Rango	Típico
Sedimentación primaria	1.4	1.02	0.9-1.4	1.25	110-170	150
Lodos activados (biosólidos de desecho)	1.25	1.005	0.6-0.8	0.7	70-100	80
Filtro de goteo (biosólidos de desecho)	1.45	1.025	0.5-0.8	0.6	60-100	70
Aireación extendida (biosólidos de desecho)	1.30	1.015	0.7-1.0	0.8	80-120	100
Laguna aireada (biosólidos de desecho)	1.30	1.01	0.7-1.0	0.8	80-120	100
Filtración	1.20	1.005	0.1-0.2	0.15	12-24	20
Eliminación de algas	1.20	1.005	0.1-0.2	0.15	12-24	20
Adición química a tanques primarios para remover fósforo						
Cal baja (350-500 mg/L)	1.9	1.04	2.0-3.3	2.5	240-400	300
Cal elevada (800-1600 mg/L)	2.2	1.05	5.0-11.0	6.6	600-1300	800
Nitrificación de crecimiento suspendido	---	---	---	---	---	---
Desnitrificación de crecimiento suspendido	1.20	1.005	0.1-0.25	0.15	12-30	18
Filtros de desbaste	1.28	1.02	---	---	---	---

(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

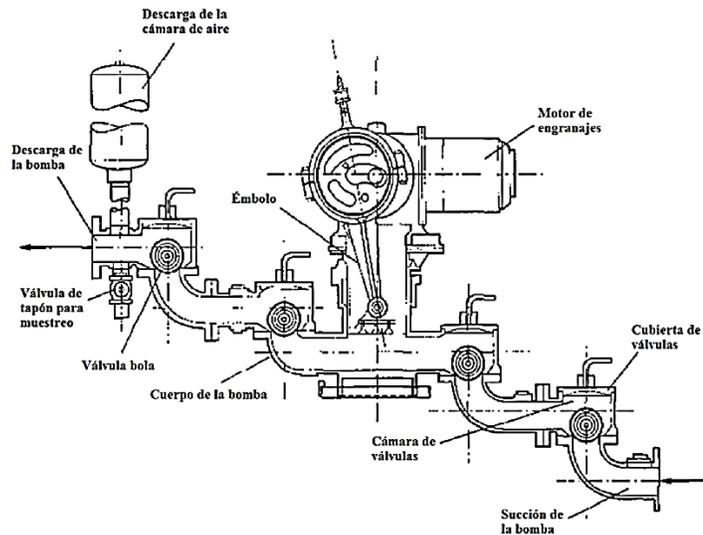
## 2. Bombeo de lodos

En el diseño de plantas de tratamiento de aguas se debe considerar el transporte de lodos a través de largas distancias para dirigirlos a su respectivo tratamiento, por lo tanto, se requiere el uso de bombas, que usualmente son de émbolo, cavidad progresiva, centrífugas, diafragma, pistón de alta presión, lóbulos rotatorios. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

### a. Bombas de émbolo

Se utilizan frecuentemente ya que tienen la capacidad de bombear líquidos con altas concentraciones de sólidos, incluso sobre el 15%, tienen un mecanismo de autocebado, son una alternativa bastante favorable en términos de costo cuando se requiere flujos arriba de 30 L/s y cabeza mayor a 60 m. Sin embargo, entre sus desventajas están que posee baja eficiencia y requieren mantenimiento intensivo cuando se operan continuamente. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 32. Diagrama de una bomba de émbolo.

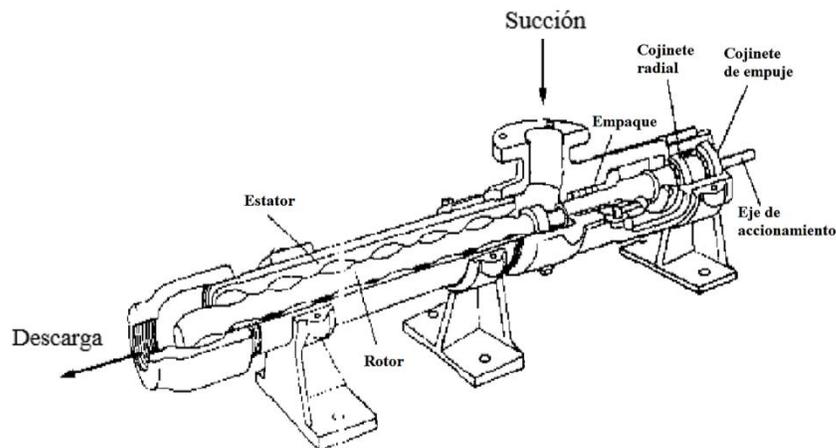


(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

b. Bombas de cavidad progresiva

Han sido utilizadas con frecuencia y de forma satisfactoria para el transporte de la mayoría de los tipos de lodos. Se componen de un rotor que al girar provoca un movimiento progresivo en las cavidades desde la succión hasta la descarga. No deben ser operadas en seco puesto que el estator se quemaría. Se debe dar un correcto uso ya que el mantenimiento por el desgaste del rotor y el estator resulta caro, particularmente con los lodos del tratamiento primario ya que tienen mayor contenido de sólidos. Es conveniente usarlas ya que se controla fácilmente los flujos, la pulsación es mínima, el estator y el rotor actúan como una válvula de retención para evitar el flujo en dirección opuesta, y en términos generales su operación es sencilla. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 33. Diagrama de una bomba de cavidad progresiva.

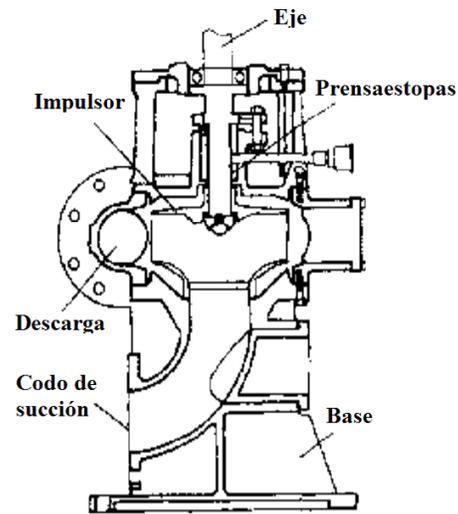


(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

c. Bombas centrífugas

Pueden manejar altos flujos con eficiencias elevadas, además de tener un bajo costo; sin embargo, no son prioritariamente recomendables para el transporte de lodos ya que el impulsor se puede obstruir o desgastar por efectos de abrasión. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 34. Diagrama de una bomba centrífuga.

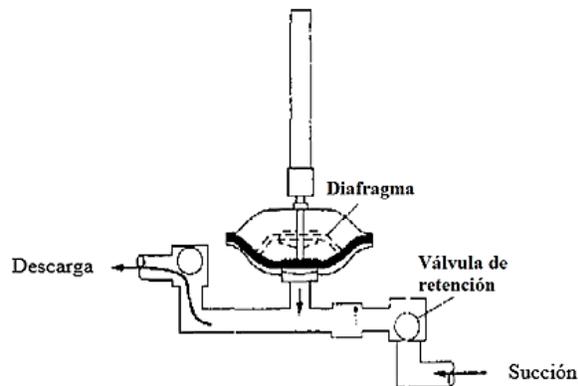


(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

d. Bombas de diafragma

Su funcionamiento se da por el empuje y jalado de una membrana flexible, a manera de contraer y agrandar una cavidad cerrada por la que se dirige el flujo. En términos generales, posee baja capacidad y eficiencia, además de funcionar apropiadamente para bajos valores de cabeza.

Figura 35. Diagrama de una bomba de diafragma.

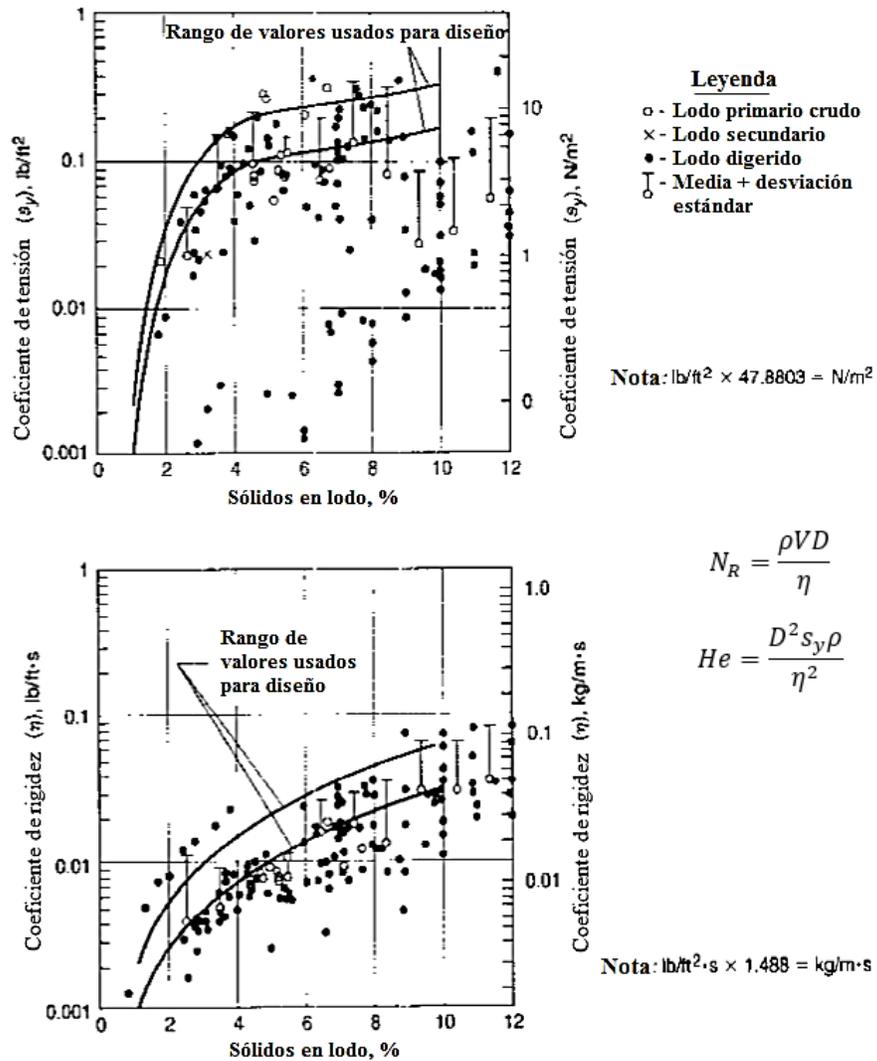


(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

### 3. Reología de los lodos

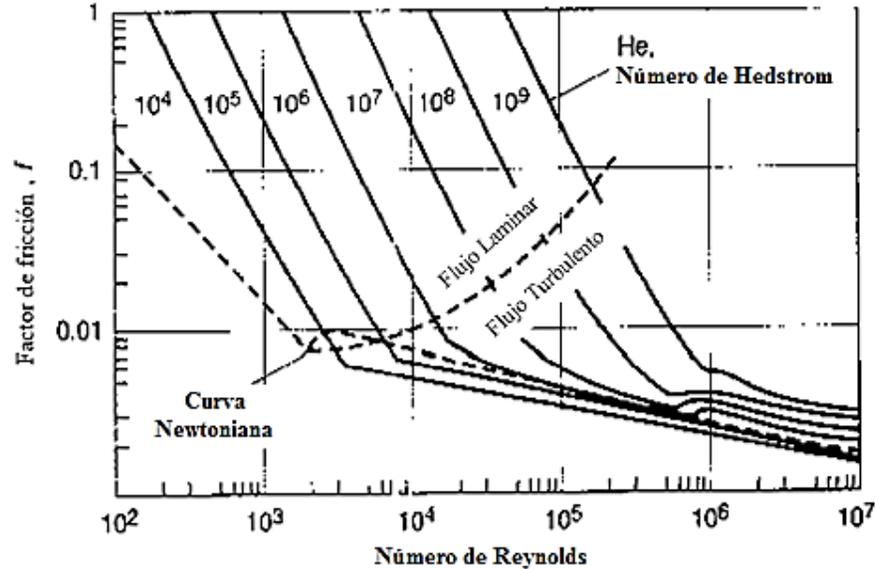
Los lodos del tratamiento de aguas residuales se caracterizan como fluido no newtoniano ya que no existe una relación proporcional entre la caída de presión y el flujo, lo que hace que la viscosidad no permanezca constante. Se ha determinado que los lodos se comportan como un plástico de Bingham, que tienen una relación lineal entre el esfuerzo cortante y el flujo únicamente después de iniciar el movimiento. Estos plásticos se describen mediante el coeficiente de tensión y el coeficiente de rigidez, que son una función del contenido de sólidos de los lodos. Entonces, para determinar la caída de presión por fricción, se debe hacer el cálculo de dos números adimensionales, el número de Reynolds y el número de Hedstrom. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 36. Relación del coeficiente de tensión y el coeficiente de rigidez, con la composición de sólidos en los lodos.



(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 37. Relación del Número de Reynolds y el Número de Hedstrom, con el factor de fricción.



(Metcalf & Eddy Inc., 2003)

#### 4. Deshidratación de lodos

Se refiere a la reducción del contenido de humedad de los lodos, a manera de obtener un sólido manejable con mayor facilidad usando palas, tractores o transportadores de banda; y con menor costo por transporte hacia el lugar de su disposición final. Se requiere deshidratar los lodos para reducir los requerimientos de agentes de carga suplementarios y eliminar los olores putrefactos que puedan surgir. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

La disposición final que se dará a los lodos determina el contenido de humedad requerido para que sea viable. Algunos rellenos requieren por lo menos 40% de sólidos para tener buena estabilidad mecánica; el tratamiento térmico o por incineración requiere al menos 35% de sólidos y para el compostaje, según el agente de carga, la composición debe estar entre 15 y 20%. (Andreoli, *et al*, 2007)

##### a. Deshidratación con centrifuga de tazón sólido

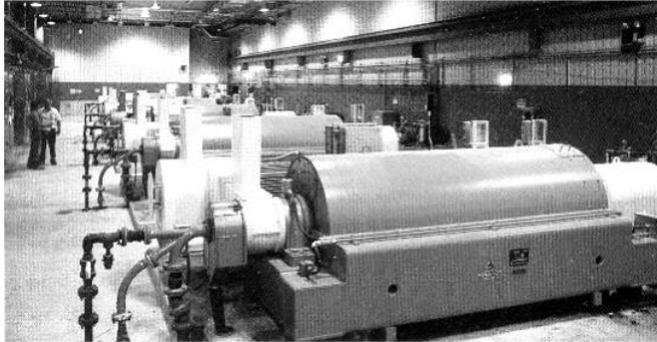
Se compone de un elemento rotatorio que recibe un flujo constante de lodos, para separarlo en una torta densa que contiene sólidos y una corriente diluida con sólidos finos. El contenido de humedad en la torta obtenida es del 70-80% y el contenido de sólidos entre 10 y 30%. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

##### b. Deshidratación con centrifuga para alto contenido de sólidos

Similar a la anterior, pero el elemento rotatorio va más lento para producir una torta más seca ya que se aumenta el tiempo de residencia y posee una voluta para generar presión.

Los métodos que involucran centrífugas requieren poco espacio y el costo inicial es más bajo, sin embargo, el consumo energético es muy elevado ya que los motores requeridos son de alta potencia. (Metcalf & Eddy Inc., 2003) Además, es necesario que los lodos pasen por un proceso de acondicionamiento previo, usualmente con adición de polímeros catiónicos. (Turovskiy; Mathai, 2006)

Figura 38. Instalación típica para deshidratación de lodos usando centrífugas.

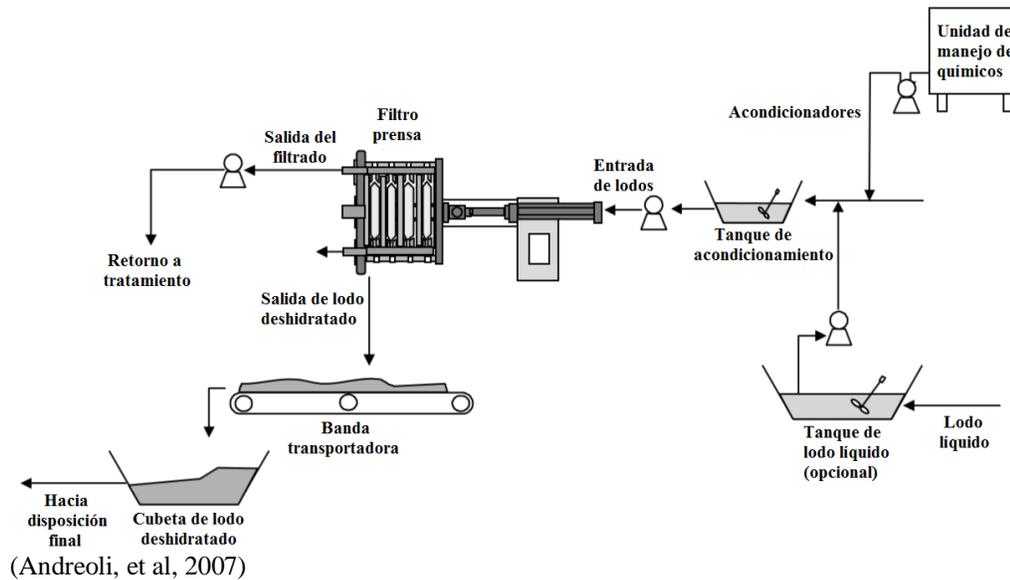


(Turovskiy; Mathai, 2006)

c. Deshidratación con filtro prensa

Su mecanismo de operación permite obtener una torta con mayor contenido de sólidos que otros equipos de acción mecánica y un efluente líquido de mejor calidad; además requiere poco consumo de compuestos químicos para el acondicionamiento previo. El tiempo de operación es de 3 a 5 horas, que se divide en 3 operaciones: llenado, filtración a máxima presión (incluso alcanzando 170 kPa) y la descarga de la torta. (Andreoli, *et al*, 2007)

Figura 39. Diagrama de proceso de deshidratación de lodos con filtro prensa.



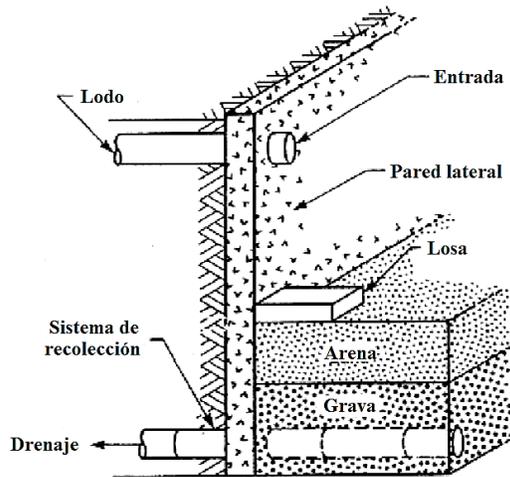
#### d. Deshidratación en camas de secado

Se considera el método más utilizado para remover el contenido de humedad en los lodos mediante operaciones de evaporación y percolación, sin tener que espesar los lodos previamente. Al finalizar el período de secado, los sólidos se remueven y pueden disponerse en rellenos o utilizarse como sólidos estabilizadores. Entre sus principales ventajas están el bajo costo y el bajo nivel de riesgos operativos, a medida en que se obtienen lodos secos con alto contenido de sólidos. La principal desventaja es la amplitud del área requerida, alteraciones climáticas y posibles olores con potencial de ser ofensivos. Los tipos de camas de secado son: de arena convencional, pavimentada, medios artificiales, asistida por vacío, solar; siendo las dos primeras las más utilizadas. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Las camas de secado convencionales con arena se diseñan a manera de colocar un volumen de lodos sobre un lecho de arena y grava que actúan como medios filtrantes para permitir únicamente el paso del agua y retener los sólidos en la parte superior. El orden de los medios filtrantes va en incremento de acuerdo a su tamaño de partícula, situando los más grandes en el fondo. Usualmente se coloca una capa de arena de 230-380 mm de espesor sobre una capa de grava de 200-460 mm de espesor. (Turovskiy; Mathai, 2006)

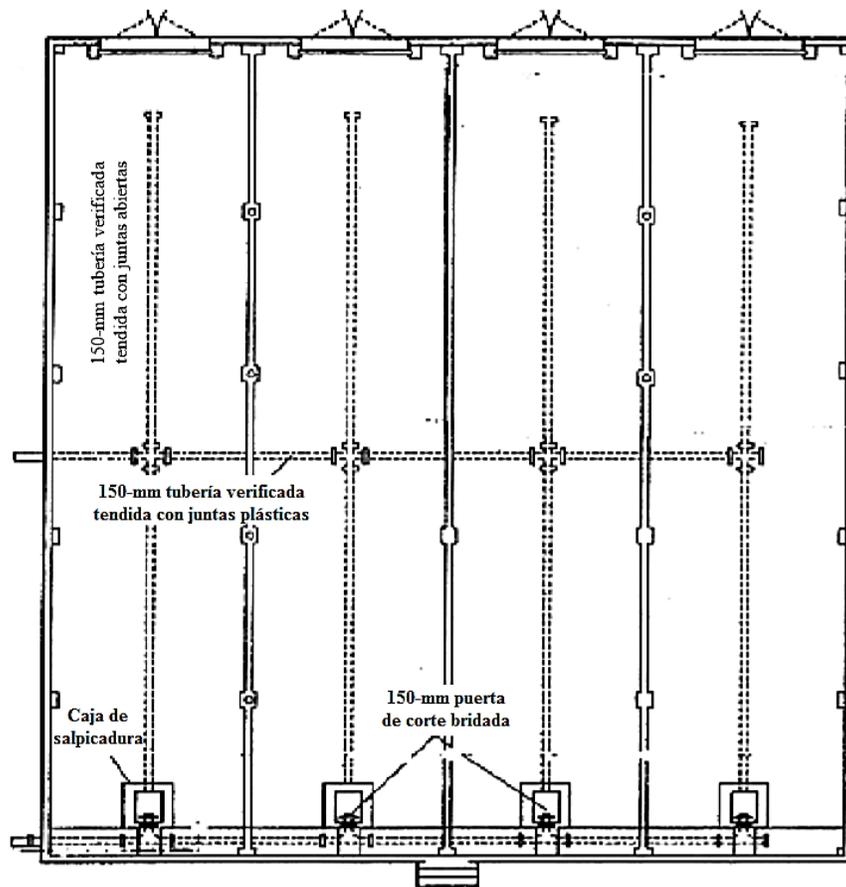
Se debe contemplar el sistema de drenado del agua que pasa a través del medio filtrante, para lo cual se coloca una tubería perforada en el fondo de la cama y se dirige, con pendiente de 1%, hacia la descarga de ese efluente. (Andreoli, *et al*, 2007) El contenido de humedad del lodo seco luego de 10-15 días de residencia en la cama, es de aproximadamente 60% bajo condiciones favorables y se puede extraer con palas manuales o de maquinaria, lo que podría provocar disminución en el espesor de la cama de arena por lo que debe reponerse la cantidad necesaria para mantener el medio filtrante. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Figura 40. Seccionamiento de un sistema de deshidratación de lodos en cama de secado convencional.



(Turovskiy; Mathai, 2006)

Figura 41. Vista planta de un sistema de deshidratación de lodos en cama de secado convencional.



(Turovskiy; Mathai, 2006)

## II. Disposición de lodos aplicable en Guatemala

El Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 «Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos» establece valores máximos permisibles para las distintas formas en que se puede disponer de los lodos.

Figura 42. Parámetros y límites máximos permisibles para lodos.

Disposición Final	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cadmio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cromo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	1500	3000	> 3000
Mercurio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	25	50	> 50
Plomo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	500	1000	> 1000

(MARN, 2006)

Parte de los compuestos removidos durante el tratamiento de aguas residuales comprenden arenas, escoria, materia sólida y biosólidos, entre otros. Los sólidos y biosólidos, son los que comúnmente se denominan lodos y resultan de las operaciones del tratamiento, en forma de líquido o una mezcla sólido-líquido que suele contener entre 0.25 y 12% (m/m) de sólidos secos. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

Los lodos constituyen de los mayores volúmenes de material a tratar, por lo que su procesamiento, reúso y disposición representan cierta complejidad y altos costos dentro de la ingeniería del tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

### JJ. Manual de operaciones

Para el manual de operaciones se utilizará la herramienta de registro y análisis “Diagrama de operaciones”. Ya que muestra la secuencia cronológica de todas las operaciones, inspecciones, tiempos permitidos y materiales que se utilizarán en la planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario. Esta herramienta muestra todos los componentes y subcomponentes del proceso principal y ofrece, a grandes rasgos, un esquema del diseño. Se utilizan dos símbolos para construir el diagrama de proceso: un círculo representa una operación y un cuadrado representa una inspección. Una operación se lleva a cabo cuando una parte bajo estudio se transforma intencionalmente y una inspección se realiza cuando la parte es examinada para determinar su cumplimiento con un estándar.

Para un análisis más detallado del proceso, se utilizará la herramienta de registro y análisis “Diagrama de flujo de procesos o de flujo operativo”. Debido al detalle de este diagrama, se implementará para cada componente del proceso principal, con el fin de mostrar las operaciones e inspecciones involucradas, además, las distancias recorridas, los retrasos y los almacenamientos

temporales. El conjunto estándar de símbolos utilizados para este diagrama es un círculo y un cuadrado para los elementos mencionados anteriormente y se incorpora una flecha que representa el transporte de un objeto de una ubicación a otra. Una D mayúscula que representa un retraso, la cual se presenta cuando una parte no puede ser procesada inmediatamente en la próxima estación de trabajo. Un triángulo equilátero representa el almacenamiento de un material. En ciertas ocasiones, puede utilizarse otros símbolos no estándar para señalar operaciones administrativas o de papeleo u operaciones combinadas.

## KK. Manual de mantenimiento

El mantenimiento industrial es el conjunto de técnicas que tienen por objeto conseguir una utilización óptima de los activos productivos, manteniéndolos en el estado que requiere una producción eficiente con gastos mínimos. (Félix, 1998)

Los objetivos principales del mantenimiento industrial son:

- Minimizar costos de operación y producción por daños y reparaciones al equipo e instalaciones.
- Maximizar el aprovechamiento de los recursos disponibles, ya sea de tipo humano, económico o tecnológico.
- Mejorar la disponibilidad de equipos que hacen posible los sistemas de producción.
- Garantizar la seguridad industrial mediante la implementación de normas de seguridad, equipos y práctica segura para la ejecución de actividades.

(Félix, 1998)

Para los sistemas, equipos y químicos a utilizar, existen rutinas generales de manejo y mantenimiento que se clasifican según su tipo: (Gustavo, 2008)

- Inspección: Verificar el funcionamiento seguro, eficiente y económico de la máquina o proceso. Son actividades que conllevan la observación del funcionamiento.
- Control: Se debe realizar control de parámetros según el Acuerdo Gubernativo 236 - 2006 “Reglamento de Descargas y reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”, para concluir si el proceso está realizando de manera eficiente o no.
- Lubricación: realizadas de acuerdo con las especificaciones del fabricante (en caso de máquinas). Reduce el frotamiento, desgaste y calentamiento de partes móviles del equipo.
- Limpieza: Constituye actividades como remover residuos, espuma, grasas, limpiar filtros, entre otros.
- Ajuste: Consecuencia directa de la inspección ya que permite detectar las condiciones inadecuadas de los equipos.

## 1. Mantenimiento preventivo

Es el que utiliza todos los medios disponibles, incluso los estadísticos, para determinar la frecuencia de las inspecciones, revisiones, sustitución de piezas claves, probabilidad de aparición de averías, vida útil, u otras. Su objetivo es adelantarse a la aparición o predecir la presencia de las fallas. (SENAL, 1991)

El propósito de este tipo de mantenimiento es evitar las fallas manteniendo los sistemas de infraestructura, equipos e instalaciones productivas en operación a los niveles y eficiencia deseados. (SENAL, 1991)

La característica principal de este tipo de mantenimiento es la de inspeccionar los equipos, detectar las fallas en su fase inicial y corregirlas en el momento oportuno. Las ventajas más destacadas que este mantenimiento ofrece, son: (Félix, 1998)

- Los equipos operan en mejores condiciones de seguridad.
- Disminución del tiempo muerto, tiempo de parada de equipos o máquinas.
- Mayor duración de los equipos e instalaciones.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de mantenimiento debido a una programación de actividades.
- Reducción del mantenimiento correctivo.

### a. Mantenimiento correctivo

Es un mantenimiento encaminado a corregir una falla que se presente en determinado momento. Las etapas que conlleva dicho mantenimiento son:

- Identificar el problema y las causas.
- Estudiar las diferentes alternativas para su reparación.
- Evaluar las ventajas y seleccionar la óptima.
- Planear reparación en función de equipo y personal disponible.
- Archivar información

(SENAL, 1991)

### b. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento que relaciona una variable física con el desgaste o estado de una máquina. El mantenimiento predictivo se basa en la medición, seguimiento y monitoreo de parámetros y condiciones operativas de un equipo o instalación. A tal efecto, se

definen y gestionan valores de pre-alarma y de actuación de todos aquellos parámetros que se considera necesario medir y gestionar (SENAL, 1991).

## LL. Normas guatemaltecas sobre el mantenimiento industrial y la seguridad ocupacional

Según el Acuerdo Gubernativo 229 – 2014 de la República de Guatemala, Reglamento de salud y seguridad ocupacional, la planta de tratamiento debe cumplir con:

### Titulo II

Capitulo II “Condiciones de los locales y ambiente de trabajo”

Artículo 15. (Superficie y cubicación)

### Titulo IV

Capitulo II “Sustancias peligrosas polvos, gases o vapores inflamables o insalubres”, Artículo 205 y 209.

### Título V

Capítulo I “Ropa de Trabajo”, Artículos 230 al 232

Capítulo II “Protección de la Cabeza”, Artículos 233 al 236

Capítulo III “Protección de la Cara”, Artículos 237 al 241

Capítulo IV “Protección de la Vista”, Artículo 242 y 243

Capítulo V “Protección Auditiva”, Artículos 244 al 248

Capítulo VI “Protección de las Extremidades Inferiores”, Artículo 249 al 253

Capítulo VII “Protección de las Extremidades Superiores”, 254 y 255

Capítulo VIII “Protección Respiratoria”, Artículos 256 al 263

Capítulo X “Del diseño de los puestos de trabajo”, Artículos 267 al 270

### Titulo IX

Capitulo I “Motores, transmisores y máquinas”, Artículo 428.

(Acuerdo Gubernativo, 2014)

## MM. Seguridad Industrial

La seguridad industrial es un área multidisciplinaria que se encarga de minimizar los riesgos en la industria. Parte del supuesto de que toda actividad industrial tiene peligros inherentes que necesitan de una correcta gestión (Herrera, 2014).

## NN. Matriz de riesgos

El método matemático propuesto por William T. Fine está previsto para el control de los riesgos cuyas medidas correctoras son de alto coste (Herrera, 2014). El proceso está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo} = \text{consecuencia} * \text{exposición} * \text{probabilidad}$$

Donde,

Consecuencia = El daño, debido al riesgo que se considera, incluyendo desgracias personales y daño de equipo o materiales.

Exposición = Frecuencia con la que se presenta la situación de riesgo.

Probabilidad = posibilidad que, una vez presentada la situación de riesgo, se origine el accidente.

## OO. Equipo de protección personal

El elemento de Protección Personal (EPP), es cualquier equipo o dispositivo destinado para ser utilizado o sujetado por el trabajador, para protegerlo de uno o varios riesgos y aumentar su seguridad o su salud en el trabajo.

Las ventajas que se obtienen a partir del uso de los elementos de protección personal (EPP) son las siguientes:

- Proporcionar una barrera entre un determinado riesgo y la persona.
- Mejorar el resguardo de la integridad física del trabajador.
- Disminuir la gravedad de las consecuencias de un posible accidente sufrido por el trabajador.

Algunos de los principales Elementos de Protección Personal muy frecuentemente utilizados en la Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se presentan a continuación:

Para la cabeza y rostro

- Casco de seguridad: Cuando se exponga a riesgos eléctricos y golpes.
- Gorro o cofia: Cuando se exponga a humedad o a bacterias.

#### Para los ojos y la cara

- Gafas de seguridad: Cuando se exponga a proyección de partículas en oficios como carpintería o talla de madera.
- Monogafas de seguridad: Cuando tenga exposición a salpicaduras de productos químicos o ante la presencia de gases, vapores y humos.
- Careta de seguridad: Utilícela en trabajos que requieran la protección de la cara completa como el uso de pulidora, sierra circular o cuando se manejen químicos en grandes cantidades.
- Careta o gafas para soldadura con filtro ocular: Para protección contra chispas, partículas en proyección y radiaciones del proceso de soldadura.

#### Para el aparato respiratorio

- Mascarilla desechable: Cuando esté en ambientes donde hay partículas suspendidas en el aire tales como el polvo de algodón o cemento y otras partículas derivadas del pulido de piezas.
- Respirador purificante (con material filtrante o cartuchos): Cuando en su ambiente tenga gases, vapores, humos y neblinas. Solicite cambio de filtro cuando sienta olores penetrantes de gases y vapores.
- Respiradores auto contenidos: Cuando exista peligro inminente para la vida por falta de oxígeno, como en la limpieza de tanques o el manejo de emergencias por derrames químicos.

#### Para los oídos

- Pre moldeados: Disminuyen 27 dB aproximadamente. Permiten ajuste seguro al canal auditivo.
- Moldeados: Disminuyen 33 dB aproximadamente. Son hechos sobre medida de acuerdo con la forma de su oído.
- Tipo Copa u Orejeras: Atenúan el ruido 33 dB aproximadamente. Cubren la totalidad de la oreja.

#### Para las manos

- Guantes de plástico desechables: Protegen contra irritantes suaves.
- Guantes de material de aluminio: Se utilizan para manipular objetos calientes.
- Guantes dieléctricos: Aíslan al trabajador de contactos con energías peligrosas.
- Guantes resistentes a productos químicos: Protegen las manos contra corrosivos, ácidos, aceites y solventes. Existen de diferentes materiales: PVC, Neopreno, Nitrilo, Butyl, Polivinil.

#### Para los pies

- Botas plásticas: Cuando trabaja con químicos.
- Botas de seguridad con puntera de acero: Cuando manipule cargas y cuando esté en contacto con objetos cortopunzantes.
- Zapatos con suela antideslizante: Cuando este expuesto a humedad en actividades de aseo.
- Botas de seguridad dieléctricas: Cuando esté cerca de cables o conexiones eléctricas.

#### Para protección corporal

- Delantal para sustancias químicas: Para labores que implican el contacto con agentes químicos.
- Delantal impermeable en PVC: Protege de peligros relacionados con labores que implican la exposición prolongada a mal tiempo y condiciones húmedas.
- Overol de tres piezas en PVC: Para trabajos industriales, construcción de carreteras, minería, agricultura y pesca.
- Tivek: Para uso en ambientes donde el riesgo de contaminación sea caracterizado por polvos, partículas o neblinas de poca toxicidad.

#### Equipo de emergencia

- Duchas de seguridad y lavajos en casos de proyecciones o derrames de químicos.

(Herrera, 2014)

## PP. Tasa interna de retorno – TIR

La tasa interna de retorno (TIR) se define como aquella tasa de interés que descuenta el valor de los futuros ingresos netos igualándolos con el desembolso inicial de la inversión. Por lo tanto, es considerada una medida de rentabilidad periódica de la inversión, a diferencia del valor presente neto (VPN), este no se mide en términos absolutos, sino que lo hace en términos relativos indicando cual es el porcentaje de rentabilidad que obtendremos por cada quetzal invertido en el proyecto.

Debido a que la TIR es una medida de rentabilidad relativa de la inversión, la confrontamos con la tasa que interés que representa el costo de oportunidad del capital para saber si el proyecto debe ser elegido o descartado. (Dumrauf, 2006)

La regla de la tasa interna de retorno consiste en aceptar un proyecto de inversión si el costo de oportunidad del capital es menor que la tasa interna de rendimiento. También, se puede definir como tasa de descuento a la cual el Valor Presente Neto iguala a cero. (Franklin Allen, Sin año)

$$TIR = i_1 + \left[ \frac{VP \cdot (i_2 - i_1)}{VP + |VN|} \right]$$

TIR = Tasa interna de retorno

VP = Es el VAN (positivo) a la tasa de actualización baja  $i_1$ .

|VN| = Es el VAN (negativo) a la tasa de actualización baja  $i_2$ .

$i_1$  = Tasa de actualización donde el VAN es positivo.

$i_2$  = Tasa de actualización donde el VAN es negativo.

(Ecuación 60)

(Rankia, 2017)

## QQ. Valor presente neto

El valor presente neto de un proyecto es el valor actual/presente de los flujos de efectivo netos de una propuesta, siendo estos flujos de efectivo netos, la diferencia entre los ingresos periódicos y los egresos periódicos. Además, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. Se debe mencionar que este valor es muy importante para la valoración de inversiones en activos fijos, a pesar de sus limitaciones en considerar circunstancias imprevistas o excepcionales de mercado. Si su valor es mayor a cero, el proyecto es rentable. Sin embargo, el valor de rendimiento será el mínimo de la inversión.

El valor presente neto depende únicamente de los flujos de efectivo del proyecto y del costo oportunidad del capital, según mencionan (Franklin Allen, Sin año), los analistas confunden el flujo de efectivo con la utilidad contable. “No suponga sin verificación que se pueden encontrar flujos de efectivo mediante manipulaciones rutinarias de cifras contables, siempre estime los flujos de efectivo después de descontar los impuestos” (Franklin Allen, Sin año).

$$VAN = -C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_T}{(1+r)^T} = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

(Ecuación 60)

(Financiera, 2018)

Así como en la Tasa Interna de Retorno existen criterios de aceptación para los proyectos a invertir, en el Valor Actual Neto, también se aplican los mismos.

## RR. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una forma de tomar en cuenta los cambios en el entorno del proyecto, adaptando así las variables a analizar y encontrar como estas nos van a recuperar la inversión dependiendo del escenario que ocurra. Existen tres escenarios en dicho análisis, los cuales son: más probable, optimista y pesimista. Por lo tanto, la decisión de invertir o no en cada escenario, no deberá basarse solamente por el cálculo del Valor Presente Neto realizado, sino en la comprensión del origen de la rentabilidad del proyecto y del posible cambio a las variables estimadas.

La finalidad del análisis de sensibilidad consiste en mejorar la calidad de la información para que el inversor, en este caso el ingenio azucarero, tenga una herramienta adicional para decidir si invierte o no en el proyecto. (Lledó, 2003).

## SS. Análisis económico

Un análisis económico es un método por el cual se analiza, sintetiza y obtienen conclusiones de proyectos o áreas de proyectos que se centran, principalmente, en la valoración de la situación económica y financiera existente, por el mismo camino, el análisis económico es un punto medular en la toma de decisiones tomando en cuenta factores básicos como flujos de efectivo, tiempo y tasas de interés. El análisis económico utiliza diferentes criterios y métodos para poder elegir la mejor alternativa para el proyecto. (Blank, 2012)

La realización de un análisis económico puede involucrar la utilización de varios elementos y herramientas. El mejor enfoque que el análisis puede tener es efectuar un procedimiento estructurado para seleccionar la mejor solución del problema, de forma general, el procedimiento para realizar un análisis económico es: (Blank, 2012)

1. Identificación y comprensión del problema; definiendo e identificando el objetivo del proyecto o análisis. (Blank, 2012)
2. Recopilación de información relevante, datos disponibles y definición de soluciones viables. (Blank, 2012)
3. Realizar estimaciones realistas de los flujos de efectivo que pueda conllevar el proyecto, tomando en cuenta factores internos o externos al análisis. (Blank, 2012)
4. Identificación de una medida económica del criterio de valor para la toma de decisiones, es decir la utilización de diferentes métodos que se adapten al problema o proyecto para así realizar conclusiones y toma de decisiones. (Blank, 2012)

5. Evaluación de cada opción, considerar factores no económicos y ajenos al problema y emplear un análisis de sensibilidad. (Blank, 2012)
6. Elección y comunicación de la mejor opción económica para realizar el proyecto. (Blank, 2012)

## TT. Análisis FODA

Un análisis FODA de una entidad consiste en un estudio mediante el cuál se realiza una evaluación a los agentes internos y externos que influyen en la entidad analizada, tanto de forma positiva como negativa. Siendo las siglas FODA lo siguiente: F – Fortalezas, D – Debilidades, O – Oportunidades, A – Amenazas. Agregando así las fortalezas y debilidades se encuentran dentro la entidad que se esté analizando, luego las oportunidades y amenazas es lo que puede afectar a la entidad de manera indirecta. (EmprendePyme, s.f.)

## UU. Análisis PESTEL

PESTEL es un instrumento que facilita la investigación y que ayuda a las compañías a definir su entorno, analizando una serie de factores cuyas iniciales son las que le dan el nombre. Se trata de los factores políticos, económicos, sociales y tecnológicos. En algunos casos, se han añadido otros dos factores, los ecológicos y los legales, aunque es muy común que se integren en alguna de las variables anteriores si así lo requieren las características del proyecto de la organización.

Esta herramienta, que se puede aplicar a numerosos casos, facilita la descripción en detalle del contexto en el que operará la organización. Ayuda a comprender el crecimiento o declive de un mercado, las dificultades y retos que puede presentar, así como a orientar la dirección y la posición del negocio de forma sencilla, sistemática y pautada. (Martín, 2017)

## VV. Cinco fuerzas de Porter

Modelo propuesto por Michael Porter en 1979, el cual consiste en una herramienta de gestión para formular un análisis de la industria y como esta se comporta. (Porter M. , 2018) Las fuerzas son:

- La posibilidad de amenaza ante nuevos competidores.
- El poder de la negociación de los diferentes proveedores.
- La capacidad para negociar con los diferentes tipos de clientes.
- Amenaza de nuevos competidores.
- La rivalidad de la industria

## V. ANTECEDENTES

El ingenio azucarero, para el que se desarrolló la propuesta del presente trabajo de graduación, es una corporación que lidera la agroindustria azucarera. Se dedica al cultivo de caña de azúcar, la producción de azúcar granulada y la generación de energía eléctrica. El complejo comercializa una diversidad de productos a nivel mundial y subproductos tales como la melaza, bagazo, cachaza y energía eléctrica. Dentro de las áreas que componen el ingenio están las oficinas administrativas y operativas, planta de producción, planta de cogeneración, planta purificadora de agua, hotel, laboratorios, clínicas, estación de bomberos, gasolinera, lavandería, talleres, bodegas, tienda de conveniencia, comedores y cocina industrial. Cada área mencionada cuenta con servicios sanitarios y aparatos que consumen agua y generan una proporción de aguas residuales.

Actualmente, se han identificado 27 fosas sépticas en las instalaciones del ingenio azucarero. Estas captan el efluente de aguas residuales tipo ordinario que provienen de actividades domésticas del ser humano. Específicamente, se originan de 12 mingitorios de pared, 29 mingitorios de porcelana, 122 inodoros de tanque, 55 inodoros de fluxómetro, 192 lavamanos, 165 duchas, 3 lavadoras, 11 pilas y 4 lavatrastos. Las instalaciones se abastecen de agua proveniente de un pozo en el terreno de la empresa. Las fosas reciben un efluente variable durante el día que depende de la hora de descanso y de almuerzo, así como también del momento en el que se da un cambio de turno. Cada servicio sanitario tiene un encargado que hace la limpieza aproximadamente tres veces en un turno de ocho horas. Por cuestiones de control laboral, la persona a cargo también tiene a responsabilidad de llevar un registro del personal que hace uso del servicio y en qué momento ingresa y sale del mismo.

Las fosas sépticas identificadas cuentan con un rótulo que muestra el número asignado para esa fosa y su respectivo pozo de absorción. Se agregan enzimas hidrolíticas especiales para el tratamiento de fosas sépticas, trampas de grasa y drenajes ya que degradan materia orgánica. Se agregan mensualmente con el fin de acelerar la descomposición de materia orgánica, produciendo ocho billones por gramo de bacterias aeróbicas y anaeróbicas, las cuales hidrolizan las proteínas ayudando a la descomposición rápida de los desechos orgánicos. A pesar de su uso, los análisis microbiológicos y fisicoquímicos realizados en el agua residual dentro de las fosas sépticas demuestra una alta concentración de E.coli, nitrógeno y la presencia de materia flotante. Los representantes del ingenio han considerado la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales para el efluente que es alimentado a las fosas sépticas. La ubicación de la planta de tratamiento es al sur de la planta de producción y alejada de las áreas en las cuales labora el personal, además de ser considerado el punto más bajo de toda el área.

Con respecto a la cocina industrial, se utiliza GLP para la cocción de alimentos. El sistema se compone de 2 cilindros de 1000 galones de capacidad, que suministran el gas a los distintos equipos que lo requieren.

El dato proporcionado por personal del ingenio fue 2400 galones/mes, argumentando que la mayoría de los operarios lleva sus alimentos desde casa, con lo que el consumo de gas no es elevado.

Antes de iniciar con este proyecto, los asesores del ingenio comunicaron que ya se habían realizado pruebas con un biodigestor a mediana escala, usando las aguas residuales recogidas de las fosas sépticas en las que se tratan actualmente. El proceso no fue puesto en marcha ni monitoreado adecuadamente, sin embargo, se concluyó que se produjo biogás adecuado para combustionar.

## A. Características fisicoquímicas y microbiológicas de tres fosas sépticas

Figura 43. Resultados del análisis ambiental y microbiológico para la fosa séptica del área de baños de bodega muestreada el 19 de octubre de 2017.

<i>Determinaciones fisicoquímicas</i>	Agua residual ordinaria tomada de fosa séptica de área baño de bodegas #3 Punto 1 UTM 15P 0732905E 1575716N Altura 166mts (± 5) SNM (No. Lab. 1721080)		Artículo No. 29 Cuerpo receptor Antes 2006 Acuerdo Gubernativo 236-2006 (06/05/2006).			
			Fecha Máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
Demanda química de oxígeno (DQO) (°)	225.0	mg O <sub>2</sub> /L	No regulado			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (°)	130.0	mg O <sub>2</sub> /L	No regulado	No regulado	No regulado	200
Relación DQO-DBO	1.7		No regulado	No regulado	No regulado	No regulado
Sólidos sedimentables (°)	0.5	ml/L	No regulado	No regulado	No regulado	No regulado
Materia flotante	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos en suspensión (°)	54.0	mg/L	600	400	150	100
Grasas y aceites	8.0	mg/L	100	50	25	10
Color verdadero	61.0	Pt/Co	1300	1000	750	500
Nitrógeno total	97.0	mg/L	100	50	25	20
Fósforo total	9.1	mg/L	75	30	15	10
Coliformes fecales (°)	94000	NMP/100ml	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>

SIGLAS USADAS: SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. 2012.  
SQ: Método Spectroquant.

(°) Análisis acreditados conforme a la norma COGUANOR NTG/ISO/IEC/17025

Código: ISA20171001

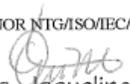
Licda.  Jacqueline Morales  
Jefe de Laboratorio  
FQB Laboratorios  
Química Bióloga  
Colegiado No. 3777



Figura 44. Resultados del análisis ambiental y microbiológico para la fosa séptica del área de baños de vestidores muestreada el 19 de octubre de 2017.

<i>Determinaciones fisicoquímicas</i>	Agua residual ordinaria tomada en fosa séptica de baño de vestidores #1 Punto 2 UTM 15P 0732638E 1575411N Altura 174mts (± 3) SNM (No. Lab.1721081)		Artículo No. 20 Cuerpo receptor Antes 2006 Acuerdo Gubernativo 236-2006 (06/05/2006):			
			Fecha Máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
Demanda química de oxígeno (DQO) (°)	100.0	mg O <sub>2</sub> /L	No regulado			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (°)	28.0	mg O <sub>2</sub> /L	No regulado	No regulado	No regulado	200 Si Cumple
Relación DQO-DBO	3.6		No regulado	No regulado	No regulado	No regulado
Sólidos sedimentables (°)	0.1	ml/L	No regulado	No regulado	No regulado	No regulado
Materia flotante	<b>Presente</b>	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
			No Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple
Sólidos en suspensión (°)	38.0	mg/L	600	400	150	100
			Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple
Grasas y aceites	2.0	mg/L	100	50	25	10
			Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple
Color verdadero	39.0	Pt/Co	1300	1000	750	500
			Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple
Nitrógeno total	<b>100.0</b>	mg/L	100	50	25	20
			Si Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple
Fósforo total	3.6	mg/L	75	30	15	10
			Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple	Si Cumple
Coliformes fecales (°)	<b>540000</b>	NMP/100ml	< 1x10 <sup>6</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
			Si Cumple	No Cumple	No Cumple	No Cumple

SIGLAS USADAS: SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. 2012.

SQ: Método Spectroquant.

(°) Análisis acreditados conforme a la norma COGUANOR NTG/ISO/IEC/17025

Código: ISA20171001

  
Licda. Jaqueline Morales  
Jefe de Laboratorio  
FQB Laboratorios  
Química Bióloga  
Colegiado No. 3777



Figura 45. Resultados del análisis ambiental y microbiológico para la fosa séptica del área de baños de tornos muestreada el 19 de octubre de 2017.

Determinaciones fisicoquímicas	Agua residual ordinaria tomada de fosa séptica baños de tornos #2 Punto 3 UTM: 15P 0732587E 1575547N Altura 180mts (± 3) SNM (No. Lab. 1721082)		Artículo No. 20 Cuerpo receptor Antes 2006 Acuerdo Gubernativo 236-2006 (06/08/2006), Fecha Máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			No regulado			
Demanda química de oxígeno (DQO) (°)	128,0	mg O <sub>2</sub> /L	No regulado			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (°)	50,0	mg O <sub>2</sub> /L	No regulado	No regulado	No regulado	200
Relación DQO-DBO	2,6		No regulado	No regulado	No regulado	No regulado
Sólidos sedimentables (°)	0,1	ml/L	No regulado	No regulado	No regulado	No regulado
Materia flotante	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos en suspensión (°)	2,0	mg/L	600	400	150	100
Grasas y aceites	2,0	mg/L	100	50	25	10
Color verdadero	52,0	Pt/Co	1300	1000	750	500
Nitrógeno total	75,0	mg/L	100	50	25	20
Fósforo total	2,8	mg/L	75	30	15	10
Coliformes fecales (°)	49000	NMP/100ml	< 1x10 <sup>6</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>

SIGLAS USADAS: SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. 2012.

SQ: Método Spectroquant.

(°) Análisis acreditados conforme a la norma COGUANOR NTG/ISO/IEC/17025

Código: ISA20171001

  
Licda. Jaqueline Morales  
Jefe de Laboratorio  
FQB Laboratorios  
Química Bióloga  
Colegiado No. 3777



## B. Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) en un complejo comercial y residencial

El tratamiento secundario anaerobio propuesto en el trabajo de graduación “Rediseño de las plantas de tratamiento aeróbico y anaeróbico de aguas residuales y creación de programa de educación ambiental de un complejo comercial y residencial”, consiste en dos filtros anaerobios de flujo ascendente que trabajan en serie. Estos tienen volúmenes de 19.17 m<sup>3</sup>, tiempo de retención hidráulica de 4.0 horas y su eficiencia global de remoción de DBO es del 56.50%. Los filtros fueron diseñados para tratar un caudal promedio de 230 m<sup>3</sup>/d. Se estima la producción de 53.13 m<sup>3</sup>/d biogás y de 3.84 m<sup>3</sup>/d de lodos como subproductos. Las aguas tratadas son de tipo doméstico y se considera que los niveles de sus parámetros contaminantes son similares a los del ingenio azucarero, debido al uso que reciben. La concentración de salida de las aguas residuales esperada es de 169.14 mg/L de DBO, parámetro que cumpliría con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Melgar, et. al. 2017).

## C. Laguna anaerobia de estabilización para tratamiento de aguas residuales industriales

La empresa Guate Verde, S. A. opera actualmente una laguna anaerobia de estabilización para el tratamiento de aguas residuales de una empresa arrocera en Villa Nueva, Guatemala. La mayor parte de las aguas por tratar provienen de los procesos de descascarillado, lavado y precocido de arroz y cuentan con altas concentraciones de DBO (8,000 mg/L) y DQO (12,000 mg/L), además de un pH ácido (4.2). El volumen nominal de la laguna es de 7,200 m<sup>3</sup>, con dimensiones de 45 m x 25 m y 5.5 m de profundidad. El tiempo de retención de líquidos es de 40 días y los lodos tardan años en descargarse. La concentración de DBO se reduce hasta 900 mg/L en la laguna, por lo que se aplica un tratamiento posterior de lodos activados para reducir la concentración hasta parámetros aceptables por la legislación nacional. Como subproducto, se genera alrededor de 3,500 m<sup>3</sup>/d de biogás, con un contenido de 62 a 68 % de metano. Este se aprovecha para la generación de energía eléctrica. Para la recolección del biogás, se utiliza una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) con 1 mm de grosor que cubre la laguna por la parte superior. Para la protección de los suelos, se utiliza una geomembrana del mismo material y grosor de 1.5 mm que cubre la laguna por la parte inferior.

## D. Cinética de reacción durante el proceso de desinfección

La concentración inicial de cloro disminuye a lo largo del tiempo durante el proceso de desinfección. Se han realizado estudios para determinar la expresión cinética de este proceso, por lo que se han evaluado distintos modelos. Se ha partido de los modelos más simples para reacciones de orden n, encontrando los parámetros k (constante de velocidad) y n (orden de reacción) pero los datos experimentales no se ajustan (Haas & Karra, 1984).

El modelo que logró ajustarse a los datos experimentales se basa en dos reacciones paralelas de primer orden. Esto se debe a la presencia de dos grupos de compuestos reductores presentes en el agua, unos que logran una reducción rápida, y otros cuya velocidad de reacción es menor. Como muestras se utilizaron efluentes secundarios de tres plantas de tratamiento de agua de tres ciudades distintas. Al analizar 17 sets de datos para la desinfección con hipoclorito, en 14 se obtuvo un coeficiente de correlación mayor a 0.99 y solo un set de datos presenta un valor menor al 0.85. El estudio determina los valores para los tres parámetros necesarios para establecer el modelo cinético y se muestran en la Tabla 8 (Haas & Karra, 1984).

Tabla 24. Resumen de las características de los efluentes de agua residual analizados en (Haas & Karra, 1984) y el número de muestras analizadas.

	Peoria			Morton			Washington		
	Máx.	Prom	Mín.	Máx.	Prom	Mín.	Máx.	Prom	Mín.
NH <sub>4</sub> - N (mg/L)	19.4	10.5	7.1	2.0	1.4	0.3	9.4	7.2	6.3
N total (mg/L)	29.6	15.0	9.8	17.6	13.4	7.4	26.7	16.9	12.8
pH	7.7	7.5	7.4	7.8	7.6	7.4	8.0	7.7	7.4
Muestras analizadas	6			5			6		

$$C(t) = C_0 [x \exp(-k_1 t) + (1 - x) \exp(-k_2 t)] \quad (\text{Ecuación 61})$$

Donde:

$C_0$  es la concentración inicial de cloro activo

$C$  es la concentración de cloro activo en el tiempo  $t$

$t$  es el tiempo

$k_1$  es la constante de velocidad para el decaimiento rápido

$k_2$  es la constante de velocidad para el decaimiento lento

$x$  es la fracción de cloro que reaccionará de forma rápida

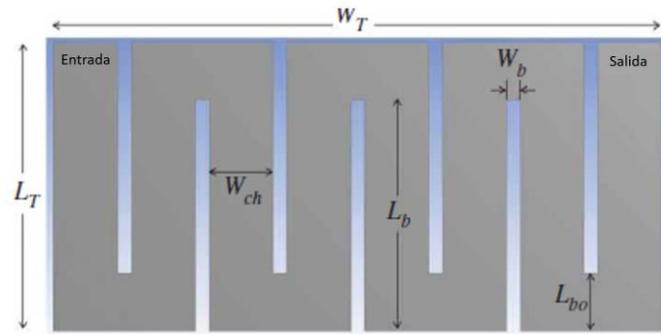
Tabla 25. Parámetros cinéticos propuestos por (Haas & Karra, 1984)

Parámetro	$k_1$ (1/s)	$k_2$ (1/s)	$x$
Valor	0.0167	0.00005	0.3

## E. Dimensionamiento del tanque de contacto (reactor tipo flujo pistón)

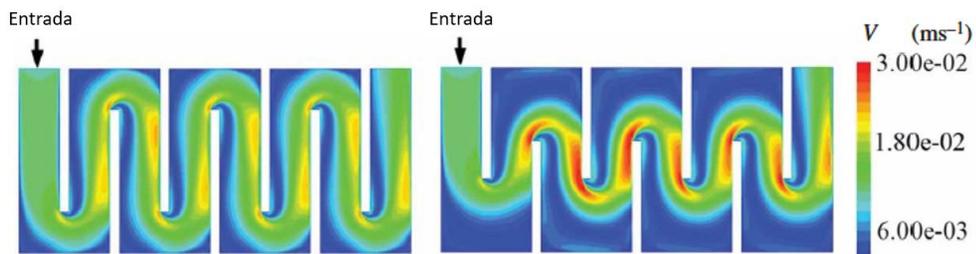
En los libros como (Metcalf & Eddy, 2014) y (Davis, 2010) se recomiendan algunas relaciones para el dimensionamiento del tanque de cloración, por ejemplo, una relación de  $L/W_{ch} = 40$  y una relación  $H/W_{ch} = 3$ . Sin embargo, no se habla de la geometría que debe utilizarse para los deflectores que dividen el tanque en varios canales y lograr la forma de un único canal serpenteado. En el estudio realizado por (Taylor, Carlston, & Karan, 2015) se utilizaron simulaciones por medio de técnicas de CFD y encontraron que la eficiencia hidráulica se optimiza cuando  $L_{bo} \approx W_{ch}$ . Lo que buscaron fue reducir las zonas muertas en el tanque, y obtuvieron el resultado que se muestra en la Figura 12. Cuando el valor de  $L_{bo} / W_{ch}$  se aleja de 1, las compresiones y expansiones se hacen más bruscas (Taylor, Carlston, & Karan, 2015).

Figura 46. Dimensiones en un tanque de contacto para el proceso de desinfección.



Tomado de: (Taylor, Carlston, & Karan, 2015)

Figura 47. Simulación del flujo en un tanque de contacto para  $L_{bo} / W_{ch} = 1$  y  $L_{bo} / W_{ch} > 1$



Tomado de: (Taylor, Carlston, & Karan, 2015)

## F. Aprovechamiento de biogás en comunidades y agricultura

### 1. Sistema Flexi Biogás

Se trata de un sistema sencillo que utiliza una bolsa plástica adaptada a un túnel de invernadero en el que ocurre la degradación de materia orgánica contenida en desechos. En Kenia, Biogas International ha instalado 200 de estos sistemas a partir del 2011. Posteriormente a eso, el Fondo Internacional para el Desarrollo de la Agricultura (IFAD) se alió con Biogas International para continuar instalando sistemas Flexi Biogás en granjas, a manera de utilizar los desechos animales como materia orgánica a degradar. Asimismo, los sistemas fueron instalados en escuelas, degradando desechos humanos y de alimentos para producir energía eléctrica. (IFAD, 2012)

## 2. Caso AgroBautista

Agropecuaria Bautista SRL es una empresa dominicana que se dedica a la crianza de cerdos, con una población total de 16000 ejemplares. A partir de 1981, la empresa empezó a utilizar lagunas de oxidación para reducir la carga contaminante de los desechos porcinos; sin embargo, en estos sistemas no se reducía la emisión de gases de efecto invernadero, por lo que se decidió implementar 2 biodigestores en serie, ocurriendo en el primero de ellos (144 m<sup>3</sup>) la etapa hidrolítica y en el segundo (4500 m<sup>3</sup>) las otras tres etapas de la digestión. El biogás obtenido se utiliza para generación de electricidad y para cocinar, además, el calor producido por los generadores se aprovecha en ambientes para confort de los animales. Se construyó una laguna para almacenar los lodos obtenidos por el proceso y una cama de secado para convertirlos en biofertilizante útil, mientras el líquido lixiviado también se destinó a los cultivos. (GreEnergy)

## G. Aprovechamiento de biogás en Guatemala

### 1. Gabiosa

Es una planta de biogás instalada en la Industria de Jabones y Detergentes Las Palmas S.A. Su objetivo es degradar los desechos del proceso industrial de la palma de aceite, generando 1 MW de energía. Además de usar el agua residual para fertirriego. (Las Palmas, S.A., 2012)

### 2. GuateVerde Ingeniería S.A.

Es una empresa perteneciente al Grupo Bigor, que incentiva la instalación de digestores que degraden materia orgánica contenida en desechos de empresas de la agroindustria, con el fin de reducir la cantidad de contaminantes depositados en basureros o en vías acuática, al mismo tiempo en que se obtiene biogás aprovechable para generar energía eléctrica o térmica. (PRONACOM, 2016)

## H. Manual de operación y mantenimiento

Como parte del manual de operaciones, se debe llevar un registro del equipo y tanques necesarios para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales. De igual forma, se debe archivar las fichas técnicas con las especificaciones que brindan los proveedores. Por el momento, el ingenio no cuenta con dicho registro.

El plan de mantenimiento que se trabaja en la actualidad en el ingenio azucarero es por medio del sistema SIGES, el cual permite planificar el mantenimiento que se debe llevar a cabo, el tiempo total de la operación y la frecuencia en la que se debe realizar. Por medio de esta herramienta, los operarios reciben una alerta en el momento que se debe realizar el mantenimiento de determinado equipo.

El ingenio azucarero no presenta un formato físico establecido para la descripción de los riesgos ni del mantenimiento dentro de las instalaciones.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico

#### 1. Etapa preliminar de investigación

- a. Se hizo una revisión bibliográfica en libros de ingeniería sanitaria, trabajos de graduación, artículos científicos y páginas web sobre los procesos físicos, químicos y biológicos necesarios para tratar aguas residuales.
- b. Se compiló la información en el marco teórico del presente Trabajo de Graduación.
- c. Se llevó a cabo una reunión, presencial o vía teléfono, cada 15 días con el Supervisor del Departamento de Servicios Administrativos.
  - i. Se establecieron los objetivos, general y específicos, el alcance del trabajo a realizar y sobre futuros cambios en las instalaciones de los servicios sanitarios.
  - ii. Se consultó acerca de los objetos y materiales que bloquean las tuberías de aguas residuales.
- d. Se hizo entrevistas a los representantes de cada área o departamento en el ingenio.
  - i. Se determinó la cantidad de personal laborando en el sector, para contabilizar los accesorios sanitarios.
  - ii. Se identificaron los compuestos que componen las aguas residuales de cada fosa séptica como jabones, grasas, sangre, medicamentos, visitando cada uno de los sanitarios.
- e. Se hizo una visita al ingenio azucarero para conocer el área de interés en la que se acordó con el supervisor de servicios administrativos. Usando *Google Maps*, se determinaron las coordenadas del área.
  - i. Se tabularon los límites geográficos del área del interés.
  - ii. Se hizo una visita en la que se realizó un estudio topográfico con una estación total, con el apoyo de un estudiante de ingeniería civil de 5to. Año de la Universidad del Valle de Guatemala.
  - iii. Se determinaron los puntos límites del ingenio que abarquen las 27 baterías de baños (ver Figura 117 página 385).

- iv. Se elaboró un gráfico de nivel utilizando el programa Civil 3D, con los puntos analizados el cual permite tener las pendientes desde una fosa séptica hacia el área de interés para la construcción de a PTAR.
- v. Se ubicaron los puntos con el máximo desnivel dentro del área de interés mediante un análisis de pendientes (ver Figura 118 página 386).
- vi. Se eligió la ubicación geográfica exacta de mayor desnivel para colocar la caja colectora de caudal (ver Figura 119 página 387).

## 2. Cálculo del caudal teórico actual de aguas residuales

- a. Se visitó el ingenio azucarero para conocer el funcionamiento, normas, productos, extensión y manejo de los recursos dentro del ingenio.
- b. Se solicitó los registros en formato de tabla de las visitas a los 3 principales servicios sanitarios por 4 semanas. Estos brindaron la siguiente información:
  - i. Servicio utilizado: Inodoro o mingitorio
  - ii. Fecha y hora de ingreso al baño
- c. Se tabuló dicha información en dos tablas de Excel.
  - i. Se tabuló el número de visitas, tanto a los mingitorios y sanitarios, a lo largo del día, durante tres semanas.
- d. Se realizaron visitas para obtener las coordenadas estimadas de las 27 fosas sépticas en el ingenio azucarero.
  - i. Se visitó cada caja de registro de las fosas sépticas dentro del ingenio azucarero.
  - ii. Usando *Google Maps* se determinaron las coordenadas del área.
  - iii. Se tabuló la altitud y latitud junto con el nombre y número de fosa séptica.
- e. Se realizaron visitas a todos los servicios sanitarios que descargan a las fosas sépticas competentes al estudio para cuantificar los accesorios sanitarios en cada uno.
- f. Se solicitó la cantidad de personal laborando dentro de las instalaciones del ingenio azucarero para el 2015 al 2017 en el Departamento de Recursos Humanos.
  - i. Se tabuló el año y el número de personas contratadas.
  - ii. Se calculó el crecimiento porcentual en cada año (Ecuación 78).
- g. Se determinó teóricamente el caudal actual que ingresa a la PTAR por colaborador al día.
  - i. Por el método de dotación, se usaron datos típicos de generación de aguas residuales por actividad o accesorio sanitario según sea pertinente.
    - 1) En Excel, se siguieron procesos distintos para los servicios y los accesorios que generen aguas residuales dentro del ingenio azucarero. Dentro de los servicios está el hotel, la estación de combustible, tienda, lavandería y hotel. Para los accesorios se consideró el mingitorio de

- pared y el de porcelana, inodoro de tanque y de fluxómetro, lavamanos, ducha, lavadora automática con carga al frente, pila y lavatrastos.
- 2) En la tabla con los servicios descritos se tabuló la cantidad de unidades que generan aguas residuales y el caudal diario por unidad.
  - 3) Se multiplicó ambas columnas para obtener el caudal diario de dichos servicios en litros/día (Ecuación 72).
  - 4) En la tabla con los accesorios se tabuló la cantidad de accesorios en cada fosa séptica.
  - 5) Se elaboró una tabla con los caudales de consumo de agua para cada accesorio en litros/segundo a partir de la frecuencia de uso de los accesorios, agua consumida por uso y unidades disponibles.
  - 6) Se multiplicó el caudal de aguas por la cantidad de cada accesorio en cada fosa séptica para obtener el consumo de agua (Ecuación 68).
  - 7) Se sumaron los caudales del paso anterior para cada fosa séptica y accesorio.
  - 8) Se sumaron los caudales obtenidos de cada fosa séptica para calcular el caudal de aguas consumida por los accesorios en litros/segundo.
  - 9) Se calculó el caudal diario de aguas residuales del paso anterior, en litros/día, y se le aplicó el coeficiente de recuperación de 0.85 (Ecuación 71).
  - 10) Se sumó el caudal de aguas residuales de los servicios y de los accesorios con el objetivo de calcular el caudal total promedio de generación de aguas residuales.
  - 11) Dada la cantidad de personas contratadas para el 2017, se dividió el caudal del paso anterior entre este valor.
- ii. Por el método de Hunter, se usaron datos típicos de consumo de aguas, el caudal actual de consumo de agua potable en litros por segundo.
- 1) En Excel, se hizo una tabla de referencia con el consumo de agua por cada accesorio. De no tener este valor, se investigó el caudal de consumo para el respectivo instrumento sanitario.
  - 2) Se asignó las respectivas Unidades Hunter (UH) según el caudal, utilizando una tabla con dichos datos.
  - 3) Se creó otra tabla en la cual se presentan las cantidades de los accesorios para las 27 fosas sépticas.
  - 4) Se multiplicó cada UH por el número de accesorios y equipos sanitarios para cada fosa séptica (Ecuación 74).
  - 5) Se sumó las UH para cada fosa séptica y para cada accesorio.

- 6) Se sumó las UH resultantes de todas las fosas sépticas.
- 7) Se usó la tabla del paso 2) para determinar el caudal probable de consumo de agua para la totalidad de los servicios sanitarios y de limpieza en el ingenio azucarero. Debido a que las tablas no poseen la magnitud de UH resultante, se buscó el caudal de la UH más grande que había y la UH restante. Los caudales se sumaron.
- 8) El caudal total de consumo de agua se multiplicó el por un factor de retorno de 0.85 con el fin de calcular el caudal de aguas residuales producidas en el ingenio en L/s (Ecuación 71).
- 9) Se calculó el caudal actual de aguas residuales en litros/día.

### 3. Cálculo del caudal teórico futuro de aguas residuales

- a. Se proyectó una planta de tratamiento para un período de 15 años. Para ello se calculó la cantidad de colaboradores con los que contará el ingenio azucarero en un plazo de 15 años con un crecimiento poblacional del 1% (Ecuación 79).
- b. Al parámetro obtenido por el método por dotación en litros/persona/día se le multiplicó el personal contratado en el período de 15 años para determinar el caudal promedio proyectado en L/día (Ecuación 80).
- c. Para calcular los caudales máximos y mínimo se usaron factores dados por la bibliografía, así como coeficientes según la población generadora de aguas residuales.
  - i. El caudal mínimo se calculó a partir de la multiplicación del caudal promedio por un factor de 0.5 (Ecuación 81).
  - ii. El caudal máximo se calculó a partir de la multiplicación del valor máximo por el coeficiente de Harmon. Dado el número de personas contratadas al final del período de 15 años, se usa la expresión para calcular el coeficiente mencionado (Ecuación 82).
  - iii. El caudal máximo extraordinario se calculó a partir de la multiplicación del valor máximo por un factor de seguridad de 1.5 (Ecuación 84).

### 4. Diseño de la trampa de aceite y grasas

- a. Se caracterizó el aceite y grasas en las aguas residuales de manera que se conozca su:
  - i. Densidad en  $\text{kg/dm}^3$
  - ii. Velocidad de ascenso en m/h en función de la densidad
  - iii. Relación del área superficial de la trampa y el caudal en  $\text{m}^2/(\text{L/s})$  en función de la densidad

- iv. Concentración inicial media de aceite y grasas en mg/L
  - v. Diámetro del glóbulo de aceite en mm
  - vi. Eficiencia o porcentaje de remoción de aceite y grasas
- b. Se dimensionó el tanque a partir de parámetros de diseño dados por la bibliografía.
- i. Se calculó el área superficial a partir del caudal promedio que se alimenta a la planta de tratamiento y la relación del paso 1.
  - ii. Con una relación ancho y largo de 1.5 y el área superficial, se calculó el largo y, seguidamente, el ancho del tanque separador de grasas.
  - iii. Se calculó el volumen del tanque a partir del tiempo de retención por gravedad sugerido, 10 min, y el caudal promedio.
  - iv. Con el volumen y área superficial, se obtuvo la altura del tanque.
  - v. Se indicó el espesor de la cubierta de la trampa, 60 mm.
  - vi. Se indicó el diámetro del tubo de descarga de aguas residuales, 200 mm.
- c. Se determinó el factor de compensación, F, como el producto entre F1 y F2.
- i. El factor de compensación para cortocircuito es 1.20.
  - ii. El factor de compensación para turbulencia está en función de la relación entre la velocidad horizontal y la velocidad de ascenso del glóbulo de aceite (Ecuación 88).
- d. Se calcularon las áreas mínimas de la trampa de aceite y grasas para corroborar el diseño.
- i. Dado el caudal de descarga del tanque y la velocidad horizontal, se estableció el área transversal mínima.
  - ii. Dado el factor de compensación, el caudal promedio y la velocidad de ascenso, se estableció el área horizontal mínima (Ecuación 89).
- e. Se diseñó la pantalla de distribución del agua residual alimentada a partir de parámetros de diseño indicados por la bibliografía, tales como:
- i. Diámetro de los orificios de distribución
  - ii. Separación de orificios entre centros
  - iii. Altura de la pantalla por encima del fondo del tanque
  - iv. Ancho de la pantalla
  - v. Alto de la pantalla
- f. Dados los parámetros, se calculó el número de filas y columnas de orificios.
- g. Se determinó si la relación entre el área de los orificios y la transversal era la adecuada.
- i. Al multiplicar los datos del paso anterior, se obtuvo el número de orificios.
  - ii. La cantidad del paso a se multiplicó por el área de un orificio para obtener el área de los orificios.
  - iii. Se calculó el cociente del área de los orificios y la transversal y se comparó con el rango permisible de 3 al 7%.

- h. Se determinó la altura del agua sobre el vertedero de salida en función del caudal y la longitud.
- i. Se corroboró el tiempo de retención, al calcular el volumen del tanque con las dimensiones elegidas sobre el caudal.

## 5. Diseño del cribado grueso

- a. Se eligió el perfil de las barras para una limpieza manual.
- b. Se determinó los parámetros para conocer la pérdida de energía en una rejilla limpia.
  - i. Se eligió una velocidad de aproximación en la alimentación del canal de 0.3 m/s, un ángulo de la rejilla con la horizontal de  $40^\circ$ , un espaciamiento entre barras de 2.50 cm y un factor de forma de las barras de 1.79.
  - ii. Se calculó la pérdida de carga para las rejillas limpias y sucias.
- c. Se dimensionó la criba para remover sólidos como toallas, sanitarias, bolsas, papel y cabello.
  - i. Se calculó el área transversal del agua en el canal como el caudal sobre la velocidad de aproximación al canal.
  - ii. Se estableció el ancho del canal y se calculó la altura del agua a partir de la división entre el área transversal sobre el ancho.
  - iii. Se calculó la longitud de la rejilla con el cociente del dato del paso (b) sobre el coseno del ángulo de inclinación (Ecuación 109).
  - iv. Se obtendrá el número de barras requeridas utilizando el ancho transversal del canal, de cada barra y su espaciamiento (Ecuación 106).
- d. Se establecerán los flujos de agua y sólidos salientes del cribado.
  - i. Se dispuso de las propiedades del material retenido como el porcentaje de humedad, peso específico, densidad y volumen removido, según lo indique la literatura.
  - ii. Se calculó el caudal de los sólidos removidos a partir del caudal de alimentación y el volumen removido.
  - iii. Se calculó el flujo másico de los sólidos removidos a partir del caudal y la densidad.
  - iv. Mediante un balance de masa, se calculó el flujo másico del agua descargada.
- e. Se indicó el porcentaje de remoción de DBO para el proceso.

## 6. Diseño del canal Parshall

- a. Se calculó el caudal promedio de aguas residuales al finalizar el período de 15 años, en litros/segundo.

- b. Se consultó una tabla en donde se determinó el ancho de garganta  $W$  en base al caudal.
- c. Una vez se estableció el ancho de garganta se consultó una tabla de dimensionamiento de la cual se tomaron las medidas de un canal Parshall identificadas por las variables  $A, B, C, D, E, F, G, K, N, R, M, P, X, Y$ , y  $H_m$ .
- d. Se asumieron los parámetros de profundidad de sumergencia  $H_b/H_a$  y la profundidad del flujo de descarga,  $H$ , como 0.6 a 0.4, respectivamente.
- e. Se calcularon las variables  $H_a$  y  $H_b$  a partir del caudal promedio y la relación  $H_b/H_a$ .
- f. Se calculó la elevación de la cresta por encima del fondo del canal,  $X$ , como la resta entre  $H$  y  $H_b$ .
- g. Utilizando  $W$  y  $H_b/H_a$ , se determinó la pérdida de carga,  $h$ , en la curva consultada.
- h. Se sumó la  $H$  y  $h$  para conocer la profundidad de aguas arriba sobre el fondo del canal.
- i. Se sumó el largo de las secciones de transición, convergente, garganta y divergente para establecer el largo del canal Parshall.

## 7. Diseño del tanque de homogeneización del caudal

- a. Para conocer la capacidad necesaria del tanque, se halló el volumen entre el caudal máximo y mínimo diario producido por una fosa séptica para 8 días.
  - i. Debido a que se conoce el aporte al caudal por fosa séptica según el método de Hunter y por dotación, se eligió la fosa con mayor aporte e información tabulada respecto a las visitas de los colaboradores.
  - ii. En Excel, se tabuló las visitas a los sanitarios en cada momento del día, tanto para el uso del inodoro y mingitorio. Se asumió que, en cada visita, los colaboradores usan el lavamanos.
  - iii. Se calculó el caudal en cada momento mediante la multiplicación del caudal del accesorio por el factor de retorno de 0.85 por la visita registrada (Ecuación 112).
  - iv. Se sumaron los caudales acumulados para cada día.
  - v. En un solo gráfico se colocaron los caudales acumulados para cada momento del día.
  - vi. Se promediaron los caudales de aguas residuales en cada hora del día y el resultado se multiplicó por los segundos que existen en una hora para obtener el volumen de aguas residuales generado (Ecuación 113).
  - vii. Se obtuvo el volumen acumulado en un día.
  - viii. Se graficó el volumen y la hora del día.
  - ix. En el gráfico, se obtuvo el volumen requerido para la homogeneización.
    - 1) Se trazó una línea recta entre el punto inicial y final.
    - 2) Se ubicó las tangentes mínima y máxima con los puntos más alejados de la recta.

- 3) Se indicó los volúmenes que representan los puntos.
  - 4) Se calculó la diferencia entre estos puntos para tener el volumen necesario del tanque.
- b. Se estableció la cantidad mínima de tanques cilíndricos a instalar en paralelo, es decir, 2 unidades.
  - c. Se determinó el volumen efectivo de cada tanque a partir del tiempo de mezclado y el volumen del paso 4).
    - i. El tiempo de retención hidráulico debe ser de 30 segundos, aproximadamente.
    - ii. El volumen de cada tanque debe ser, aproximadamente, la mitad del volumen del paso 4).
  - d. Dado un factor de seguridad de 0.20, se calculó el volumen de diseño de cada tanque operando el volumen efectivo por 1.20 (Ecuación 117).
  - e. Con una relación de altura y diámetro de 1.5, se calculó el diámetro y altura dada la definición del volumen de un cilindro (Ecuación 119).

## 8. Diseño del sedimentador primario

- a. Se caracterizó la arena que es removida por el sedimentador primario de manera que se conozca su:
  - i. Densidad relativa
  - ii. Viscosidad cinemática en  $m^2/s$  en función de la temperatura del agua residual
  - iii. Concentración inicial de SST
  - iv. Diámetro de partícula en mm
  - v. Carga superficial en  $m^3/(d*m^2)$
  - vi. Velocidad de asentamiento para arena gruesa en mm/s
  - vii. Porcentaje de humedad de los lodos descargados
  - viii. Eficiencia o porcentaje de remoción de DBO, DQO y SST
- b. Se diseñó el difusor de entrada del agua residual alimentada a partir de los siguientes parámetros de diseño:
  - i. Diámetro de los orificios de distribución
  - ii. Velocidad a través del orificio
  - iii. Pérdida de carga óptima en los orificios
  - iv. Distancia de la pantalla difusora de la entrada de aguas residuales
  - v. Ubicación del inicio de los orificios desde la superficie y fondo del agua
  - vi. Número de filas y columnas de orificios
- c. Se dimensionó el tanque rectangular con pendiente en el fondo, a partir de parámetros de diseño dados por la bibliografía.
  - i. Se calculó el área superficial a partir del caudal promedio que se alimenta sobre la carga superficial.

- ii. Con una relación largo y ancho de 3 y el área superficial, se obtuvo el largo y, seguidamente, el ancho del tanque.
  - iii. Con una relación largo y profundidad, se calculó la profundidad del tanque.
  - iv. Dado el largo, ancho y alto del tanque, se estableció el volumen efectivo del sedimentador.
  - v. Con el caudal promedio y el volumen efectivo, se estableció el tiempo de retención hidráulico.
  - vi. Se determinó la velocidad horizontal del flujo como el cociente del caudal sobre el área transversal del tanque.
- d. Con la profundidad y el ancho del tanque, se determinó la distancia entre centros de los orificios del difusor en la entrada.
- e. Se calculó la velocidad de arrastre dada la información a continuación:
  - i. Constante de cohesión
  - ii. Gravedad específica
  - iii. Aceleración de la gravedad
  - iv. Diámetro de partícula
  - v. Factor de fricción Darcy-Weisbach
    - 1) Área mojada
    - 2) Perímetro mojado
    - 3) Radio hidráulico
    - 4) Resistencia para corrientes
- f. Se comparó si la velocidad horizontal es menor a la de arrastre o sedimentación.
- g. Se diseñó la descarga de lodos, utilizando los siguientes parámetros de diseño:
  - i. Pendiente longitudinal y transversal
  - ii. Pendiente tolva de lodos
  - iii. Tiempo de descarga de lodos
  - iv. Velocidad de arrastre de lodos
- h. Con la longitud y la pendiente longitudinal, se calculó la profundidad del fondo del tanque (Ecuación 121).
- i. Se determinó el caudal del desagüe de lodos en función del área superficial, tiempo de descarga y la altura máxima del agua sobre la boca del desagüe.
- j. Se estableció el número de tanques a instalar en paralelo, en donde el mínimo es de 2 unidades.
- k. Se determinó el período de retención considerando la cantidad de sólidos suspendidos en el agua residual alimentada, entre 1 a 4 horas.
- l. Se determinó el porcentaje de remoción de DQO como el 30%.
- m. Para el DBO y SST, se usó una expresión en función del tiempo de retención y dos constantes empíricas (Ecuación 127).

- n. Se realizó un balance de masa dadas las densidades y concentraciones de los componentes principales.
  - i. Dada la densidad del agua aguas residuales saliente del tratamiento primario igual al valor de la bibliografía,  $100 \text{ kg/m}^3$ , se asumió dicho valor como la densidad del agua residual descargada del sedimentador primario.
  - ii. Se iteró la densidad de aguas libres de aceites y grasas hasta obtener una densidad ponderada de aguas residuales total igual al valor de la bibliografía,  $100 \text{ kg/m}^3$ .
  - iii. Se calculó la concentración de las aguas del paso anterior como la diferencia entre las concentraciones del agua residual y sus componentes.
  - iv. Se determinó el cociente entre la densidad sobre el caudal de cada componente para conocer su flujo másico.
  - v. El paso anterior se repitió para las grasas y aceites, sólidos flotantes, aguas y partículas sedimentables, para las etapas de los tratamientos preliminar y primario con porcentajes de remoción.
  - vi. Se sumó cada componente para conocer el flujo másico de aguas residuales.
  - vii. Se calcularon las fracciones másicas como la división entre el flujo másico de un componente por el flujo másico total.

## B. Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales

### 1. Obtención de datos generales para el tratamiento secundario

- a. Se obtuvo el caudal de salida de los sedimentadores primarios de la planta de tratamiento de aguas residuales, como resultado del módulo "*Diseño del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico*".
- b. Se obtuvo las concentraciones de DBO, DQO y SST de los efluentes, como resultado del módulo mencionado con anterioridad.
- c. Se obtuvo las temperaturas promedio mensuales de la estación Concepción, Escuintla, publicadas por el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), en el período de agosto de 2017 a julio de 2018.
- d. Se estableció la temperatura de diseño como el promedio de las temperaturas mensuales.
- e. Se utilizó el software Google Earth para estimar la elevación del ingenio.

- f. Se corrigió la presión atmosférica estándar para la elevación del ingenio para obtener la presión atmosférica de diseño (Ecuación 164).

## 2. Diseño de los Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)

- a. Se obtuvo el caudal de entrada de cada FAFA, dividiendo el caudal de salida de los sedimentadores primarios dentro del número de filtros (Ecuación 134).
- b. Se seleccionó alturas recomendadas de diseño para el lecho empacado, el borde superior y el fondo del filtro y se calculó la profundidad total (Ecuación 2).
- c. Se realizó cálculos iterativos para determinar el volumen de los FAFA que cumpliera con los requerimientos de carga orgánica, siguiendo los siguientes pasos:
  - i. Se seleccionó un tiempo de retención hidráulica, tomando como base parámetros teóricos recomendados.
  - ii. Se calculó el volumen nominal de los filtros (Ecuación 4).
  - iii. Se determinó el área transversal de los tanques, a partir del volumen nominal y la profundidad total (Ecuación 135).
  - iv. Se calculó la carga orgánica en el filtro y en el lecho filtrante (Ecuación 2), así como la razón de carga hidráulica (Ecuación 3), comprobando que los tres parámetros coincidieran con los límites recomendados. De no coincidir, se hizo otra iteración del cálculo.
- d. Se calculó la base del filtro cuadrado, a partir del área transversal (Ecuación 136).
- e. Se obtuvo la eficiencia de remoción de DBO y DQO (Ecuación 5).
- f. Se calculó la velocidad ascendente de flujo, a partir del caudal de cada tanque y el área transversal (Ecuación 141).
- g. Se obtuvo la eficiencia de remoción de SST a partir de datos teóricos, tomando en cuenta la velocidad de flujo.
- h. Se calculó la DBO, la DQO y los SST del afluente (Ecuación 6).
- i. Se estimó la cantidad de biogás a producir a partir de la DQO removida y relaciones teóricas (Ecuación 9).
- j. Se estimó la cantidad de lodos a producir, su contenido de sólidos y densidad, a partir de relaciones teóricas, tomando en cuenta el caudal y tipo de tratamiento dado al agua residual (Ecuación 7).

## 3. Caracterización del medio filtrante de los FAFA

- a. Se cortó tubería de PVC de diámetro de 33.4 mm (diámetro nominal de 1 pulgadas) en trozos de 3.3 cm, para obtener anillos de Raschig.

- b. Se calibró un beaker de 1000 mL, pesando el agua necesaria para llenarlo y midiendo su temperatura con un termómetro de bulbo.
- c. En triplicado, se pesó y contó la cantidad de anillos necesarios para llenar el beaker de 1000 mL, empacando los anillos al azar.
- d. En triplicado, se pesó y midió la temperatura del agua necesaria para llenar el beaker empacado con los anillos.
- e. Se calculó los volúmenes ocupados por el agua en el beaker vacío y en el beaker empacado, a partir de la densidad del agua a la temperatura medida y su masa (Ecuación 144) y (Ecuación 145).
- f. Se calculó la relación de área de contacto/volumen aportada por los anillos, a partir del área superficial de los mismos y el volumen ocupado en el filtro (Ecuación 146) y (Ecuación 147).
- g. Se calculó la porosidad del empaque a partir del volumen del beaker vacío y el beaker empacado al azar (Ecuación 148).
- h. Se estimó la masa de tubería necesaria para llenar los dos FAFA, a partir de la masa del lecho empacado, el volumen ocupado por el mismo y el volumen de material necesario para los FAFA (Ecuación 148) y (Ecuación 149).
- i. Se estimó la longitud de tubería necesaria para llenar los dos FAFA, a partir del número de anillos necesarios y el volumen ocupado por los mismos (Ecuaciones 28 y 29).

#### 4. Diseño de la Laguna anaerobia de estabilización

- a. Se seleccionó una carga volumétrica de DBO, basada en datos teóricos y la temperatura de diseño.
- b. Se determinó el volumen operacional, a partir de la DBO de los influentes, el caudal y la carga volumétrica (Ecuación 4).
- c. Se calculó el tiempo de retención hidráulica (Ecuación 2), comprobando que este fuera mayor a 1 día.
- d. La profundidad de líquido en la laguna arbitraria se seleccionó según los valores recomendados en la literatura.
- e. Se calculó el área de la laguna, a partir del volumen operacional y la profundidad. Este valor representa el área a una profundidad media de líquido (Ecuación 155).
- f. El ancho y el largo de la laguna a una profundidad media se calculó con base en una relación ancho/largo arbitraria (Ecuación 156).
- g. Se calculó las dimensiones de construcción corrigiendo el ancho y largo de la laguna a la profundidad media con las relaciones de la Figura 4.

- h. Se estableció eficiencias de remoción para los parámetros de DBO, DQO y SST, con base en la literatura.
- i. Se calculó la DBO, DQO y los SST de los efluentes para el sistema diseñado, comprobando que se cumpla con el artículo 19 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Ecuación 6).
- j. Se estimó la cantidad de biogás a producir a partir de la DQO removida y relaciones teóricas (Ecuación 9).
- k. Se estimó la cantidad de los lodos a producir a partir de una dotación teórica relacionada a la población atendida, así como su frecuencia de descarga (Ecuación 8).

## 5. Diseño de los sistemas de bomba y tuberías

- a. Se determinó el caudal de cada segmento de tuberías.
- b. Se seleccionó una velocidad lineal arbitraria para hacer una estimación inicial del diámetro requerido: (Ecuación 170) y (Ecuación 171).
- c. Se seleccionó la tubería con diámetro interno más cercano al estimado para el sistema de transporte.
- d. Se utilizó el diagrama de distribución de la planta de tratamiento de aguas residuales para estimar la longitud de cada segmento de tuberías y los accesorios necesarios.
- e. Se estimó las pérdidas por fricción para cada segmento de tuberías, tomando en cuenta el material y longitud de tubería, accesorios, contracciones y expansiones (Ecuación 174).
- f. En el caso del sistema con filtros anaeróbicos de flujo ascendente, se utilizó la ecuación de Ergun para estimar la caída de presión causada por el lecho filtrante (Ecuación 149).
- g. Se utilizó la ecuación de Bernoulli para determinar la potencia de bomba requerida (Ecuación 175).
- h. Se utilizó curvas características de bombas centrífugas para determinar la potencia del motor requerida.

## 6. Representación gráfica del sistema

- a. Se calculó los balances de masa para ambas propuestas de tratamiento secundario, a partir de los flujos máxicos y volumétricos de entrada y la cantidad de subproductos de cada una.
- b. Se utilizó el software AutoCAD 2016 para realizar diagramas de bloques para ambas propuestas de tratamiento secundario, mostrando la cantidad de equipos, el balance de masa y el tratamiento posterior de las corrientes de aguas residuales, biogás y lodos.
- c. Utilizando AutoCAD 2016, se realizó los diagramas de flujo de los sistemas de tratamiento propuestos, siguiendo los siguientes pasos:
  - i. Se tomaron como base los caudales de aguas residuales, biogás y lodos presentados en los diagramas de bloques.

- ii. Se presentó la concentración de DBO, DQO y SST en las corrientes de aguas residuales.
  - iii. Se utilizaron símbolos y numeraciones para representar los equipos, válvulas y bombas de alimentación del tratamiento.
  - iv. Se utilizaron símbolos para indicar el tratamiento posterior dado a las corrientes de aguas residuales, lodos y biogás.
- d. Se utilizó el software AutoCAD 2016 para realizar los diagramas de equipo de uno de los filtros anaerobios de flujo ascendente y de la laguna anaerobia de estabilización, indicando las dimensiones determinadas durante el dimensionamiento del equipo.

## C. Módulo 3: Diseño del tratamiento terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario

### 1. Investigación bibliográfica

Se realizó una investigación bibliográfica, sobre los diversos procedimientos de remoción de nitrógeno, utilizando las bacterias que se encuentran en el agua residual. Se observaron las ventajas y desventajas de cada método a utilizar, en base a sus características, adaptabilidad y facilidad de operación se optó por el diseño de un tratamiento de lodos activados.

Previo a iniciar el diseño se requiere de un análisis de las características de las aguas residuales a tratar, en este caso no se contó con uno de aguas crudas (sin tratamiento previo). Los valores utilizados para el diseño del sistema de remoción de nitrógeno se basan en los parámetros de salida del tratamiento secundario. La concentración inicial de nitrógeno de diseño se obtuvo a partir de un análisis de agua residual anterior. Se tomó como válido utilizar este valor debido a que las enzimas aplicadas a las fosas sépticas del ingenio azucarero reducían todos los parámetros de DBO, DQO, sólidos totales incluso fósforo, pero no reducían nitrógeno. En dichos análisis se observaron concentraciones entre  $100 \text{ gN}_{\text{Total}}/\text{m}^3$  y  $75 \text{ gN}_{\text{Total}}/\text{m}^3$ . Se realizó un promedio ponderado de la concentración de las tres fosas sépticas principales, pues eran las únicas con las que se contaba un análisis, y se asumió el mismo comportamiento para las otras 22 fosas sépticas. También se asumió para los cálculos que el nitrógeno total determinado en el análisis era equivalente al nitrógeno total (NT) de Kjeldahl (TKN) debido a que en la literatura se estima que la concentración de  $\text{N}_T$  es un 80% de la concentración de (TKN).

Al hacer un análisis completo de las características del agua residual incluyendo el análisis de TKN, se podrá determinar con mayor exactitud cuál es el parámetro real de entrada y salida del sistema y corregir los cálculos correspondientes según la memoria de cálculo realizada.

Todos los parámetros cinéticos se calcularon a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , debido a que se observaron las temperaturas de todo el año máximas, mínimas y promedio en el Instituto privado de Investigación sobre

Cambio Climático (ICC), recolectadas en la subestación de Concepción en Escuintla (por ser la más cercana al ingenio). Se realizó un promedio de las temperaturas al mes por los 12 meses del año 2017 y la temperatura promedio fue la seleccionada para el diseño de la planta (25 °C).

## 2. Diseño del tratamiento de lodos activados

### a. Diseño de la zona de aireación

Para realizar el diseño del tanque aireado se partió de una tabla de valores típicos de aguas residuales teóricas para distintos caudales y distintas cargas contaminantes (Tabla 202 de anexos). Se obtuvo la relación porcentual que representan los sólidos suspendidos volátiles de los sólidos suspendidos totales. Al ver que en todos los porcentajes se mantenía la relación porcentual se optó por emplear ese porcentaje en el diseño, pues solo se conocían los sólidos suspendidos totales del efluente de salida del tratamiento secundario. El mismo procedimiento se realizó para la demanda química de oxígeno soluble (sDQO) y demanda bioquímica de oxígeno soluble (sDBO) respecto a la DQO y DBO total.

Existe una relación teórica entre la demanda bioquímica de oxígeno biodegradable (bDBO) y la DBO total que expresa que el valor de DBO es aproximadamente 1.6 veces la concentración de bDBO. Sin embargo, esto se determina experimentalmente y se corrige con el agua real.

Los parámetros cinéticos utilizados fueron los valores típicos que se encuentran en los sistemas de lodos activados como se observa en la Tabla 11 corregidos a la temperatura de diseño (25 °C) con la (Ecuación 11) del marco teórico. Estos parámetros cinéticos corregidos se emplearon para determinar la tasa de crecimiento específica de microorganismos nitrificadores en la zona de aireación con la (Ecuación 10) ya que esta es la que controla el diseño del sistema por ser de crecimiento lento. En base a este dato se determina el tiempo de retención que debería tener el agua en el sistema para lograr la nitrificación deseada, para ello se utiliza la (Ecuación 12).

Posteriormente se obtiene la producción de biomasa, utilizando la (Ecuación 15), que se va a dar en el tanque, ya que de esto depende la cantidad de lodos a generar en el sistema en forma de sólidos suspendidos. Al tener el valor calculado de sólidos suspendidos se asume un parámetro mayor para obtener un volumen de diseño adaptable a condiciones de crecimiento más altas que las predichas en el tiempo de retención estimado. También se utiliza un factor de diseño que varía según la literatura entre 1.3 y 2.

Una vez obtenido el volumen de diseño del tanque se debe corroborar que los parámetros de sustrato/microorganismo y de carga volumétrica de DBO, (empleando la (Ecuación 13) y la (Ecuación 14)), sean los adecuados para la cantidad de sólidos suspendidos asumidos, en base a rangos teóricos de diseño. Se calcula el rendimiento obtenido con las condiciones seleccionadas para ver la efectividad del tratamiento, como se observa en la Figura 120, en la sección de anexos.

Al tener los parámetros de diseño entre los valores teóricos se procede a calcular (Ecuación 16), la cantidad de oxígeno requerido en kg por hora de funcionamiento, para llevar a cabo la reacción en base a la demanda

bioquímica de oxígeno y la cantidad de sustrato de entrada, la producción de biomasa dentro del tanque y la cantidad de nitrógeno.

b. Diseño de la zona anóxica

La parte crucial del diseño de la zona anóxica recae en la tasa de recirculación interna que tendrá el sistema de la zona aireada, pues aquí es donde entra la concentración de nitratos para realizar la desnitrificación.

El parámetro inicial por calcular es la concentración de biomasa activa que estará disponible en el sistema, pues la relación de sustrato/microorganismo en esta zona depende de cuanto nitrato retorna del tanque aireado en la recirculación interna. La tasa de recirculación interna, la concentración de nitratos de entrada, tasa de desnitrificación en el tanque y el tiempo de retención son los que determinan el volumen de la zona anóxica.

Este cálculo se realizó, mediante una serie de iteraciones para determinar la tasa de desnitrificación en el tiempo de retención propuesto, cuyos valores óptimos en la zona anóxica que son de 1 a 3 horas según la teoría. Los valores obtenidos de la Figura 8 se corrigieron por temperatura utilizando la (Ecuación 19), y la ((Ecuación 21), pues a su vez se ven afectados por la tasa de recirculación interna que se utilice en el sistema. Para la determinación del punto óptimo de remoción en el sistema se utiliza la (Ecuación 18), que tiene como resultado la cantidad de nitratos removidos del tanque a las condiciones de sustrato/microorganismo y tasa de desnitrificación calculadas.

La reacción de reducción de nitrógeno tiene como producto oxígeno, por lo que se calculó la cantidad de oxígeno que se produce durante la desnitrificación y se resta de la cantidad requerida en la zona aireada con el propósito de tener un sistema de suministro de aire adecuado a los requerimientos del proceso.

Como fase final del diseño se debe calcular la potencia del agitador a emplear para mantener los sólidos suspendidos durante su estancia en la zona anóxica para ello se seleccionó una potencia de diseño equivalente a  $10\text{kW}$  por  $10^3\text{ m}^3$  de agua.

c. Diseño de clarificador secundario

El sistema de lodos activados incluye una recirculación de lodos desde el clarificador secundario hasta la zona anóxica para mantener la cantidad de microorganismos constante dentro del mismo. Para ello se debe calcular el porcentaje a recircular del total sedimentado. Posteriormente se debe asumir una tasa de retención hidráulica teórica (ver parámetros de diseño en Figura 126 de anexos), para obtener el área necesaria para realizar la separación de lodos, empleando la (Ecuación 28).

Según el área obtenida se calcula el diámetro y la cantidad de clarificadores a utilizar, la cual depende de la carga de sólidos (Ecuación 29) que maneje el equipo. El rango de carga de sólidos aceptable se encuentra entre  $4$  a  $6\text{ kg/m}^2\cdot\text{día}$  si la carga supera este rango debe considerarse agregar un clarificador más o reducir la tasa de retención hidráulica para ajustar el valor sin afectar la calidad del efluente.

Una vez definido el diámetro y tasa de retención hidráulica se procede a comprobar si la altura propuesta para el sistema es la adecuada para la cantidad de sólidos producidos. Para ello se calcula la velocidad de sedimentación de los lodos con la (Ecuación 17) y luego se compara contra el tiempo que tarda el agua dentro del clarificador. Si el tiempo que tarda la mezcla en el clarificador es mayor que el tiempo de sedimentación se da por aprobada la altura pues esto asegura que los sólidos se sedimentarán en un tiempo menor al de salida del efluente.

#### d. Diseño del sistema de aireación

Luego del diseño de la zona aireada y la zona anóxica se obtiene el oxígeno neto requerido para la operación de nitrificación. En base a este valor se calcula la transferencia de oxígeno al agua a las condiciones de operación con las (Ecuación 22), (Ecuación 23). Luego se determina el flujo de aire requerido para satisfacer los requerimientos de oxígeno corregidos por presión, profundidad del tanque, y elevación del terreno. Al determinar el caudal de aire requerido para que el sistema opere de manera correcta, se procede a determinar las caídas de presión provocadas por los difusores empleados. Estas fueron dadas por el fabricante como se observa en la Figura 124 anexos. También se obtiene el diámetro de la tubería y la cantidad de accesorios. Para obtener la cantidad de difusores se utilizó una velocidad de diseño de  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $1.5 \text{ scfm}$ ), dado por el proveedor.

En este cálculo se requiere de la determinación de la elevación del terreno para realizar las correcciones de presión a la que en realidad operará el sistema. Para realizar la determinación se midió la latitud y longitud del terreno designado para la planta de tratamiento de aguas. Estas medidas se colocaron en Google Earth® donde se ubicó el terreno y se dibujó una ruta, en la cual se solicitó el perfil de elevación es la Figura 123 de anexos. En esta figura se observa que la elevación máxima del terreno es de 155 m y la mínima es de 144 m, por lo que se tomó como elevación de diseño 150 m. El procedimiento detallado se encuentra en anexos.

Al calcular las pérdidas por fricción de los accesorios en tuberías que conducen aire se utiliza un factor de resistencia propio para cada accesorio y se cuantifica la fricción en términos de longitud equivalente. Se debe conocer la temperatura ambiente del aire (temperatura de diseño), la presión a la que se encuentra el aire alimentado, y se calcula la temperatura del aire en la tubería en base a las presiones del lugar y del aire.

Con el caudal, diámetro de tubería, longitudes equivalentes y presión del aire se determina la caída de presión en la tubería, como si fuera recta. A esta se le suma la caída de presión dada por los difusores de aire en términos de presión (Pa). Y esa es la presión total que ejercen los accesorios y tubería en el sistema.

Se procede a la búsqueda de un soplador o compresor que sea capaz de sobrepasar la caída de presión que se genera para que el suministro de aire sea el adecuado sin correr riesgos de fundir o quemar el equipo prematuramente por falta de capacidad. En este caso se utilizó una hoja técnica de un soplador de marca comercial para determinar la presión máxima que da un soplador de desplazamiento positivo trilobular acorde al caudal requerido.

### 3. Dimensionamiento de equipos auxiliares

#### a. Dimensionamiento de tubería

Para realizar el diseño de tuberías se realizó un esquema de la planta donde se estimaron las longitudes de tubería entre un tratamiento y otro. Los diámetros de tubería se calcularon a partir de los caudales de salida de los diversos tratamientos, y se seleccionó una velocidad de flujo a través de la tubería de 1 m/s (como se observar en la Tabla 10, Tabla 13), por ser agua. Según esto y las condiciones del fluido a 25°C se determinó el número de Reynolds. Dividiendo el caudal entre la velocidad se obtiene el área de la tubería y despejando para el diámetro. Luego se busca en la tabla de un proveedor el diámetro nominal de tubería que satisfaga el diámetro calculado. Con los datos del proveedor (Figura 133), se obtiene el diámetro interno, externo y espesor de pared. En este diseño todas las tuberías son cédula 40 de PVC, excepto las del sistema de aire que son de acero galvanizado.

#### b. Dimensionamiento de bombas

Para determinar el tamaño de la bomba a emplear se calcularon las pérdidas por fricción en tubería por expansión con la (Ecuación 32), (Ecuación 33), compresión con las (Ecuación 34), (Ecuación 35), rugosidad a partir de la Figura 129 usando conducciones por tubería lisas por ser PVC y por diferencia de alturas utilizando la (Ecuación 31) de Bernoulli. A la velocidad de diseño previamente determinada, con el diámetro interno del proveedor. A todas las pérdidas por fricción y diferencias de altura en el sistema se les conoce como cabeza de la bomba ya que, en este caso al ser tanques abiertos, no presurizados y tener el mismo diámetro de tubería y velocidad el Bernoulli queda únicamente en esos dos términos.

Una vez determinada la cabeza total de la bomba y el caudal en m<sup>3</sup>/h se utiliza la gráfica de familia de bombas para determinar cuál es la adecuada para estas condiciones. Luego con las Figura 132 y Figura 133 (dadas por el fabricante), se obtiene la potencia del motor de la bomba, diámetro de rodete que se necesitan para cubrir la cabeza calculada al caudal requerido, diámetros de succión, descarga y la eficiencia de la bomba a esas condiciones.

Luego de obtener todos estos datos se corrigen las pérdidas por fricción de contracción y expansión pues ahora se conocen cuáles serán las reducciones y expansiones realizadas.

Se calcula la carga neta positiva de succión (NPSH), para verificar que la requerida por el fabricante de la bomba sea menor a la que se tiene evitando riesgos de cavitación utilizando la ecuación 30. Es importante mencionar que para hacer este análisis solo se toman en cuenta las diferencias de altura y pérdidas por fricción de la succión. Una vez verificada que la NPSH de la bomba es mayor que la requerida por el fabricante se da por concluido el diseño.

#### 4. Determinación de las pérdidas por evaporación

Se discutió la posibilidad de tener pérdidas por evaporación en el sistema debido a las temperaturas a las que estará sometido, para ello se utilizó la (Ecuación 36) para calcularlas y al ver que su valor era insignificante para el volumen del tanque se optó por no tomarlas en cuenta en el análisis del balance de masa del sistema. Sin embargo, si en futuros diseños se obtuvieran tanques de una profundidad menor a 1m es importante repetir el cálculo pues puede que en ese caso sí sean representativos.

#### 5. Diseño de sistema anóxico/aireado después de laguna

Debido a que en el módulo “Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales de tipo ordinario” se realizaron dos propuestas de tratamiento, para verificar en operación y eficiencia cuál era la óptima se realizó un diseño de sistema aireado para cada propuesta. Toda la metodología previamente descrita se realizó tanto para el filtro anaeróbico de flujo ascendente como para la laguna cubierta anaerobia. Los cálculos realizados como se muestran en anexos, sección 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se realizaron de la misma manera con la diferencia que los parámetros de entrada al sistema varían. Para ambos sistemas se realizó un análisis de desviación del 15% del tratamiento primario al igual que se obtuvo la dosis de producto Biozyme FS/AC a utilizar.

#### 6. Prueba de aplicación de bacterias Biozyme FS/AC

Al iniciar la investigación bibliográfica se encontró que existen diversos métodos biológicos de remoción de nitrógeno, uno de ellos era el uso de bacterias y enzimas para eliminar el amonio presente sin necesidad de construir un sistema aireado como se presentó anteriormente. Se quiso evaluar su efectividad y posibilidad de uso en la planta de tratamiento.

Las bacterias utilizadas en este estudio son Biozyme FS/AC, las cuales son una mezcla de bacilos aeróbicos *Bacillus Subtilis*, *Bacillus Polumxa*, *Bacillus Megaterium*, *Bacillus Licheniformis* y enzimas como celulasa, lipasa, proteasa y hemicelulasa. Las cuales se aplicaron según instrucciones detalladas del proveedor.

##### a. Montaje del experimento

Para realizar la prueba a nivel laboratorio se tomaron muestras de aguas residuales de dos fosas sépticas de un ingenio azucarero en frascos esterilizados durante 20 min a 121°C, en una autoclave, cuya marca y modelo se describen en la Tabla 26, y el proceso se observa en la Figura 135. El área de muestreo fue la fosa de oficinas administrativas del ingenio y la fosa séptica ubicada en el taller de tornos dentro de la planta. La temperatura ambiente era de 30 °C y la temperatura del agua al momento de la muestra fue de 28 °C.

Tabla 26 Listado de equipos utilizados durante la experimentación

Equipos	Marca	Modelo
Estufa	Thermo Scientific	Cemarec
Autoclave	Market Forge	----
Colorímetro	Hach	DR900
Reactor	Hach	DRB 200
Balanza analítica	Boeco	Boeco

El agua se retiró de la fosa séptica utilizando una cubeta limpia, con la cual se realizaron varias extracciones y caídas de agua con el propósito de agitarla y que las muestras a recolectar fueran de una mezcla lo más homogénea posible. Luego de la recolección de las muestras estas fueron identificadas y transportadas en una hielera para mantenerlas a baja temperatura hasta el momento del montaje y análisis (Figura 136).

Para realizar el montaje del sistema se utilizó un beaker marca Kimax de 2L como reactor. Con una probeta se trasvasaron figuras 1.2L de agua residual. Se esperó hasta que el agua llegara a temperatura ambiente. Se colocó el reactor sobre una estufa con el único propósito de mantener una agitación constante a 80rpm, durante todo el experimento con un agitador magnético (Figura 137).

- Se pesaron 0.0751 g±0.0001 g del producto Biozyme FS (Figura 140), las cuales se disolvieron en 3 mL de agua y se dejaron reposar durante 1 h cubiertas con papel Parafilm para evitar posibles contaminantes dentro del laboratorio ajenos al sistema.
- Se tomaron muestras del reactor para realizar los análisis correspondientes de pH, nitrógeno total.
- Para la determinación inicial de pH se empleó papel pH, pues no se requería de un valor preciso, solo un parámetro de comparación para determinar si el medio era apto para que las bacterias y enzimas realizaran el proceso de remoción de nitrógeno. Esto debido a que son efectivas en un rango de 4-10 (Figura 138).

Tabla 27 Reactivos utilizados durante experimentación

Reactivos	Marca
Kit nitrógeno total solución ácida “Test ‘n tube” set2672145	Hach
Kit nitrógeno total reactivo hidróxido “Test ‘n tube” Set 2671745	Hach
Hidróxido de sodio (NaOH)	Hach
Agua desmineralizada	----

Al concluir la hora de reposo se comenzó la agitación de la muestra y se agregó el producto, la prueba duró 166 h, se recolectaron muestras cada 24 h para la determinación de la remoción de nitrógeno y se realizó una curva de remoción durante ese período de tiempo.

El mismo procedimiento se llevó a cabo en una prueba con más días de duración para determinar el comportamiento del producto durante 166 h.

## 7. Análisis de combinaciones de tratamientos

### a. Combinación de caudal de tratamiento primario y secundario

Con el propósito de obtener una carga de demanda bioquímica de oxígeno mayor en la entrada, para aumentar la tasa de desnitrificación en la zona anóxica. Se tomó un 15% del caudal de salida del tratamiento primario y el 100% de la salida del tratamiento secundario. Para realizar los cálculos de los parámetros de entrada se tomó un promedio ponderado entre las concentraciones de ambos tratamientos según el caudal extraído de cada tratamiento para sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno. El resto de los cálculos se realizó de la misma manera como se describe en la sección de zona aireada, anóxica y clarificador secundario de este mismo apartado.

### b. Combinación de tratamiento bacteriano/enzimático y sistema

En esta opción se tomaron los parámetros de diseño sin derivación del caudal del tratamiento primario. Tal y como se describió anteriormente en esta sección. Para el volumen del tanque aireado se calculó la dosis necesaria durante el tiempo de retención global del tratamiento de 210 h. Partiendo del dato del proveedor donde menciona que se debe agregar  $6 \text{ g/m}^3$  de agua, como se observa en la Figura 134.

Para determinar el porcentaje de remoción teórico del producto al tiempo de retención del sistema se siguió el siguiente procedimiento:

- Partiendo del análisis de los datos experimentales, se determinó que en 166 h se logró el  $42 \pm 9\%$  de remoción. Observando un comportamiento lineal en la disminución de nitrógeno diaria.
- Se obtuvo por estequiometría el porcentaje de remoción en 210 h.
- De la concentración inicial de nitrógeno se retiró el porcentaje de remoción dado en la zona anóxica y a la concentración resultante se le restó el porcentaje obtenido estequiométricamente para tener la concentración final teórica de nitrógeno en el efluente.

## 8. Análisis de error

Para la parte experimental se determinó la incertidumbre del porcentaje de remoción global de nitrógeno durante las 95 h y 166 h de análisis. Para ello, se realizó los cálculos que se encuentran en la sección 17 de anexos, para determinar los rangos de valores donde oscila el resultado. Para el diseño teórico del sistema de lodos activados no se realizó un análisis de error debido a que todos los datos utilizados para la determinación del volumen fueron obtenidos de la literatura.

## D. Módulo 4: Diseño del tratamiento cuaternario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario

Tabla 28. Listado de reactivos utilizados en la experimentación

Reactivo	Marca	Pureza
Hipoclorito de sodio	Clorox®	5 % (v/v)
Hipoclorito de calcio	EWS	70 % (m/m)
Petrifilm™	3M	-

Tabla 29. Listado de equipos utilizados en la experimentación

Equipo	Marca	Modelo
Balanza analítica	Boeco	-
Incubadora	Quincy Lab, Inc.	12-140E
Colorímetro	HACH	DR 900
Autoclave	Market Forge Sterilmatic	STM-E
Estufa con agitación	Thermo Scientific	-

Para el desarrollo del presente módulo de megaproyecto se realizó lo siguiente:

### 1. Selección del desinfectante

#### a. Construcción de una matriz cualitativa

Para la selección del desinfectante se realizó una revisión bibliográfica para conocer las características de los métodos convencionales de desinfección, y hacer una comparación de las ventajas y desventajas que presenta cada una de las alternativas. A partir de esto se establecieron los factores más importantes y se ponderaron por medio de una comparación pareada para construir una matriz cualitativa. Se les brindó un valor de 1 a los factores más importantes de acuerdo con el contexto del proyecto. Cada alternativa se calificó con número de 0 a 3, donde 0 significa “No aplica” y un 3 significa “Muy alto”. La alternativa que tuvo un menor valor al sumar el producto entre la calificación y la ponderación dada para cada factor es el método desinfectante adecuado considerando el contexto actual para el proceso.

#### b. Conteo de unidades formadoras de colonias

Se comparó la capacidad de inactivación entre el hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- Se esterilizó 3 recipientes de pyrex de 250 mL con tapadera en una autoclave.
- Se colocó 200 mL de agua residual, tomada del centro de la fosa, en los recipientes.
- Se preparó una solución de hipoclorito de sodio con una concentración de cloro libre de 0.5 mg Cl<sub>2</sub>/L a partir de una solución de NaOCl con el 5 % de cloro libre activo.
- Se preparó una solución de hipoclorito de calcio con una concentración de cloro libre de 0.5 mg Cl<sub>2</sub>/L a partir de una pastilla de Ca(OCl)<sub>2</sub> con el 70 % de cloro libre activo.

- Se determinó el cloro activo presente en ambas soluciones por el método 10069 del colorímetro HATCH DR890 (ver Anexos, página 473).
- Se realizó un conteo de unidades formadoras de colonias de E. Coli en placas Petrifilm™ EC 3M siguiendo el procedimiento indicado la guía de interpretación (ver Anexos, página 474), realizando una dilución 1:100 de la muestra.
- Se colocó 100 mL de la muestra de agua residual en un beaker de 250 mL.
- Se agregó 1 mL de solución de hipoclorito al beaker.
- Se dejó que existiera contacto entre la solución de desinfectante y el agua residual durante un tiempo de 15 min con agitación magnética.
- Se realizó un conteo de unidades formadoras de colonias de E. Coli para el agua desinfectada haciendo uso de placas Petrifilm™ EC 3M siguiendo el procedimiento indicado en la guía de interpretación.
- Con las mismas soluciones de hipoclorito que fueron preparadas el procedimiento se repitió para un tiempo de contacto de 30 min y 45 min, cada una en triplicado.
- Se determinó el promedio y desviación estándar para cada valor de recuento y remoción para cada químico desinfectante y cada tiempo de contacto.

## 2. Diseño del sistema de desinfección

Para iniciar con el diseño del tratamiento cuaternario se solicitó al ingenio información sobre los parámetros actuales de las aguas residuales, los cuales se muestran en Anexos, inciso G, y se compararon con los parámetros establecidos en el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”, que aparecen en Anexos, inciso F. Con los valores conocidos de coliformes presentes, se hizo un promedio ponderado a partir de la contribución que dan al caudal total de aguas residuales y se asumió que este valor corresponde a los parámetros iniciales previo al tratamiento de desinfección.

### a. Determinación de la concentración de cloro residual de los efluentes

- Se calculó la fracción de inactivación requerida.
- Se determinó la concentración inicial de cloro por medio de la Ecuación 62 y el modelo de Selleck Collins, asumiendo un valor para el tiempo de contacto.
- Se obtuvo la concentración de cloro residual con la Ecuación 62.
- Se determinó el valor Ct que tendrá el proceso de desinfección.

b. Dosis inicial de desinfectante y bomba dosificadora

- Se determinó la concentración de hipoclorito presente en la solución luego de transcurrido el tiempo de almacenamiento con la Ecuación 55.
- Se calculó la concentración promedio entre la concentración inicial y la concentración luego de transcurrido el tiempo de almacenamiento.
- Se determinó la dosis necesaria de desinfectante a partir de la concentración promedio de solución de NaOCl, la concentración inicial de cloro activo que debe tener el tratamiento, y el caudal de diseño para la planta de tratamiento.
- Se seleccionó una bomba dosificadora capaz de alimentar la dosis de solución calculada.
- Se verificó que fuera compatible con el uso del químico seleccionado

c. Tanque de almacenamiento para el químico seleccionado.

- A partir de la dosificación de la solución y el tiempo de almacenamiento se determinó el volumen efectivo del tanque.
- Se seleccionó el material de construcción para el tanque.
- Se determinó cuáles serían las consideraciones que se tomarán en cuenta para el almacenamiento de la solución en el tanque.

d. Tanque de contacto

- Se estableció relaciones de  $L/W_{ch}$  y  $H/W_{ch}$  para calcular las dimensiones que tendrá el tanque.
- Se calculó el factor  $t_{10}/\tau$  a partir de la Figura 13.
- Se corrigió el tiempo de retención con el factor  $t_{10}/\tau$  calculado.
- Se determinó el volumen a partir del tiempo de retención corregido y el caudal de diseño.
- Se determinó las dimensiones que deberá tener el tanque de contacto, tomando en cuenta que tendrá 8 canales.
- Se verificó que el número de dispersión fuera menor a 0.015 para que exista una buena desinfección.

e. Tubería

- Se determinó la velocidad óptima a la que puede viajar el fluido en una tubería con la Ecuación 128.
- Se calculó el área transversal de flujo dividiendo el caudal dentro de la velocidad óptima
- Se determinó el diámetro interno que debe tener la tubería
- Se seleccionó en la Figura 128 cuál sería el diámetro nominal de la tubería.

f. Agitador estático

- Se determinó la fracción volumétrica de hipoclorito de sodio con relación al caudal de afluente del tanque de contacto.
- Se calculó el coeficiente de variación inicial para una muestra no mezclada con la ecuación 59.
- Se calculó el coeficiente de variación reducida si se busca un coeficiente de variación final del 5%.
- A partir de la Figura 18 se seleccionó el mezclador estático adecuado para el proceso.
- Se utilizó la Ecuación 58 para determinar la relación L/D necesaria y se calculó la longitud requerida tomando el diámetro nominal de la tubería como el diámetro del mezclador.
- Se determinó la caída de presión ocasionada por el mezclador a partir de la constante  $K_i$  correspondiente y la Ecuación 57.

g. Bomba centrífuga

- Se selecciona el punto a y b en el trayecto en dónde se evaluará el uso de una bomba centrífuga.
- Se realizó el balance de energía mecánica entre los puntos a y b seleccionados, que en este caso serían la superficie del clarificador del tratamiento terciario y la salida del tanque de contacto.
- Al balance de energía se le agregó el término de pérdida por fricción, compuesto por pérdidas por fricción por superficie, por expansión, por compresión y por accesorios.
- Con el caudal y la cabeza requerida se buscó en la Figura 151 la familia de bombas adecuada.
- Con el caudal y la cabeza requerida se determinó con la curva característica (Figura 152) la potencia de entrada y NPSH requerido para la bomba.
- Se obtuvo el NPSH disponible con la Ecuación 187 y se comparó con el valor requerido mostrado en la curva característica.

## E. Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales

### 1. Organización e investigación

- a. Se realizó una reunión con encargados del ingenio, definiendo que se busca el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006 y al mismo tiempo generar subproductos aprovechables.
- b. Con los miembros del equipo, se definió que se diseñaría una planta de tratamiento de aguas residuales completa, es decir, contemplando los tratamientos preliminar, primario, secundario, terciario, cuaternario, de subproductos, análisis económico, manual de operación y mantenimiento; distribuyendo los módulos en los integrantes.
- c. A partir del módulo seleccionado, se estableció los objetivos generales y específicos, presentados previamente.
- d. Se informó a los encargados del ingenio sobre el enfoque y alcance propuesto, para validar su aceptación.
- e. Se realizó una revisión bibliográfica en artículos científicos, libros de ingeniería sanitaria y publicaciones relevantes a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- f. Se realizó una revisión bibliográfica en libros de ingeniería sanitaria y artículos científicos, sobre los tipos de tratamiento de lodos y los requerimientos de los mismos.
- g. Se realizó visitas de campo al ingenio para conocer las rutas de los efluentes del mismo, los lugares de descarga y el tipo de tratamiento actual.
- h. Se realizó una revisión bibliográfica en libros de ingeniería sanitaria, manuales y artículos científicos, sobre el tratamiento que se debe dar al biogás producido y los potenciales de aprovechamiento.
- i. Se realizó visitas a dos industrias que ya producen biogás y lo utilizan para generación energética, a manera de conocer a detalle el proceso de su manejo y consultar sobre equipos y sistemas auxiliares que se utilizan frecuentemente.

### 2. Selección de procesos para cumplir objetivos

- a. A partir de la revisión bibliográfica, se identificó ventajas y desventajas que posee cada método de tratamiento de lodos y de biogás, comparando requerimientos de operación.
- b. Se relacionó tales ventajas y desventajas con las condiciones de operación posibles y las necesidades del ingenio, para definir totalmente las operaciones a proponer.
- c. Para el biogás, se estableció que la propuesta estaría orientada hacia su utilización para generación de energía eléctrica o bien en la cocina industrial, según el flujo generado en el tratamiento secundario.
- d. Para los lodos, se escogió un patio de secado convencional con lecho de arena y grava en el fondo.

### 3. Diseño del proceso de manejo de biogás

- a. Se caracterizó el biogás producido, definiendo las fracciones siguientes: 65.00% (v/v) de metano, 34.99% (v/v) de CO<sub>2</sub> y 0.01% (v/v) de H<sub>2</sub>S, guiándose por datos teóricos presentados en libros de ingeniería sanitaria y manuales de uso de biogás.
- b. Se tomó al metano como único gas que posee energía térmica aprovechable, por lo que con su densidad corregida a la temperatura de operación de 25.00 °C y su capacidad calorífica específica, se determinó la energía disponible. (ver pág. 480)
- c. Se buscó turbinas de biogás que operen con el flujo producido para determinar la potencia posible a generar.
- d. Se encontró una turbina con requerimientos de biogás cercanos a los obtenidos (ver Figura 153, pág. 477), sin embargo se determinó que la potencia posible a generar es muy baja, por lo que se rechazó tal propuesta y se estableció usar el biogás en la cocina industrial del ingenio.
- e. Se realizó una visita de campo al ingenio para medir la distancia desde el área prevista para montar la planta, hacia la cocina industrial, a manera de determinar la longitud de tubería requerida para transportar el biogás.
- f. Con la densidad de cada compuesto contenido en el biogás, corregida a la temperatura de operación de 25.00 °C, se determinó su flujo másico. (ver Tabla 224, pág. 486)
- g. De acuerdo al flujo másico de H<sub>2</sub>S, se calculó estequiométricamente el requerimiento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que debería aportar un filtro para remover este gas, asumiendo una eficiencia de reacción de 100%. (ver pág. 481)
- h. Se buscó filtros desulfurizadores y deshidratadores para biogás y según su eficiencia, se calculó el requerimiento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el flujo de H<sub>2</sub>S que no reacciona, para determinar su concentración en el flujo de biogás que sale del filtro y se dirige hacia la cocina industrial. (ver pág. 481)
- i. Partiendo del flujo de biogás y asumiendo una velocidad lineal teórica obtenida de un manual de biogás (López, *et al*, 2017), se calculó el diámetro interno teórico de tubería para su transporte. (ver pág. 482)
- j. Se buscó tubería de PVC con diámetro nominal y cédula que permitan un diámetro interno igual o mayor al diámetro interno teórico.
- k. Se calculó viscosidad y densidad del biogás como un promedio ponderado de la densidad del metano, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S a 25°C, según la fracción volumétrica de cada uno. (ver Tabla 225, pág. 487)

- l. Con el diámetro interno real de la tubería seleccionada y las propiedades del biogás, se calculó el número de Reynolds correspondiente al flujo del mismo, siguiendo la teoría del flujo de fluidos. (ver pág. 482)
- m. A partir del número de Reynolds se calculó el coeficiente de Fanning, tomando al PVC como tubería lisa. (ver pág. 482)
- n. Se diagramó preliminarmente, usando AutoCAD, la ruta para la conducción del de biogás hacia la cocina industrial y en base a la longitud y accesorios requeridos, se calculó las pérdidas de presión por fricción, contracciones y expansiones súbitas. (ver pág. 482)
- o. Respaldándose en la teoría de continuidad, se calculó la caída de presión del biogás desde que sale de los filtros, hasta llegar a la cocina industrial. (ver pág. 482)
- p. En base a la caída de presión encontrada, se determinó que se requiere de un regulador que permita ajustar la presión del biogás hacia la entrada de los equipos que lo consumirán.
- q. Se realizaron los diagramas del proceso propuesto para el manejo del biogás.

#### 4. Diseño del proceso de extracción, transporte y secado de lodos

- a. En base a la revisión bibliográfica, se estableció el tiempo de secado que debe darse a los lodos para que lleguen a obtener una composición de sólidos secos que permitan su manejo y utilización como abono sólido, siendo de 20 días para alcanzar cerca del 40% (m/m) de sólidos secos totales.
- b. A partir del flujo volumétrico de los lodos producidos en los tratamientos anteriores, se estableció unificar las corrientes salientes de los sedimentadores primarios y del clarificador terciario para dirigirlos hacia un patio mayor; mientras las corrientes salientes de los filtros anaerobios hacia un patio menor.
- c. Se definió una cantidad de celdas de secado en el patio mayor, igual a la cantidad de días que conlleva un ciclo de secado, 20 días de secado + 2 días de limpieza.
- d. Tomando una altura de 1.00 m para el lecho de lodos en cada celda, se determinó el largo y ancho de las mismas, teniendo en cuenta un sobre dimensionamiento para afrontar carga adicional que pueda darse por precipitación pluvial. (ver pág. 483)
- e. Se calculó el flujo volumétrico de agua evaporada por celda durante un ciclo de secado, usando datos teóricos de la radiación solar en Guatemala, el tiempo diario de exposición a la luz solar y la entalpía de vaporización del agua a las condiciones ambientales del ingenio. (ver pág. 483)

- f. Se calculó el flujo volumétrico de agua lixiviada, de acuerdo a la composición másica teórica de sólidos secos (definida en Metcalf & Eddy Inc., 2003) a obtener en los lodos deshidratados luego de un ciclo de secado. (ver pág. 484)
- g. Se calculó la composición másica de sólidos secos totales en los lodos tratados. (ver pág. 484)
- h. Se calculó la cantidad de arena fina y de grava a utilizar, como lechos en el fondo de cada celda de secado, a partir del espesor teórico de 0.25 m para cada material. (ver pág. 484)
- i. A partir del flujo volumétrico de los lodos producidos en cada tratamiento previo y asumiendo una velocidad lineal teórica, así como un tiempo de bombeo diario, se calculó el diámetro interno teórico de tubería para transportarlos hacia el patio de secado correspondiente. (ver pág. 484)
- j. Se buscó tubería de PVC con diámetro nominal y número de cédula que permitan un diámetro interno igual o mayor al teórico.
- k. A partir de la composición de sólidos teórica de cada tipo de lodo, se determinó su coeficiente de rigidez y coeficiente de tensión, leyendo las curvas de la Figura 36 (pág.87).
- l. Se calculó el número de Reynolds y el número de Hedstrom, correspondientes a cada flujo de lodos según su tipo y propiedades. (ver pág. 485)
- m. Con los números adimensionales calculados en el paso anterior, se determinó el coeficiente de Fanning, leyendo la curva de la Figura 37 (pág.88).
- n. Se diagramó preliminarmente la ruta para la conducción de cada tipo de lodo hacia su patio de secado correspondiente y en base a la máxima longitud y máxima cantidad de accesorios requeridos, se calculó las pérdidas de presión por fricción, contracciones y expansiones súbitas.
- o. Respaldándose en la teoría de continuidad, asumiendo una eficiencia de bomba y con el flujo másico de cada tipo de lodo, se calculó la potencia requerida del motor para transportarlos. (ver pág. 486)
- p. En base a la revisión bibliográfica, se escogió el tipo de bomba adecuada para el transporte de lodos.
- q. Partiendo del flujo diario máximo de lixiviados, se determinó el tipo y se calculó la potencia de la bomba de extracción de estos.
- r. Se realizaron los diagramas del proceso propuesto para el manejo de los lodos.

## F. Módulo 6: Manual de operación y mantenimiento preventivo

Se desglosó de la siguiente manera:

1. Manual de operaciones
  - a. Descripción de la planta de tratamiento de aguas.
  - b. Diagrama de operaciones y especificaciones de la planta.
  - c. Diagrama de flujo operativo por cada tratamiento de la planta.
    - 1) Descripción detalla de los tratamientos.
    - 2) Especificaciones técnicas de los equipos y otras consideraciones.
2. Manual de mantenimiento
  - a. Matriz de riesgos con acciones a tomar.
  - b. Problemas operativos y acciones que tomar.
  - c. Equipo de protección personal
  - d. Descripción de mantenimiento
  - e. Señalización de seguridad
  - f. Parámetros de control
  - g. Fichas de registro
3. Perfil del operario

A continuación, se define con mayor detalle los puntos mencionados anteriormente.

### 1. Manual de operaciones

Se realizó una descripción general de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Diagrama de operaciones de la planta:

- Se definió las operaciones unitarias involucradas en la planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales tipo ordinario.
- Se colocaron de forma cronológica.
- Las operaciones se representan por un círculo en donde se describió brevemente la operación realizada y se colocó el tiempo de duración de la operación.
- Los materiales que son necesarios para la operación son representados por medio de una línea horizontal del lado izquierdo del diagrama.
- Los productos obtenidos por las operaciones se presentan por medio de líneas horizontales del lado derecho del diagrama.
- Se realizó un resumen con las operaciones y el tiempo total de estas.

Diagrama de flujo de operaciones:

- Se realizó para cada tratamiento de la planta de aguas residuales.
- Se describió el tratamiento.
- Se realizó diagrama de flujo con símbolos similares a los equipos propuestos.

Para cada tratamiento se realizó un cuadro de descripción de operaciones.

- Nombre de la operación
- Nombre de la estructura o el equipo a utilizar
- Operación previa
- Operación posterior
- Descripción de la operación
- Imagen del equipo o estructura
- Descripción de especificaciones técnicas

## 2. Manual de mantenimiento

Para cada tratamiento se realizó un cuadro de mantenimiento de equipos

- Se definieron los riesgos y acciones a tomar
- Se definió los problemas operativos y las acciones a tomar.
- Se definió el equipo de protección personal respecto a los riesgos evaluados.
- Se define las herramientas necesarias para el mantenimiento o limpieza de los equipos o estructuras.
- Se definió el mantenimiento del equipo o estructura en base a manuales de mantenimiento de plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales ya elaborados; y a especificaciones de mantenimiento proporcionadas por el proveedor del equipo.
- Se realizó un formato para el manual con los principales conceptos para el encabezado.
- Se definió un código (MO – 101 ó MOP – 101) el cual las letras se refieren a “manual de operaciones” y “manual de mantenimiento preventivo”. La numeración, la centena se refiere al tratamiento, y la unidad se refiere a la operación.

## 3. Matriz de riesgos

- Se realizó evaluación de riesgos para cada operación de la planta de tratamiento de aguas.
- Se redactó la descripción del riesgo que aplica para cada operación.
- Según los cuadros 72, 73 y 74 se asignó el valor respectivo de consecuencia, probabilidad y exposición para cada riesgo previamente descrito.

- Se calculó la valorización del riesgo como el producto entre el valor de consecuencia, probabilidad y exposición.
- En base al valor del riesgo calculado anteriormente, se encontró el rango al cual pertenece y detalló la actuación ante el riesgo, utilizar la tabla 75.

#### 4. Equipo de protección personal y práctica segura

- En relación con cada operación, a los riesgos descritos en ellos y a las sustancias y equipo manipulado, se definió el equipo de protección personal adecuado según lo indica el Acuerdo Gubernativo 229 – 2014, mencionados en el apartado “Equipo de protección personal”.
- Se utilizó las normas internas de seguridad del ingenio azucarero, para definir la practica segura en el mantenimiento de la planta de agua residual.

#### 5. Perfil del empleado

- Se describió el puesto de trabajo
- Se describió las responsabilidades del cargo.
- Se detalló los requisitos mínimos de estudio del empleado.
- Establecer las competencias necesarias para el puesto de trabajo.
- Se establecer horario de trabajo se lo estipulado en el código de trabajo.

### G. Módulo 7: Análisis económico

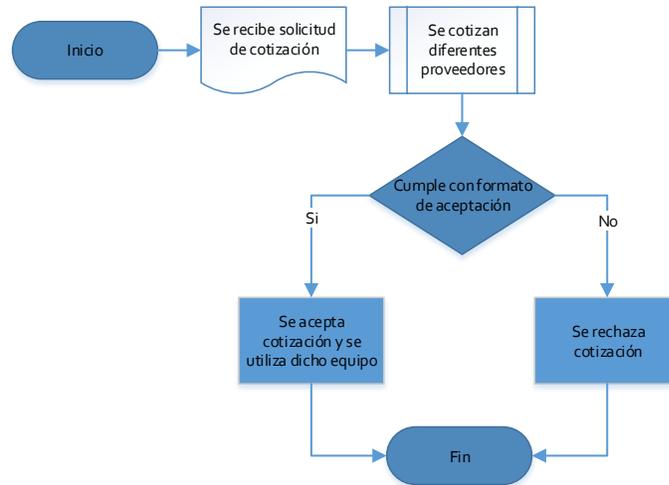
#### 1. Definición de requerimientos para PTAR

- Se definió por los encargados de cada tratamiento de la PTAR, los requerimientos específicos de los equipos, tuberías, válvulas y obra gris que cada tratamiento implicaba.
- Se consolidó toda la información con la herramienta de hojas de cálculo en Excel para llevar un control de lo solicitado por cada tratamiento y cuanto necesitaban de cada equipo, tuberías, válvulas, así como el volumen de la obra gris que el tratamiento requería. Esta medida cabe mencionar que fue solicitada en metros cúbicos tomando en cuenta el grosor de pared que esta requería.
- Se separó la hoja de cálculo de manera que en la primera pestaña se encontrará el almacén de productos solicitados con su precio por unidad de medida, generando así una plantilla que generará resultados exactos al utilizar un almacén estandarizado de equipos, tuberías, válvulas entre otras solicitudes por el encargado de cada tratamiento.

## 2. Cotizaciones

- Se cotizó todos los equipos, tuberías, materiales y obra gris requerido por los encargados de los otros tratamientos que implican la PTAR.
- Se utilizó el siguiente procedimiento para realizar las cotizaciones:

Figura 48. Diagrama de flujo de procedimiento de cotización



- Utilizando el diagrama de flujo para la toma de decisión de la cotización del equipo, se procedió a consolidar todos los datos para cuantificar los equipos requeridos, tomando en cuenta que estos podían repetirse entre los tratamientos de la PTAR. Cabe mencionar que el formato de aceptación es únicamente cumplir con los requisitos puntuales solicitados por los encargados de cada tratamiento.

## 3. Costeo de tratamientos de PTAR

- Se definió la inversión inicial por cada tratamiento de la PTAR, con la ayuda de la hoja de cálculo mencionada en el inciso 1, incluyendo así los equipos, tuberías, válvulas y materiales varios.

## 4. Análisis de escenarios en flujo de efectivo

Se definieron tres escenarios los cuales consistían en diferentes formas de ingresos para la recuperación de inversión.

- Escenario más probable: Es el escenario que se espera que tenga lugar con mayor probabilidad. Las hipótesis para la estimación de las variables que intervienen en la determinación de los Flujos Netos de Caja se han hecho tratándose de ajustar a lo que se espera que acontezca a lo largo del horizonte de planificación del proyecto de inversión. En este caso sería la obtención de cualquier producto secundario, ya sea biogás o compost.

- Escenario optimista: En este contexto, se considera que algunas, o todas, las variables que han servido de referencia para la configuración del escenario “más probable” puedan concretarse a lo largo del horizonte de planificación, tomando valores que mejoran las previsiones iniciales recogidas en el escenario “más probable”. Siendo este el ideal, porque se supondría que se consiguen ambos productos secundarios y el cumplimiento del acuerdo gubernativo 236-2006.
- Escenario pesimista: De forma similar al escenario anterior, en este caso las variables que han servido de referencia para la configuración del escenario “más probable” pueden concretarse a lo largo del horizonte de planificación, considerando que en este escenario únicamente se cumpla con el cumplimiento del acuerdo gubernativo 236-2006, por lo tanto, el tiempo de recuperación será más extenso que obteniendo ahorros o ingresos por los productos secundarios.

## 5. Análisis del valor presente neto

- Se utilizó la fórmula del valor presente neto, para obtener por medio del flujo de efectivo como se comportaría el dinero con los años.
- Se analizó el valor presente neto, debido a que no se debe tomar una decisión con respecto a este valor, sino que debe ser respaldada por el análisis de escenarios tomando en cuenta los flujos de efectivo de estos.

## 6. Análisis de la tasa interna de retorno

- Se determinó la tasa Interna de Retorno, la cual presentará la rentabilidad promedio por período generada por un proyecto de inversión.
- Dependiendo si el valor de la TIR es mayor al costo oportunidad, se aceptará el proyecto o el módulo con los equipos cotizados, o si la TIR es menor a cero, automáticamente se rechazará la propuesta.
- Se determinó la tasa de descuento, que necesitará el proyecto, dependiendo la cantidad de años que se estarán contemplando para recuperar la inversión y dependió si iba ser considerado como un préstamo bancario o inversión propia, para convertir la corriente futura de costos y beneficios a su valor presente neto.
- Después de analizar diferentes propuestas de proyecto, se presentará al ingenio azucarero una propuesta favorable para la ejecución del proyecto.

## 7. Análisis de flujo de efectivo a 15 años

- Se proyectó los costos de cada año, sí esta planta de tratamiento llega a crecer en la producción de alguno de sus productos secundarios.
- Se generó un flujo de caja con proyección a 15 años, para que se observe como empieza a generar ingresos la implementación de la planta de tratamiento de aguas residuales, de todos los diferentes escenarios. Agregando así un análisis de prefactibilidad.

## 8. Análisis estratégico del modelo de negocios

- Se realizó una matriz FODA con el escenario que más ingresos le representará al ingenio.
- Se realizó un análisis con las 5 fuerzas de Porter, para poder definir estrategias para posicionamiento del producto secundario que se estaría vendiendo.
- Se realizó un análisis PESTEL con el análisis de que pasaría si se implementa dicho modelo de negocio en el ingenio, además el análisis de manera global de este proyecto.



## VII. RESULTADOS

### A. Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico

#### 1. Caudal teórico

Tabla 30. Caudales teóricos actuales calculados usando los métodos por Dotación y de Hunter.<sup>6</sup>

Método	Caudal Total (m <sup>3</sup> /s)
Por dotación	1.67 E-02
De Hunter	1.58 E-02

Tabla 31. Caudal teórico futuro calculado usando el Método por Dotación.

Tipo	Valor	Unidades
Promedio <sup>7</sup>	1.94 E-02	m <sup>3</sup> /s
Mínimo	9.71 E-03	m <sup>3</sup> /s
Máximo	7.16 E-02	m <sup>3</sup> /s
Coefficiente de Harmon	3.69	-
Máximo Extraordinario	1.07 E-01	m <sup>3</sup> /s

<sup>6</sup> Se obtuvo valores a partir del caudal de los aparatos sanitarios, el tiempo de uso y número de visitas diarias, así como de las unidades generadoras de agua residual en servicios (hotel, gasolinera, tienda, lavandería y salón de actos).

<sup>7</sup> Para el caudal promedio futuro se usó el indicador de caudal de aguas residuales generadas por persona y la proyección de la cantidad de personas que laborarán en el año 15.

## 2. Parámetros del agua residual para el tratamiento preliminar y primario

Tabla 32. Composición másica del agua residual en los tratamientos preliminar y primario.

Compuesto	Fracción másica				Total
	Agua <sup>8</sup>	Partículas sedimentables <sup>9</sup>	Aceites y Grasas <sup>10</sup>	Sólidos flotantes <sup>11</sup>	
Entrada a trampa de aceites y grasas	98.21%	0.02%	0.0040%	1.77%	100%
Salida de trampa de aceites y grasas / Entrada a canal de cribado	98.21%	0.02%	0.0003%	1.77%	100%
Salida de canal de cribado / Entrada a canal Parshall	99.98%	0.02%	0.0004%	0%	100%
Salida de canal Parshall /Entrada a tanques de homogeneización	99.98%	0.02%	0.0004%	0%	100%
Salida de tanques de homogeneización / Entrada a tanques de sedimentación	99.98%	0.02%	0.0004%	0%	100%
Salida de tanques de sedimentación	99.99%	0.01%	0.0004%	0%	100%

Tabla 33. Remoción de DBO, DQO y SST neta en los tratamiento preliminar y primario propuestos.

Equipo	Parámetro	DBO	DQO	SST
Trampa de aceites y grasas	Alimentación	611	903	200
	Descarga	499	820	200
Sedimentador primario	Alimentación	499	820	200
	Descarga	357	574	102
Remoción neta		42%	36%	49%

<sup>8</sup> Agua residual descargada después del tratamiento preliminar y primario. No posee aceites y grasas, ni sólidos flotantes ni partículas sedimentables.

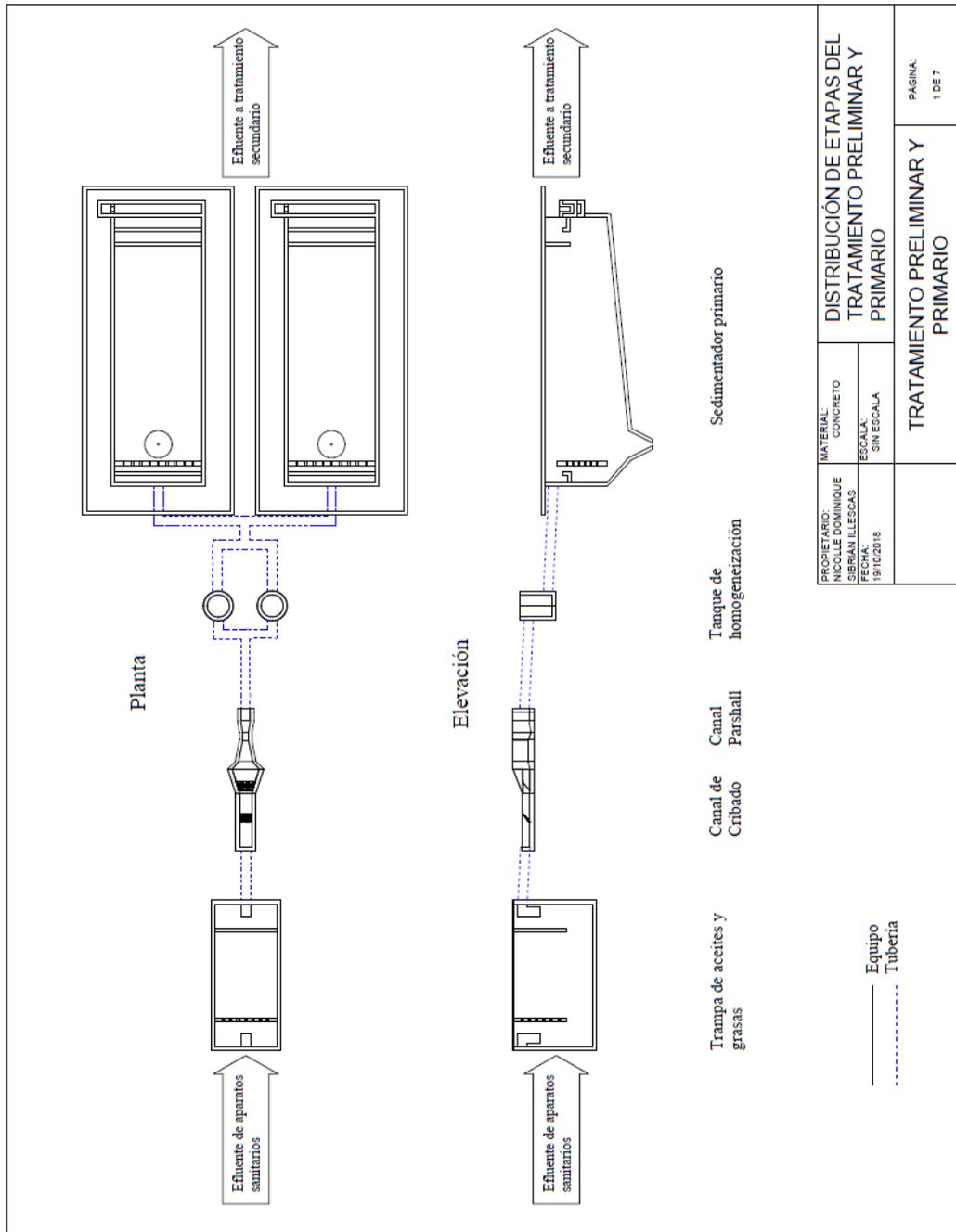
<sup>9</sup> Partículas orgánicas e inorgánicas que se sedimentan.

<sup>10</sup> Sólidos flotantes e inmiscibles.

<sup>11</sup> Material que no se degrada mediante un tratamiento biológico, por ejemplo, cabellos, papel y toallas sanitarias.

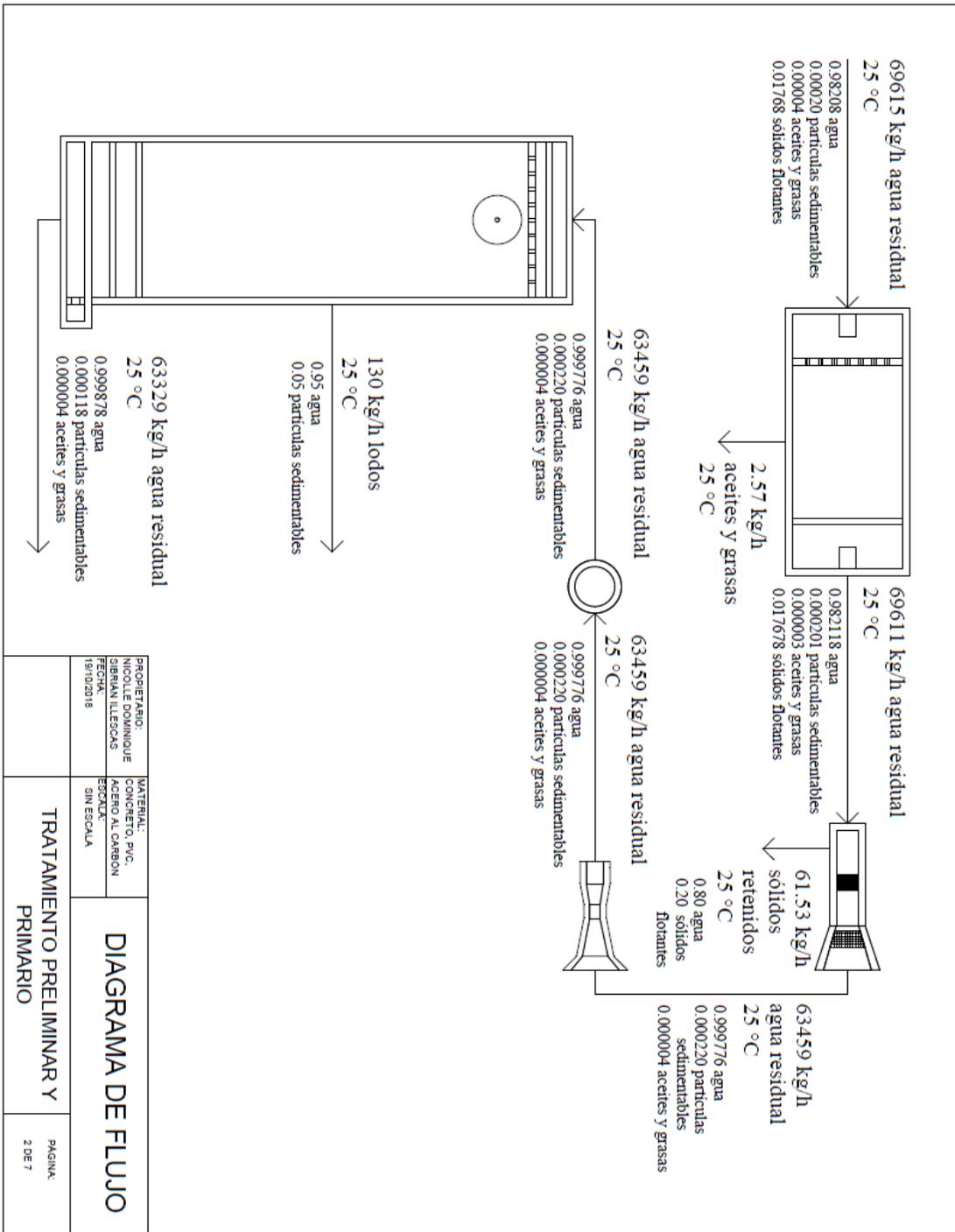
### 3. Diagramas de equipos diseñados

Figura 49. Diagrama de distribución de etapas del tratamiento preliminar y primario para la PTAR.<sup>12</sup>



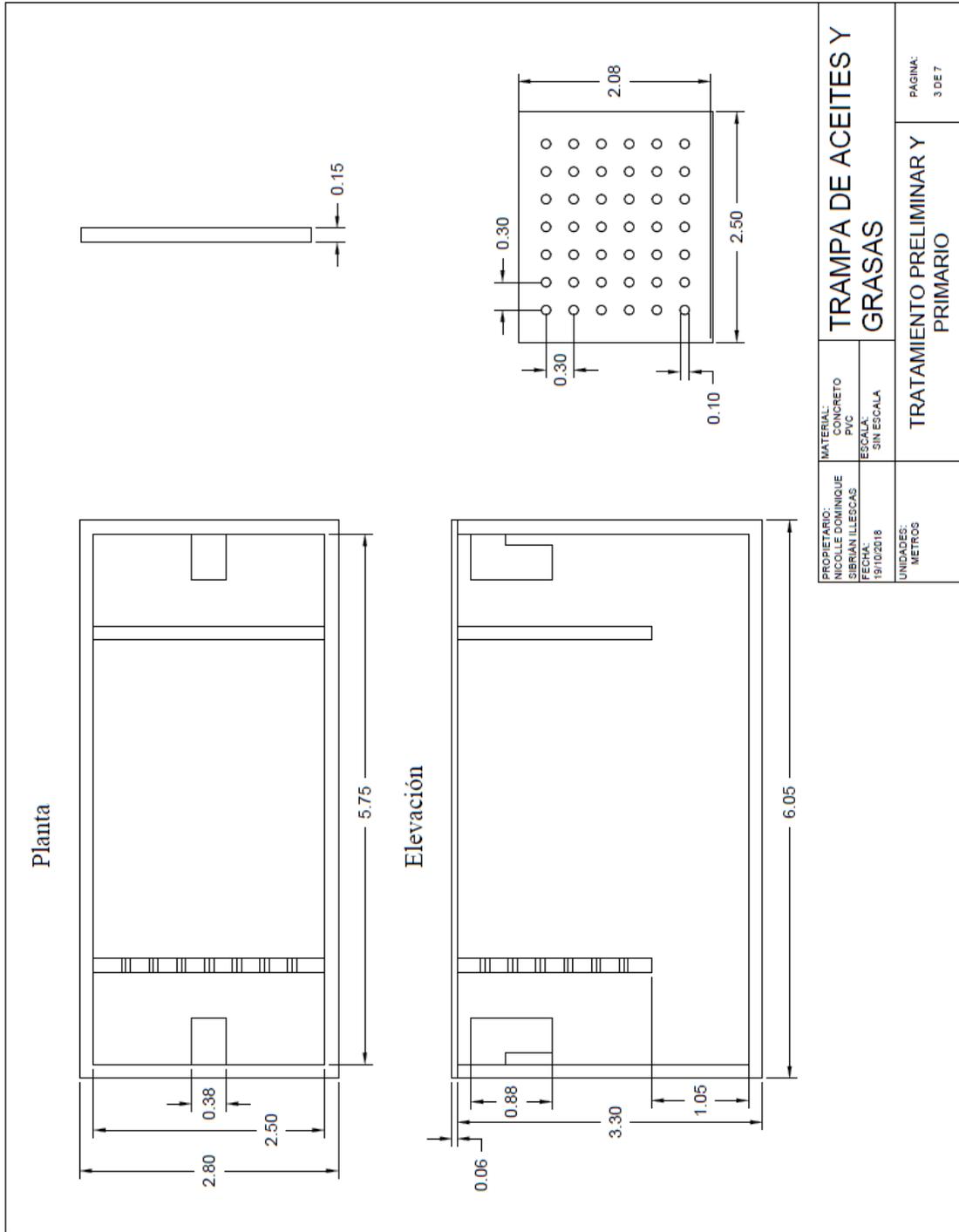
<sup>12</sup> La remoción neta de la distribución de equipos está en el capítulo de Resultados sección B.

Figura 50. Balance de masa del sistema preliminar y primario propuesto usando el caudal teórico futuro.<sup>13</sup>



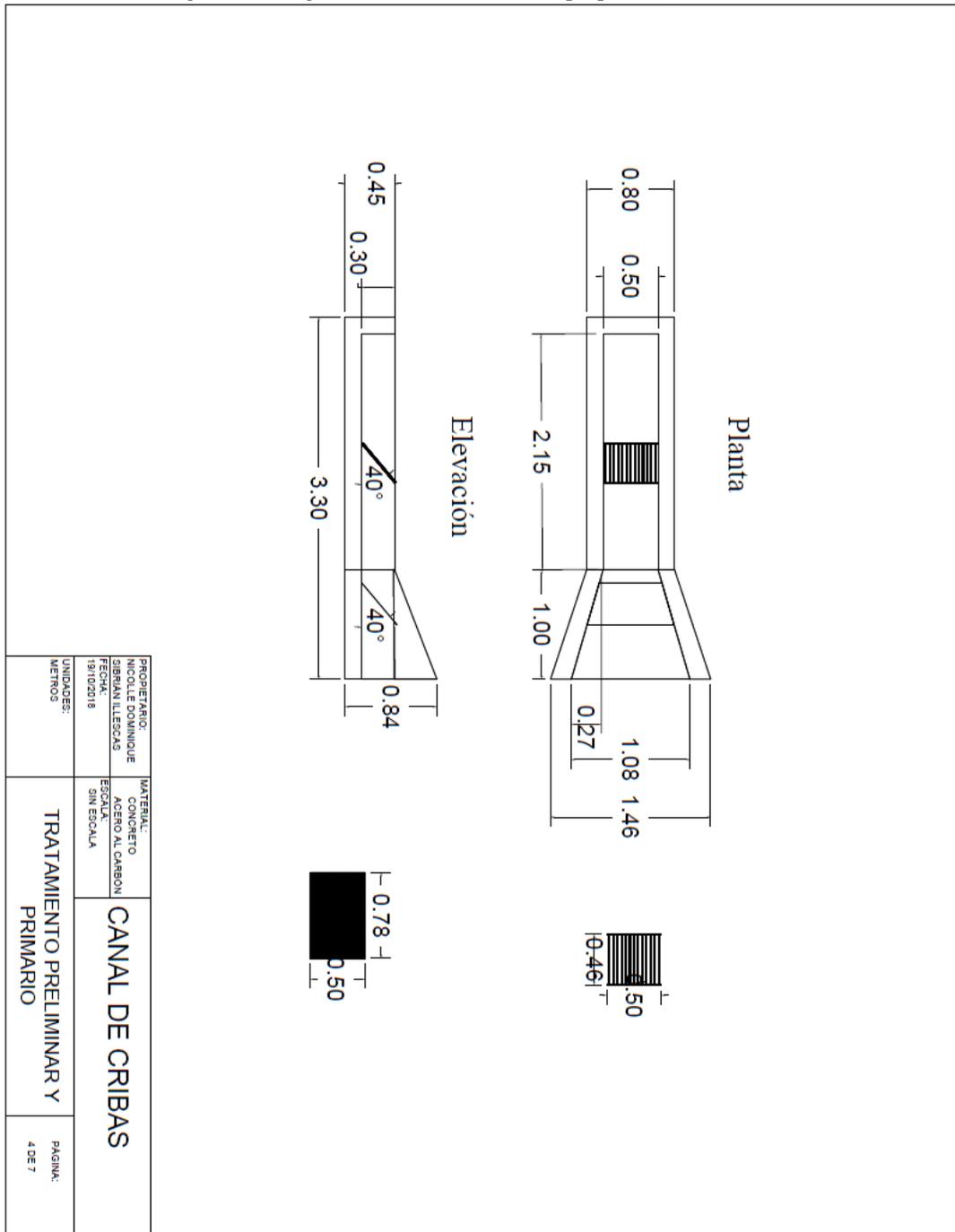
<sup>13</sup> Ver composición de flujos en la Tabla 32, página 148

Figura 51. Diagrama de la trampa de aceites y grasas propuesta (en metros).<sup>14</sup>



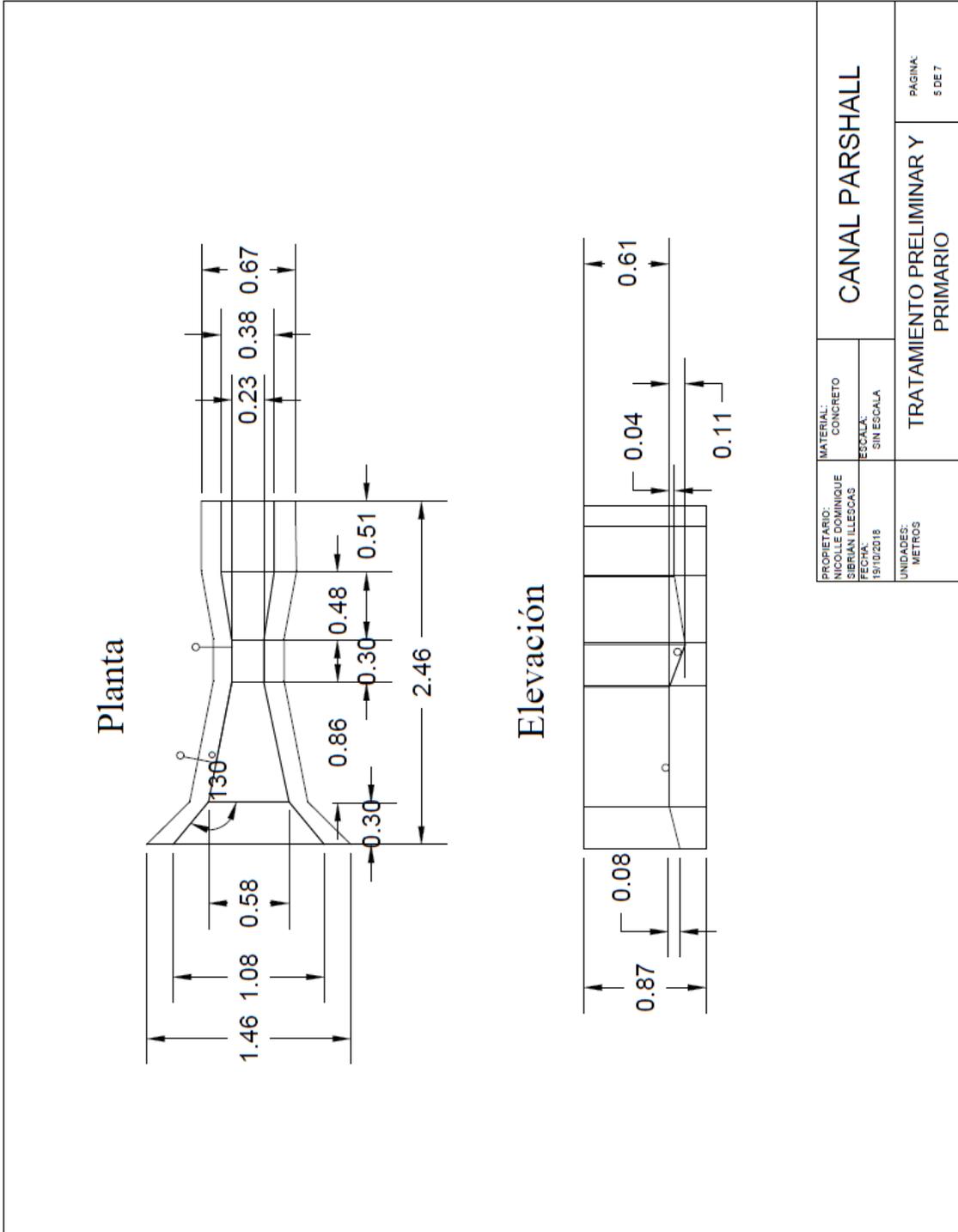
<sup>14</sup> Ver dimensiones del equipo en la Tabla 34 página 156.

Figura 52. Diagrama del canal de cribado propuesto (en metros).<sup>15</sup>



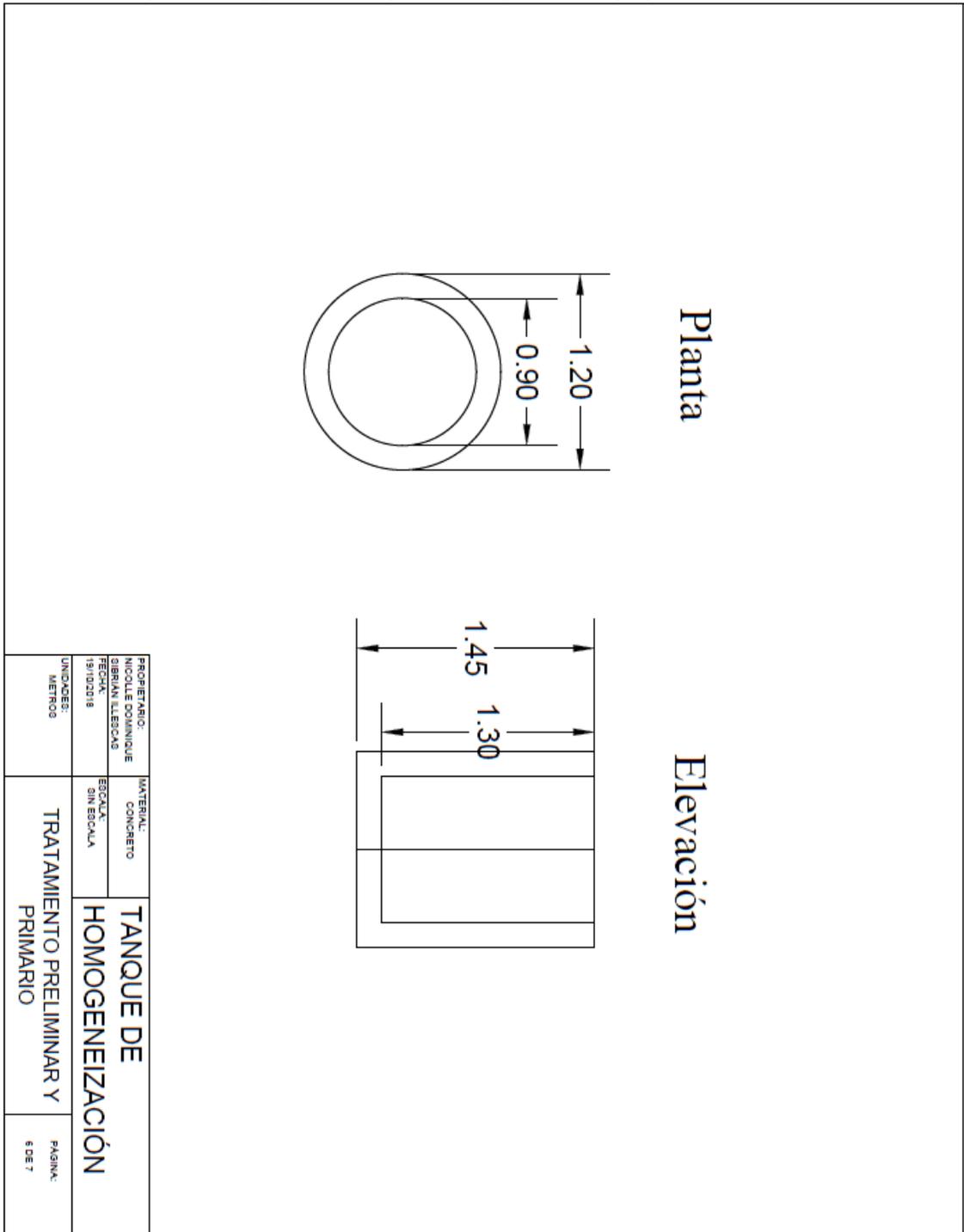
<sup>15</sup> Ver dimensiones de la criba en la Tabla 35 y malla en la Tabla 36, páginas 156 y 157.

Figura 53. Diagrama del canal Parshall propuesto (en metros).<sup>16</sup>



<sup>16</sup> Ver dimensiones en la Tabla 37 página 157.

Figura 54. Diagrama del tanque de homogeneización propuesto (en metros).<sup>17</sup>



<sup>17</sup> Ver dimensiones en la Tabla 38, página 158



#### 4. Equipos diseñados para el tratamiento preliminar y primario

Tabla 34. Dimensionamiento de la trampa de aceites y grasas diseñada.

Variable	Valor	Unidades
Relación longitud – ancho	1.5	
Área superficial de separación <sup>19</sup>	9.38	m <sup>2</sup>
Longitud total	5.75	m
Longitud de cámara de separación	3.00	m
Ancho	2.50	m
Altura	2.50	m
Volumen	15.00	m <sup>3</sup>
Tiempo de retención	1850	s
	30.84	min
Remoción de DBO y DQO <sup>20</sup>	92	%

Tabla 35. Dimensiones de la criba diseñada y su canal.

Variable	Valor	Unidades
Área transversal del agua en el canal	0.06	m <sup>2</sup>
Ancho del canal	0.50	m
Altura del agua	0.13	m
Altura del canal	0.30	m
Longitud de la criba	0.17	m
Número de barras <sup>21</sup>	13	barras
Sección transversal de barras	0.013	m
Ancho de luz entre barras	0.025	m
Ángulo sobre la vertical	40	°
Pérdida de energía en criba sucia <sup>22</sup>	0.0315	m

<sup>19</sup> El área supera el área mínima requerida obtenida usando el factor de compensación de turbulencia y cortocircuito.

<sup>20</sup> La remoción proviene del tiempo de retención hidráulico, el cual es superior a 30 minutos.

<sup>21</sup> Las barras son de perfil circular.

<sup>22</sup> Resultado del caudal y el área disponible para el flujo de agua entre la criba, así como del coeficiente empírico de pérdida de energía por turbulencia.

Tabla 36. Dimensiones de la malla diseñada.

Variable	Valor	Unidades
Área transversal en la alimentación	0.0526	m <sup>2</sup>
Área transversal en la descarga	0.2108	m <sup>2</sup>
Área transversal media	0.1317	m <sup>2</sup>
Ancho de la malla	0.78	m
Altura de la malla	0.50	m
Diámetro de vara	0.006	m
Distancia entre centros de vara	0.012	m
Ángulo sobre la vertical	40	°
Pérdida de energía en malla sucia <sup>23</sup>	0.0258	m

Tabla 37. Dimensiones del canal Parshall diseñado.

Variable	Descripción	Valor (m)
W	Ancho de garganta	0.2286
A	Largo de pared de sección convergente	0.8800
B	Longitud de sección convergente	0.8640
C	Ancho de descarga de sección divergente	0.3800
D	Ancho de alimentación a sección convergente	0.5750
E	Largo de pared de sección divergente	0.6100
F	Longitud de garganta	0.3050
G	Longitud de sección divergente	0.4570
K	Desnivel del piso superior de sección divergente con respecto a la convergente	0.0760
N	Desnivel del fondo de garganta con respecto a la convergente	0.1140
2A/3	Distancia desde la garganta al punto de medición de carga	0.5867
R	Radio del arco de transición de entrada	0.4060
M	Longitud de transición de entrada	0.3050
P	Ancho de la sección de entrada	1.0800
X	Distancia desde el inicio de la divergencia hacia el punto de medición de carga en la garganta	0.0510
Y	Altura desde el suelo de la garganta hacia el punto de medición de carga a una distancia X de la sección divergente	0.0760
Hm	Altura de la entrada al canal	0.0763

<sup>23</sup> Resultado del caudal y el área disponible para el flujo de agua entre la malla, así como del coeficiente empírico de pérdida de energía por turbulencia.

Tabla 38. Dimensiones del tanque de homogeneización de caudal diseñado.

Variable	Valor	Unidades
Volumen estimado para baño industrial de fosa séptica 1 <sup>24</sup>	2.60	m <sup>3</sup>
Tanques de Homogeneización	2	unidades
Volumen efectivo del tanque	1.30	m <sup>3</sup>
Factor de seguridad	0.20	
Volumen de diseño del tanque	1.56	m <sup>3</sup>
Diámetro	1.10	m
Altura	1.65	m
Tiempo de retención	37	s

Tabla 39. Dimensiones del sedimentador primario diseñado.

Variable	Valor	Unidades
Relación longitud – ancho	3	
Relación longitud – profundidad	5	
Longitud	10.7	m
Ancho	3.5	m
Altura	2.5	m
Volumen	74.9	m <sup>3</sup>
Tiempo de retención <sup>25</sup>	4249	s
	70.82	min

Tabla 40. Dimensiones de la pantalla de difusión de entrada al sedimentador primario diseñado.

Variable	Valor	Unidades
Velocidad a través del orificio	0.1	m/s
Espaciamento entre filas	0.24	m
Espaciamento entre columnas	0.35	m
Cantidad de orificios	36	unidades

## 5. Curvas de nivel del ingenio azucarero

Las curvas de nivel para el ingenio azucarero pueden observarse en la sección de anexos sección D

<sup>24</sup> El volumen se escogió como un valor dentro del rango obtenido por el análisis del comportamiento de la generación de aguas residuales descargadas hacia la fosa séptica 1.

<sup>25</sup> Equivalente al espacio – tiempo de una partícula en el equipo. Se obtuvo como el tiempo en el que una partícula sedimentable recorre el tanque rectangular, sin considerar la zona de lodos.

## B. Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales

### 1. Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)

Tabla 41. Cantidad, dimensiones y tiempo de retención hidráulica de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Número de filtros	2	---
Área	137	m <sup>2</sup>
Largo	11.70	m
Ancho	11.70	m
Altura del borde superior	0.50	m
Altura del lecho filtrante	3.00	m
Altura del fondo	1.00	m
Profundidad total	5.40	m
Tiempo de retención hidráulica	17.5	h

Nota: Los resultados fueron calculados con datos originales de la Tabla 171 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 176, Tabla 177 y Tabla 178. Los cálculos correspondientes son el no. 1 al 8 de la sección B.

Tabla 42. Especificaciones de los anillos Raschig propuestos como medio filtrante para los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Material	PVC	---
Diámetro	3.34	cm
Largo	3.34	cm
Área de contacto	112	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Longitud de tubería requerida	455,916	m
Masa de tubería requerida	105	t

Nota: Los resultados fueron calculados con datos originales de la Tabla 174 y Tabla 175 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 182, Tabla 183 y Tabla 184. Los cálculos correspondientes son el no. 13 al 17 de la sección B.

Tabla 43. Parámetros de descarga relacionados a la materia orgánica esperados con el sistema de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Eficiencia de remoción	Concentración (mg/L)	Carga (kg/d)
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	79.2 %	75	115
Demanda química de oxígeno (DQO)	79.2%	119	181

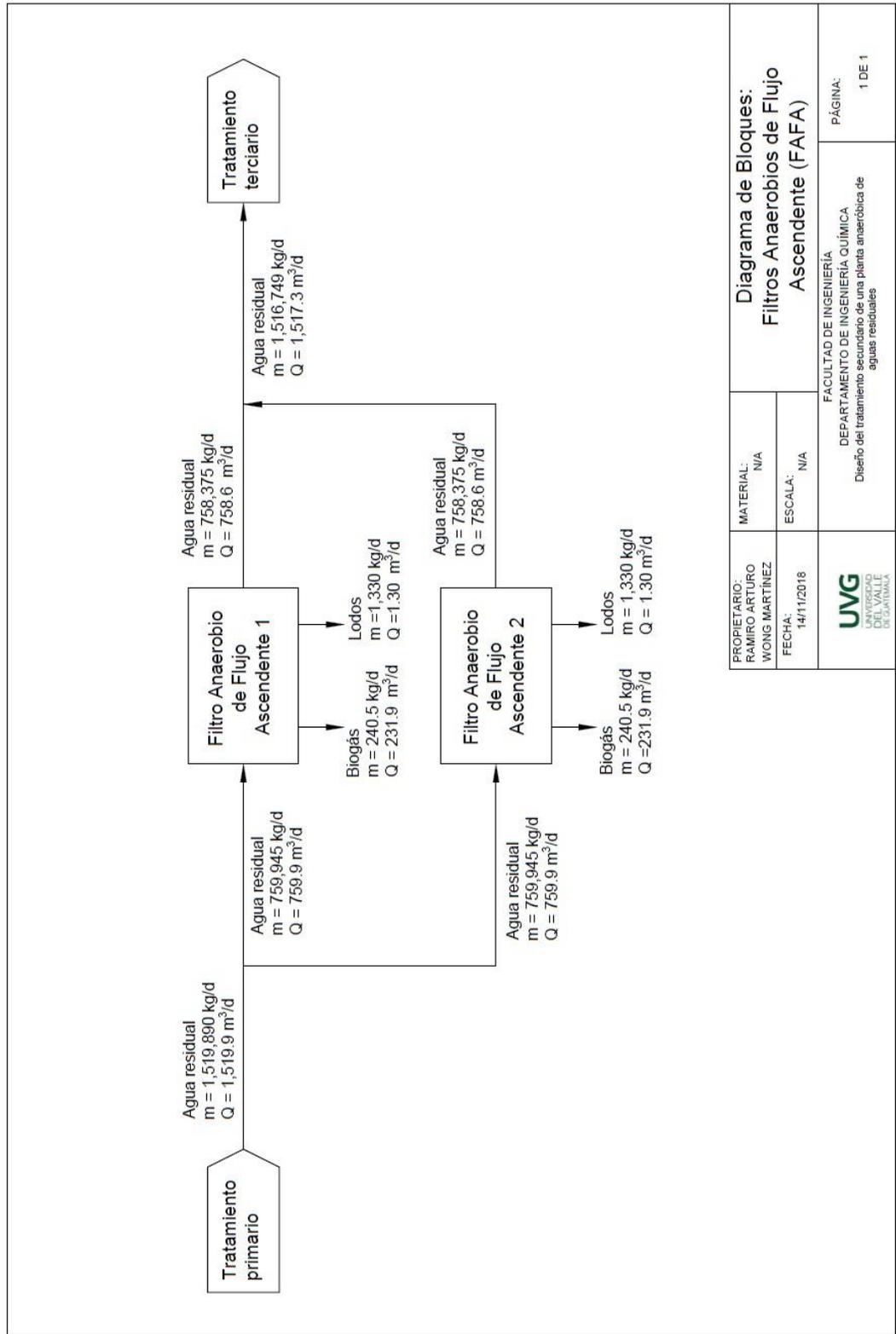
Nota: Los resultados fueron calculados con datos originales de la Tabla 171 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 179 y Tabla 180. Los cálculos correspondientes son el no. 10 y 11 de la sección B.

Tabla 44. Subproductos del sistema de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Producción de lodos	2.59	m <sup>3</sup> /d
Humedad de lodos	96	%
Frecuencia de descarga	30	d
Cantidad de biogás producida	18.6	kmol/d
Volumen de biogás producido	464	m <sup>3</sup> /d

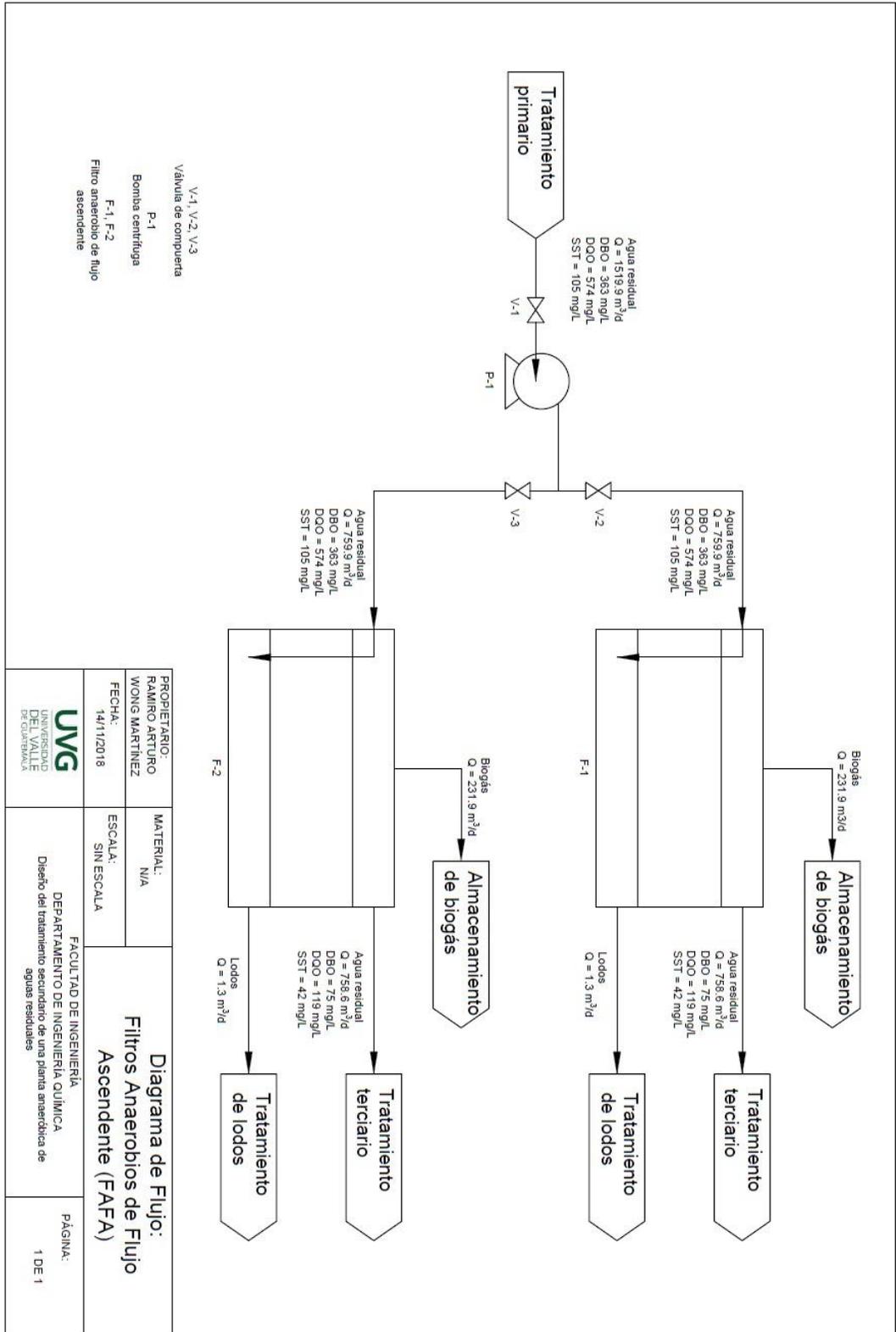
Nota: El volumen de biogás se calculó a una temperatura de 25 °C y a una presión de 99.597 kPa. Los resultados fueron calculados con datos originales de la Tabla 171, Tabla 172 y Tabla 173 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 181 y Tabla 190. Los cálculos correspondientes son el no. 12, 27 y 28 de la sección B.

Figura 56. Diagrama de bloques del tratamiento secundario con Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.



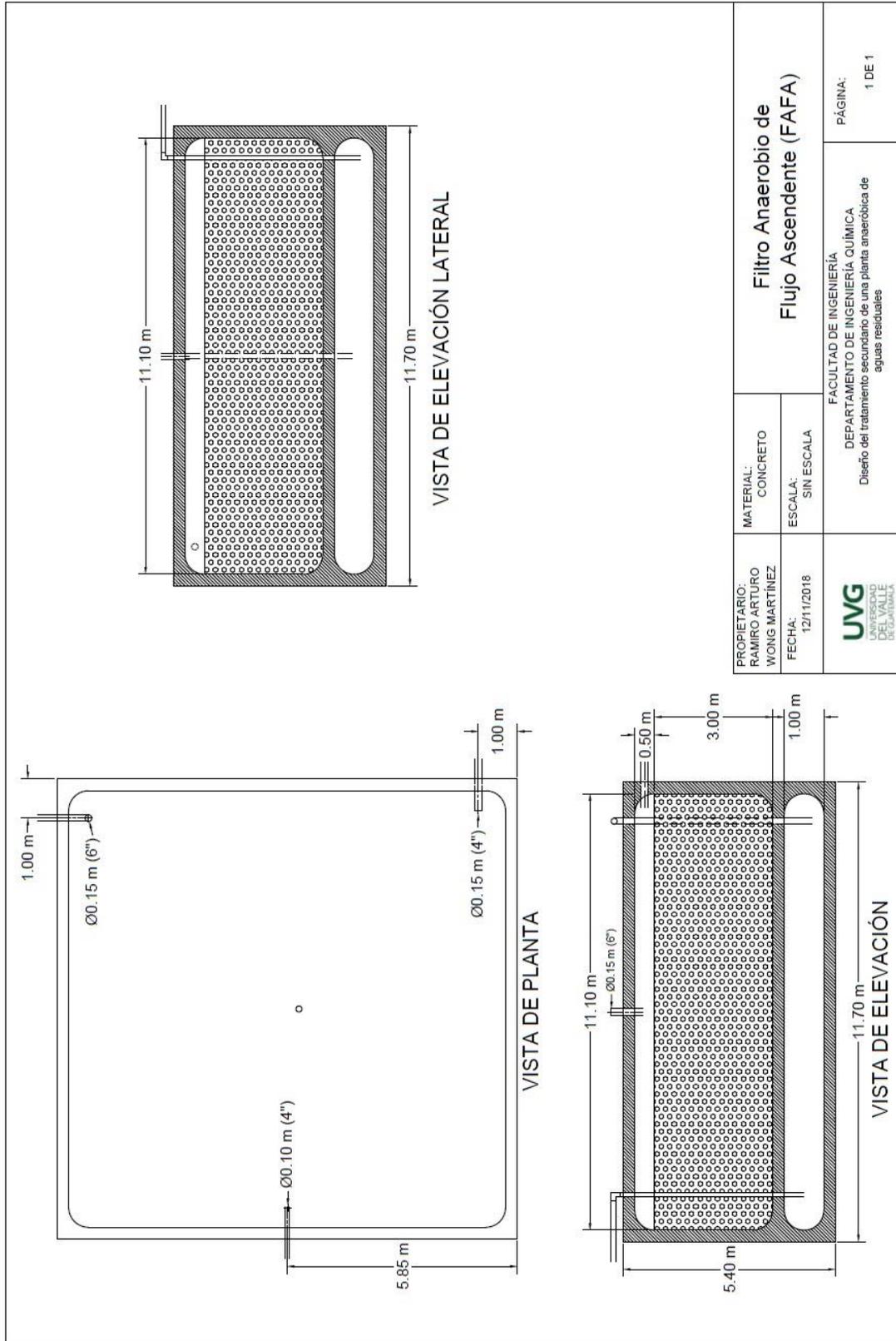
<b>Diagrama de Bloques:</b> <b>Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)</b>		MATERIAL: N/A ESCALA: N/A	PÁGINA: 1 DE 1
PROPIETARIO: RAMIRO ARTURO WONG MARTINEZ	FECHA: 14/11/2018	FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales	

Figura 57. Diagrama de flujo del tratamiento secundario con Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.



PROPIETARIO: RAMIRO ARTURO WONG MARTINEZ	MATERIAL: N/A	<b>Diagrama de Flujo:</b> <b>Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)</b>		PÁGINA: 1 DE 1
FECHA: 14/11/2018	ESCALA: SIN ESCALA			
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE QUIBIA		FACULTAD DE INGENIERIA		
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA		Diseño del tratamiento secundario de una planta anaerobica de aguas residuales		

Figura 58. Diagrama de equipo de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA).



## 2. Laguna anaerobia de estabilización

Tabla 45. Dimensiones y tiempo de retención hidráulica de la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad	5.5	m
Largo en la parte superior	36.0	m
Ancho en la parte superior	21.0	m
Largo en la parte inferior	25.0	m
Ancho en la parte inferior	10.0	m
Área en la parte superior	756	m <sup>2</sup>
Tiempo de retención hidráulica	1.45	d

Nota: Los resultados fueron calculados con ecuaciones teóricas de la Tabla 10 (Marco teórico) y datos originales de la Tabla 171 y Tabla 172 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 185 y Tabla 186. Los cálculos correspondientes son el no. 18 al 22 de la sección B.

Tabla 46. Parámetros de descarga relacionados a la materia orgánica esperados con la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Eficiencia de remoción	Concentración (mg/L)	Carga (kg/d)
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	70 %	109	165
Demanda química de oxígeno (DQO)	40 %	344	523

Nota: Los resultados fueron calculados con ecuaciones teóricas de la Tabla 10 (Marco teórico) y datos originales de las Tabla 171 y Tabla 172 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 187 y Tabla 188. Los cálculos correspondientes son el no. 23 y 24 de la sección B.

Tabla 47. Subproductos de la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Producción de lodos	58.8	m <sup>3</sup> /a
Humedad de lodos	96	%
Frecuencia de descarga	12	a
Cantidad de biogás producido	8.4	kmol/d
Volumen de biogás producido	209	m <sup>3</sup> /d

Nota: El volumen de biogás se calculó a una temperatura de 25 °C y a una presión de 99.597 kPa. Los resultados fueron calculados con datos originales de las Tabla 171 y Tabla 172 de la sección B de Anexos. Los datos intermedios se muestran en la Tabla 189 y Tabla 191. Los cálculos correspondientes son el no. 25 a 28 de la sección B.

Tabla 48. Materiales necesarios para la construcción de la laguna anaerobia de estabilización.

Material	Función	Material
Geomembrana	Recolección de biogás	Polietileno de alta densidad (HDPE)
Geomembrana	Cubierta de suelos	Polietileno de alta densidad (HDPE)

Nota: Las dimensiones exactas de las geomembranas dependen de las dimensiones de la laguna, presentadas en la Tabla 45, y son aportadas por proveedores en la cotización. Consultar las dimensiones de las geomembranas y su costo en el módulo *“Análisis económico de la implementación de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en un ingenio azucarero, por medio de los métodos de valor presente neto y tasa interna de retorno, para el crecimiento de esta dentro de 15 años”*.

Figura 59. Diagrama de bloques del tratamiento secundario con una laguna anaerobia de estabilización.

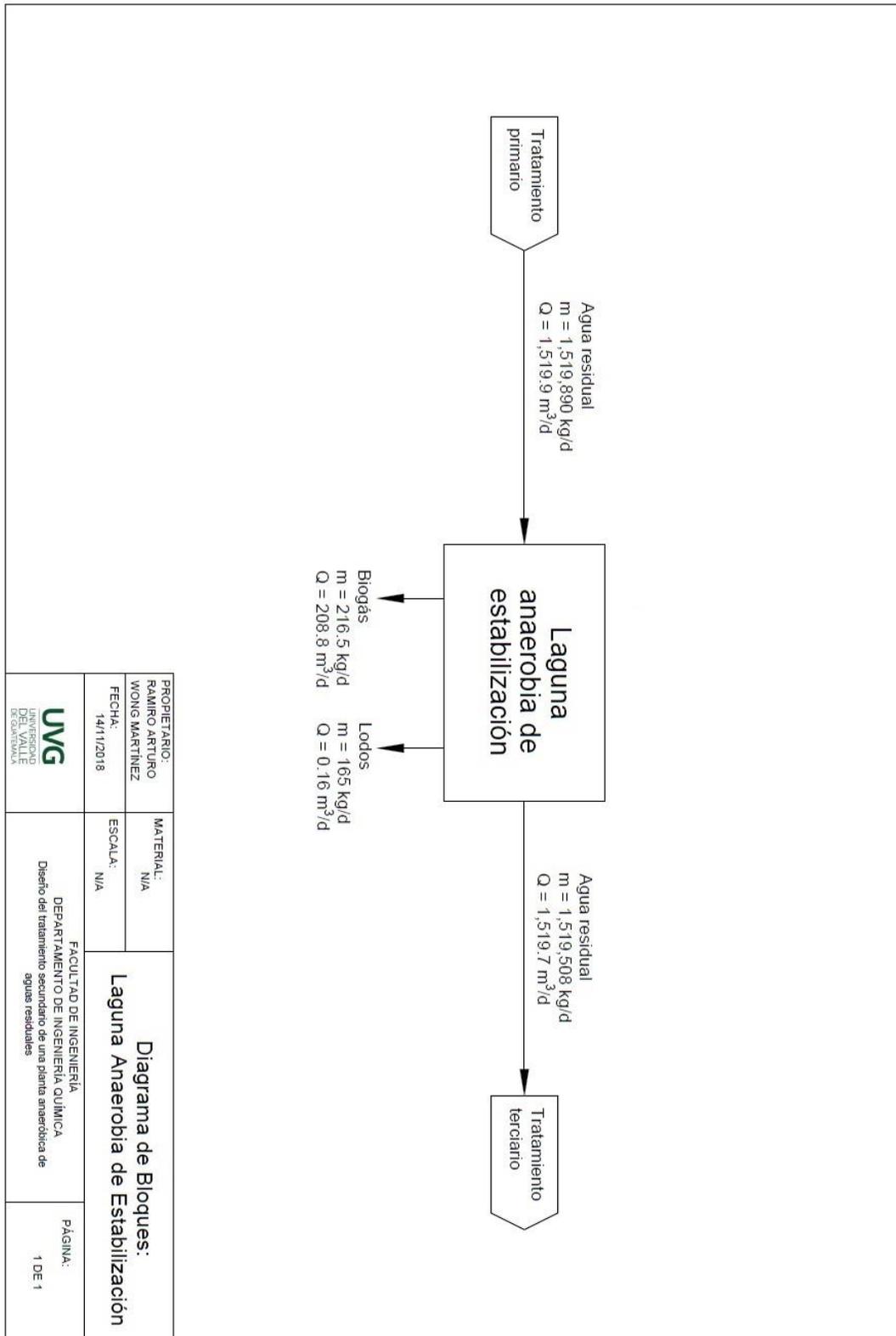


Figura 60. Diagrama de flujo del tratamiento secundario con una laguna anaerobia de estabilización

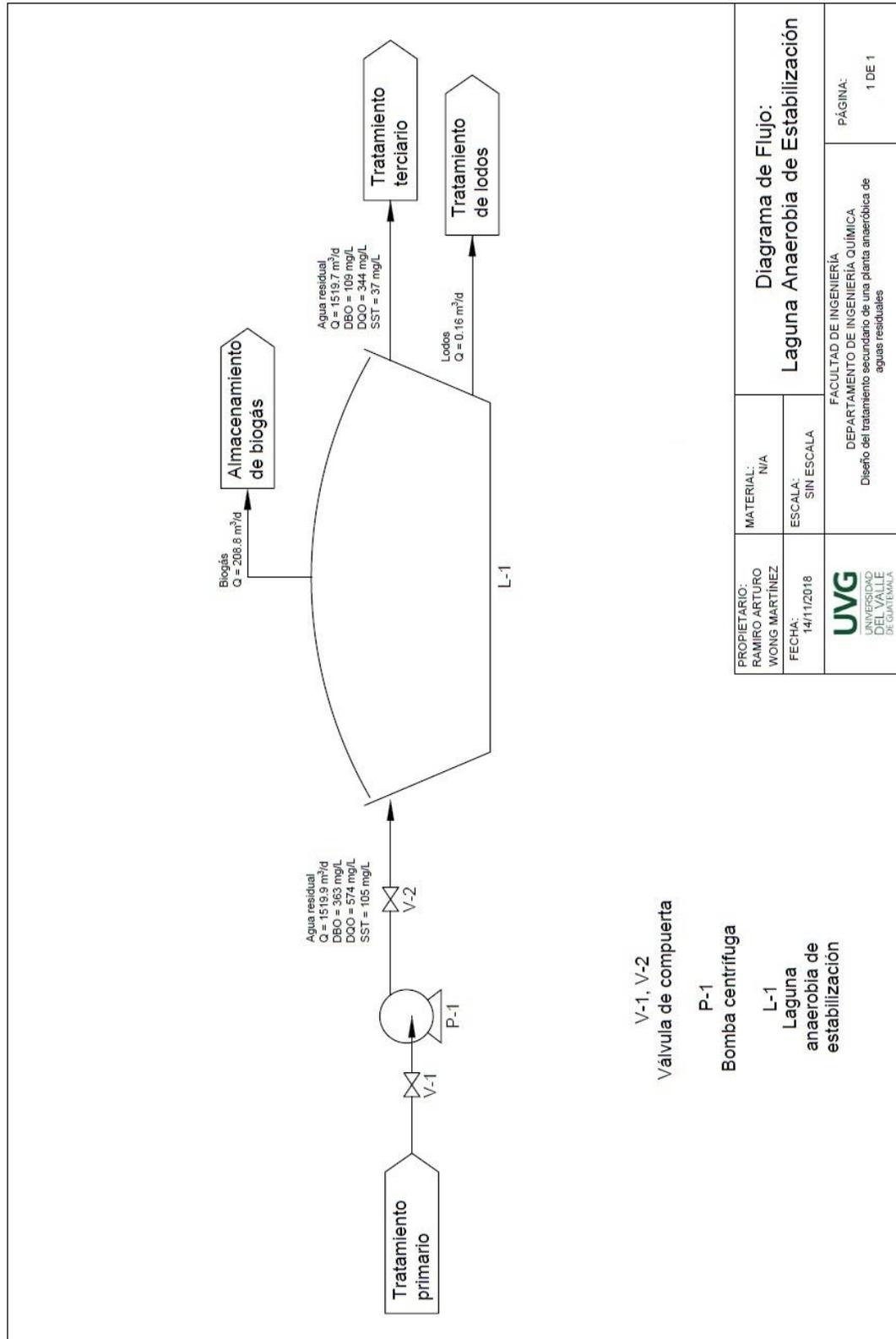


Figura 61. Diagrama de equipo de la laguna anaerobia de estabilización (página 1 de 2).

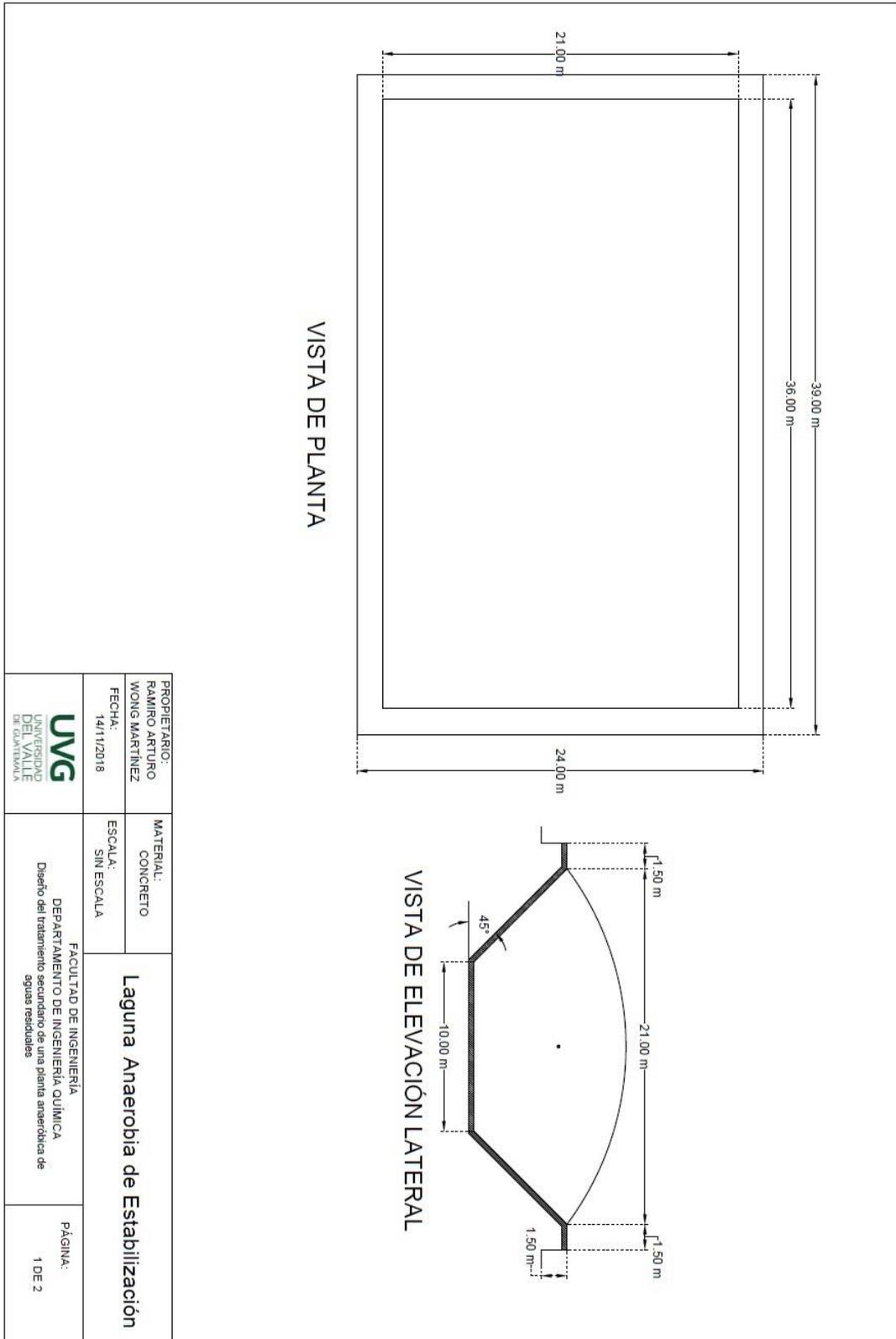
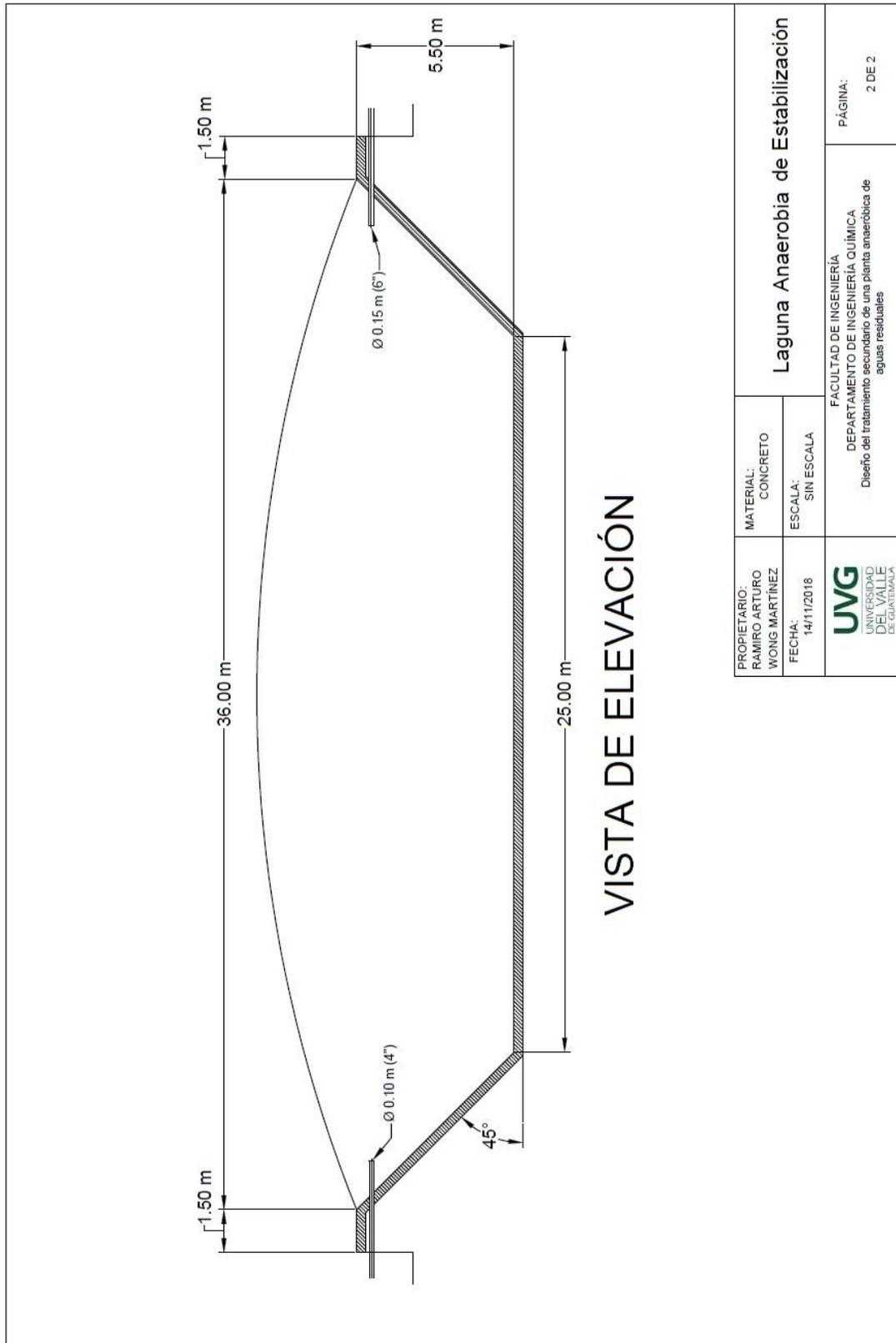


Figura 62. Diagrama de equipo de la laguna anaerobia de estabilización (página 2 de 2).



PROPIETARIO: RAMIRO ARTURO WONG MARTÍNEZ FECHA: 14/11/2018	MATERIAL: CONCRETO	<b>Laguna Anaerobia de Estabilización</b>		PÁGINA: 2 DE 2
	ESCALA: SIN ESCALA			
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE GUATEMALA				

## C. Módulo 3: Diseño del sistema de tratamiento terciario

### 1. Medidas de la zona de aireación

Tabla 49 Medidas y volumen de la zona de aireación para el tratamiento terciario después de FAFA<sup>26</sup>

Medidas	Valor
Largo (m)	6.6
Ancho (m)	6.6
Profundidad(m)	4.7
Espesor de pared (m)	0.3
Volumen total (m <sup>3</sup> )	196
Tiempo de retención (h)	
Tiempo de retención tanque aireación	3

Nota: todos los cálculos realizados se encuentran en la sección c de anexos, el esquema de la zona puede observarse en el apartado 6. Esta parte cuenta con 129 difusores de membrana de burbuja fina y se requiere de un soplador de 15 psi capaz de dar un caudal de aire de 328.30 m<sup>3</sup>/h (193.26cfm), la tubería empleada para el sistema de aireación es de hierro galvanizado. La tubería de Hg sugerida tiene un diámetro nominal de 0.10m (4in) con una velocidad de aire de 11.25 m/s. Todos los datos de diseño obtenidos fueron comparados contra los parámetros de la figura 8 en la línea de PFR convencional. Todos los diseños se realizaron con una concentración de nitrógeno de entrada de 94.16g/m<sup>3</sup>.

Tabla 50 Medidas, volumen de la zona de aireación para el tratamiento terciario después de laguna de estabilización anaeróbica<sup>27</sup>

Medidas	Valor
Largo (m)	8.3
Ancho (m)	8.3
Profundidad(m)	5.0
Espesor de pared (m)	0.3
Volumen total (m <sup>3</sup> )	346
Tiempo de retención (h)	
Tiempo de retención tanque aireación	5

Nota: los cálculos realizados para esta propuesta se pueden obtener cambiando los parámetros de entrada de la sección 1) ,1 y 1) ,3 de anexos por los datos que se encuentran en: “Tabla 209 Características principales del agua residual proveniente de una laguna de estabilización anaeróbica”.

Para este sistema se requieren de 152 difusores de membrana de burbuja fina, para cubrir un caudal de aire de 383.33m<sup>3</sup>/h (225.62cfm) la tubería utilizada para ese sistema es de hierro galvanizado de diámetro nominal de 0.13m, (5in). El soplador requerido para abastecer el caudal de aire es de 15psi. La

Figura 66 Esquema de sistema de remoción de nitrógeno para colocarlo después de Laguna de estabilización anaeróbica tiene una representación gráfica del sistema. Todos los diseños se realizaron con una concentración de nitrógeno de entrada de 94.16g/m<sup>3</sup>.

<sup>26</sup> FAFA (filtro anaeróbico) empleado en el tratamiento secundario del módulo “Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales”

<sup>27</sup> Laguna anaeróbica empleada en el tratamiento secundario del módulo “Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales”

## 2. Medidas de la zona anóxica

Tabla 51 Medidas y volumen de la zona anóxica para el tratamiento terciario después de FAFA

Medidas	Valor
Largo (m)	6.4
Ancho (m)	6.6
Profundidad(m)	4.7
Espesor de pared (m)	0.3
Volumen total (m <sup>3</sup> )	189.7
Tiempo de retención (h)	
Tiempo de retención tanque aireación	3
Porcentaje de remoción	54%

Nota: Para este sistema se requiere de un agitador, en este caso se calculó la potencia que sería necesaria para mover 189.7m<sup>3</sup> de agua que es de 1.96kW, todos los cálculos realizados para la obtención de estos valores se encuentran en la sección 2 de anexos. Todos los diseños se realizaron con una concentración de nitrógeno de entrada de 94.16g/m<sup>3</sup>.

Tabla 52 Medidas y volumen de la zona anóxica para el tratamiento terciario después de Laguna de estabilización anaeróbica

Medidas	Valor
Largo (m)	4.6
Ancho (m)	8.3
Profundidad(m)	5.0
Espesor de pared (m)	0.3
Volumen total (m <sup>3</sup> )	189.9
Tiempo de retención (h)	
Tiempo de retención tanque aireación	3
Porcentaje de remoción	59%

Nota: Para este sistema se utilizó la memoria de cálculo que se encuentra en la sección 2 de anexos modificando los parámetros de entrada por los obtenidos en la memoria de cálculo del anexo sección 1 y 3. El agitador para este diseño debe tener una potencia de 3.46kW.

## 3. Dimensiones del clarificador

Tabla 53 Medidas, caudal de salida hacia tratamiento cuaternario y volumen del clarificador secundario para el tratamiento terciario después de FAFA.

Medidas del clarificador secundario	
Diámetro (m)	10.0
Profundidad (m)	5.3
Espesor de pared(m)	0.3
Ángulo de deslizamiento de lodos (°)	36°
Volumen total (m <sup>3</sup> )	353.4
Caudal de salida (m <sup>3</sup> /d)	612.0
Caudal de salida total de lodos (m <sup>3</sup> /d)	1802.0

Tabla 54 Medidas, caudal de salida hacia tratamiento cuaternario y volumen del clarificador secundario para el tratamiento terciario después de laguna anaeróbica.

Medidas del clarificador secundario	
Diámetro (m)	10.0
Profundidad (m)	5.3
Espesor de pared(m)	0.3
Ángulo de deslizamiento de lodos (°)	36°
Volumen total (m <sup>3</sup> )	353.4
Caudal de salida (m <sup>3</sup> /d)	616.8
Caudal de salida total de lodos (m <sup>3</sup> /d)	1790.9

Nota: Para ambos diseños se realizó un único esquema pues las medidas son idénticas para ambos sistemas propuestos, el tiempo de sedimentación calculado de los lodos es de 2.81h y el tiempo que tarda el agua dentro del clarificador es de 3.6h por lo que se asegura la separación del lodo del fluido. El resto de los cálculos para la obtención de los parámetros que se encuentran en la Tabla 54 se encuentran en el anexo sección 4.

#### 4. Remoción de nitrógeno por parte de las bacterias marca Biozyme FS/AC

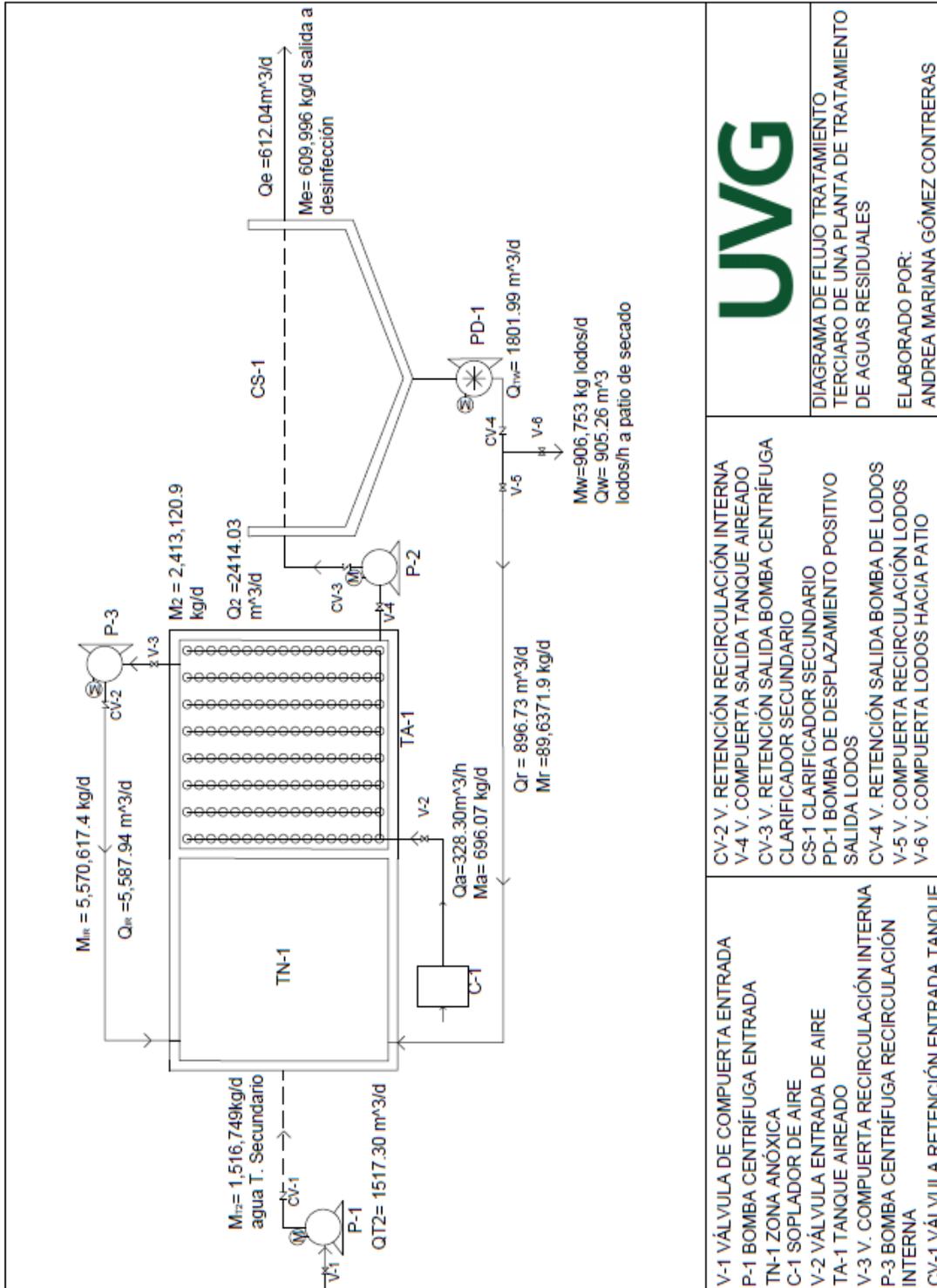
Tabla 55 Porcentaje de remoción obtenido durante prueba experimental de 166h y porcentaje obtenido del cálculo.

Porcentaje de remoción Biozyme FS/AC	42± 9%
Porcentaje de remoción sistema de lodos activados después del filtro anaeróbico de flujo ascendente	54%

Nota: Esta tabla ejemplifica la comparación entre el porcentaje de remoción de sistema de lodos activados colocado después de un filtro anaeróbico de flujo ascendente, sin embargo, para el sistema dimensionado después de la laguna de estabilización se obtuvo un porcentaje de remoción de nitrógeno de 59%.

## 5. Balance de Masa del sistema de lodos activados

Figura 63 Diagrama de flujo del sistema de lodos activados después del filtro anaeróbico de flujo ascendente, con entradas y salidas en flujo másico y en caudales para representación del balance de masa.



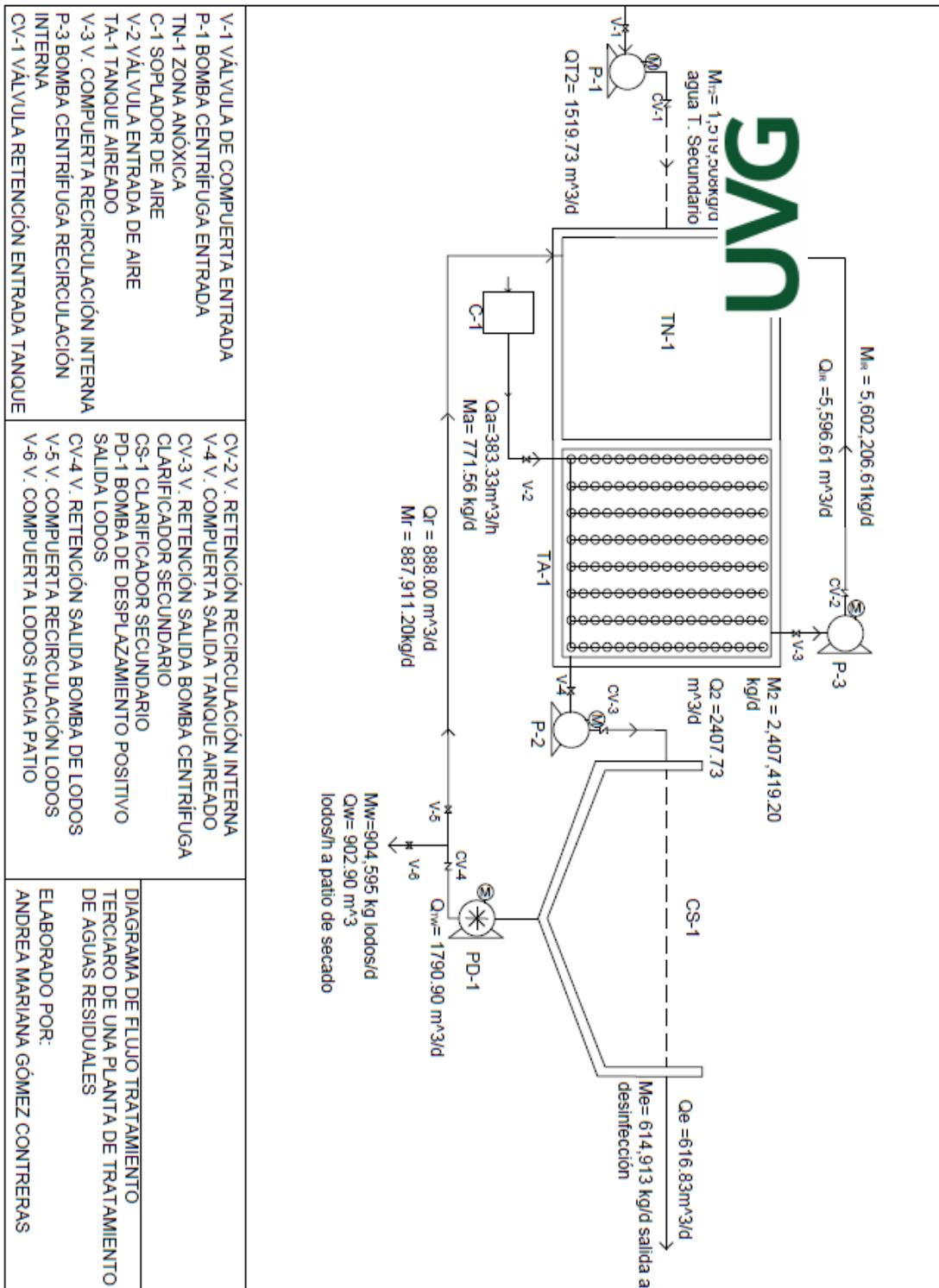
**UVG**

DIAGRAMA DE FLUJO TRATAMIENTO  
TERCIARIO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES  
ELABORADO POR:  
ANDREA MARIANA GÓMEZ CONTRERAS

CV-2 V. RETENCIÓN RECIRCULACIÓN INTERNA  
V-4 V. COMPUERTA SALIDA TANQUE AIREADO  
CV-3 V. RETENCIÓN SALIDA BOMBA CENTRIFUGA  
CLARIFICADOR SECUNDARIO  
CS-1 CLARIFICADOR SECUNDARIO  
PD-1 BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO  
SALIDA Lodos  
V-4 V. RETENCIÓN SALIDA BOMBA DE Lodos  
V-5 V. COMPUERTA RECIRCULACIÓN Lodos  
V-6 V. COMPUERTA RECIRCULACIÓN PATIO

V-1 VALVULA DE COMPUERTA ENTRADA  
P-1 BOMBA CENTRIFUGA ENTRADA  
TN-1 ZONA ANÓXICA  
C-1 SOPLADOR DE AIRE  
V-2 VALVULA ENTRADA DE AIRE  
TA-1 TANQUE AIREADO  
V-3 V. COMPUERTA RECIRCULACIÓN INTERNA  
P-3 BOMBA CENTRIFUGA RECIRCULACIÓN  
INTERNA  
CV-1 VALVULA RETENCIÓN ENTRADA TANQUE

Figura 64 diagrama de flujo del sistema de lodos activados después de laguna de estabilización, con entradas y salidas en flujo másico y caudales para representación del balance de masa.



## 6. Esquema del sistema de lodos activados

Figura 65 Esquema de sistema de remoción de nitrógeno para colocarlo después de Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

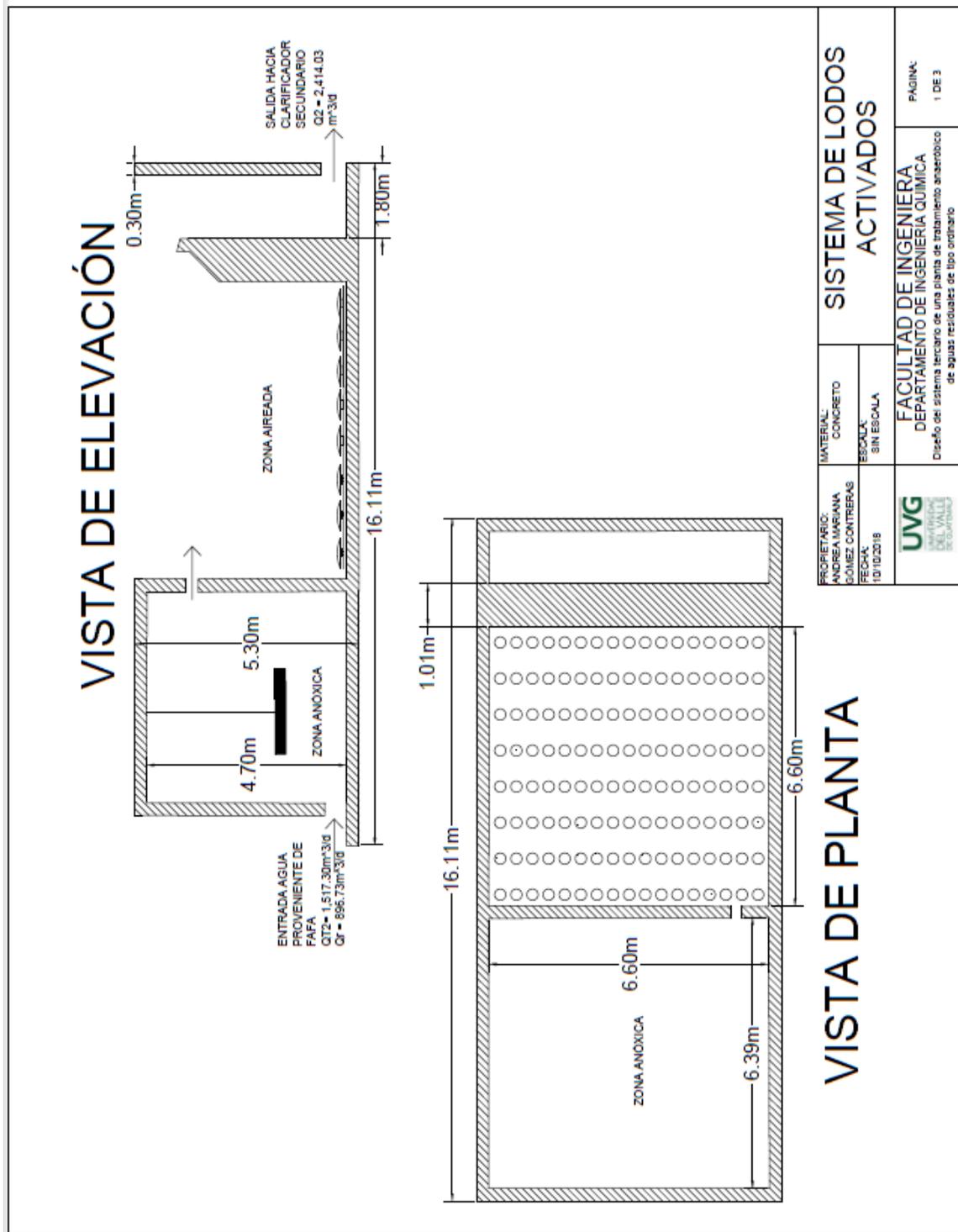
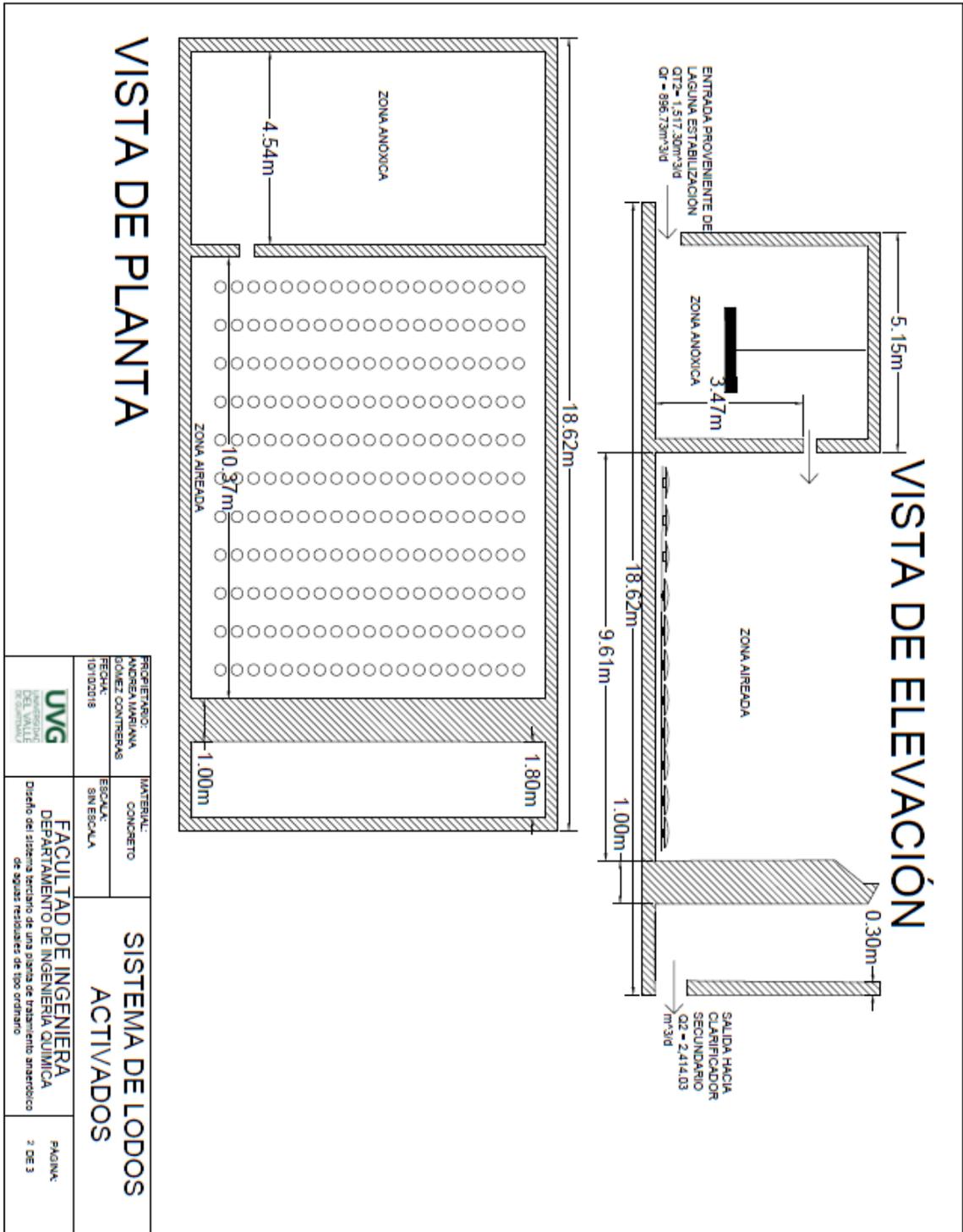
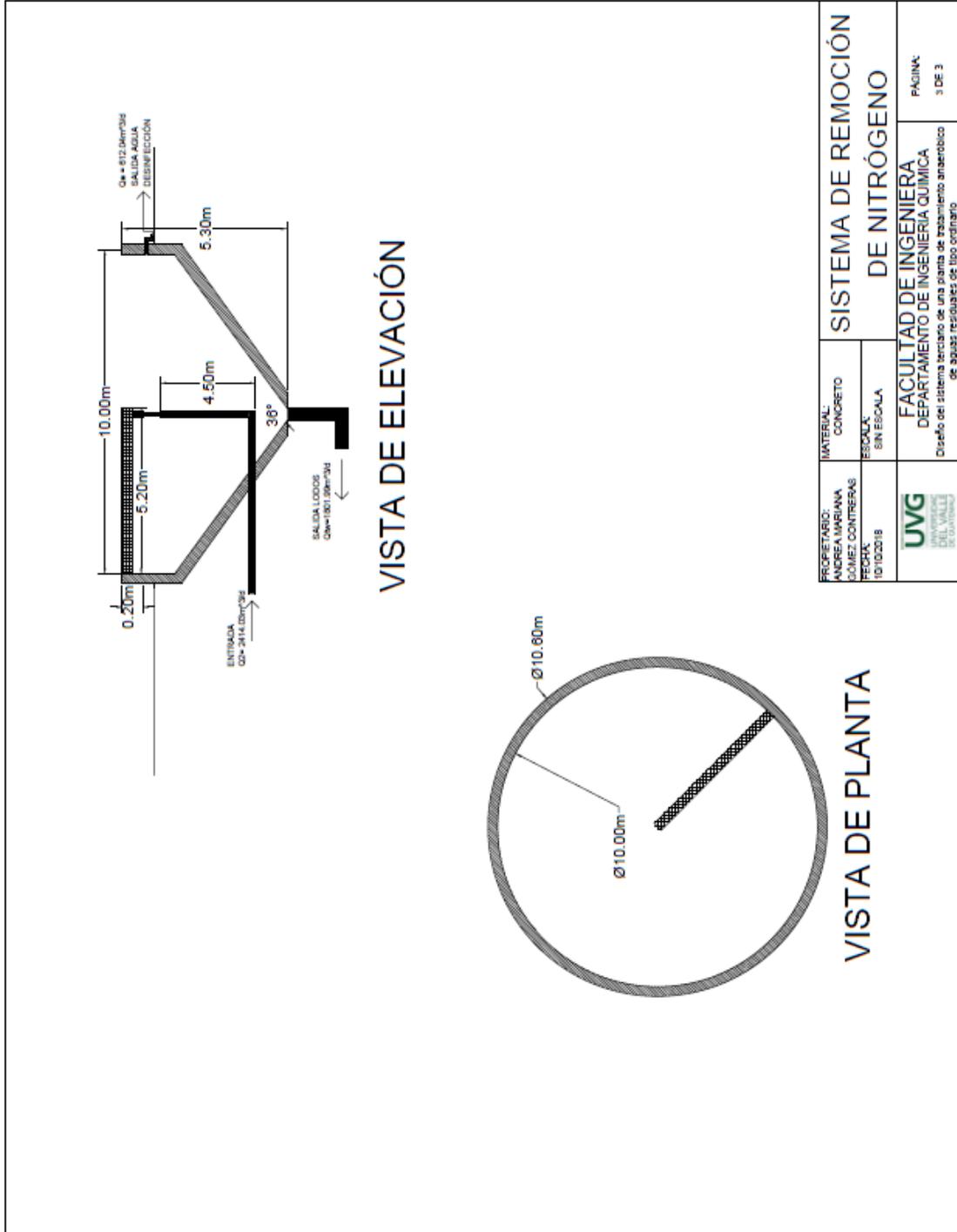


Figura 66 Esquema de sistema de remoción de nitrógeno para colocarlo después de Laguna de estabilización anaeróbica



PROPIETARIO: ANDELA MARINIANA SOLMEZ CONTRERAS	MATERIAL: CONCRETO	<b>SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS</b>	
FECHA: 10/10/2018	ESCALA: SIN ESCALA	<b>UNIVERSIDAD DE VALLE</b>	
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA</b> Diseño del sistema secundario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario	
PAGINA:			2 DE 3

Figura 67 Esquema de clarificador secundario para completar el tratamiento de lodos activados.<sup>28</sup>



<sup>28</sup> Se colocó un único esquema pues las dimensiones del clarificador secundario porque son las mismas para ambos sistemas propuestos pues el balance de masa no tuvo una variación significativa.

## 7. Combinaciones de tratamientos realizadas para cumplir con el parámetro de salida requerido por el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Tabla 56 Medidas y parámetros del sistema de lodos activados colocado después de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente con la propuesta de derivación del 15% del caudal del tratamiento primario.

ZONA AIREADA		
Parámetro	Valor	Unidades
Oxígeno requerido	750.65	kg/d
Volumen	281	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	4	h
Cantidad de difusores empleados	214	Unidades
Alto	4.5	m
Ancho	8	m
Profundidad	8	m
ZONA ANÓXICA		
Volumen	189.97	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	3	h
Tasa de desnitrificación	63	%
Concentración de nitrógeno total	35.08	g/ m <sup>3</sup>

Nota: El dimensionamiento se hizo como se muestra en la sección 1, 2 y 3 de anexos modificando los parámetros de entrada del agua a los que se muestran en la sección 11 de anexos. Para este tratamiento no se diseñaron los sistemas auxiliares pues no forman parte de la propuesta final al no cumplir con los parámetros de salida requeridos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Tabla 57 Medidas y parámetros del sistema de lodos activados colocado después de la laguna de estabilización anaeróbica, con la propuesta de derivación del 15% del caudal del tratamiento primario

ZONA AIREADA		
Parámetro	Valor	Unidades
Oxígeno requerido	830.79	kg/d
Volumen	427	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	7	h
Cantidad de difusores empleados	241	Unidades
Alto	5	m
Ancho	9	m
Profundidad	9	m
ZONA ANÓXICA		
Volumen	189.97	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	3	h
Tasa de desnitrificación	69	%
Concentración de Nitrógeno total	29.62	g/ m <sup>3</sup>

Nota: El dimensionamiento se realizó como se muestra en la sección 1, 2 y 3 de anexos modificando los parámetros de entrada del agua a los que se muestran en la sección 11 de anexos. Para este tratamiento no se diseñó ninguno de los sistemas auxiliares pues no forman parte de la propuesta final al no cumplir con los parámetros de salida requeridos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Tabla 58 Concentraciones de nitrógeno total de salida obtenidas al combinar el producto Biozyme FS/AC en el sistema de lodos activados colocado después de FAFA

Concentración de nitrógeno en el efluente hacia desinfección del sistema de lodos activados colocado luego de FAFA		
Concentración de nitrógeno total en la salida del sistema de lodos activados	43.88	g/m <sup>3</sup>
Concentración de nitrógeno total luego de aplicar el producto	19.95	g/m <sup>3</sup>
NO <sub>3</sub> -N	19.45	g/m <sup>3</sup>
NH <sub>4</sub> -N	0.50	g/m <sup>3</sup>

Nota: La dosis requerida de producto para lograr este porcentaje de remoción es de 1.2kg cada 8 días la cuál fue calculada como se puede observar en la sección 9 de anexos. Lo que equivale a 56.52kg al año de producto agregado.

Tabla 59 Concentraciones de nitrógeno total de salida obtenidas al combinar el producto Biozyme FS/AC en el sistema de lodos activados colocado después de laguna de estabilización anaeróbica

Concentración de nitrógeno en el efluente hacia desinfección del sistema de lodos activados colocado luego de laguna de estabilización anaeróbica		
Concentración de nitrógeno total en la salida del sistema de lodos activados	38.81	g/m <sup>3</sup>
Concentración de nitrógeno total luego de aplicar el producto	17.00	g/m <sup>3</sup>
NO <sub>3</sub> -N	16.9	g/m <sup>3</sup>
NH <sub>4</sub> -N	0.50	g/m <sup>3</sup>

Nota: La dosis requerida de producto para lograr este porcentaje de remoción es de 2.1kg cada 8 días la cuál fue calculada como se puede observar en la sección 9 de anexos. Lo que equivale a 100kg al año de producto agregado

## D. Módulo 4: Diseño del tratamiento cuaternario para una planta de tratamiento de aguas residuales

### 1. Dimensiones y características de los equipos que conforman el sistema propuesto

Tabla 60. Características del tanque de contacto diseñado para el proceso de desinfección

Químico desinfectante	Dimensiones				Tiempo de residencia, s (min)
	Largo (L <sub>T</sub> ), m	Ancho (W <sub>T</sub> ), m	Alto (H), m	Ancho canal (W <sub>ch</sub> ), m	
NaOCl	3.35	5.65	2.20	0.50	2484.55 (41.41)

Nota: Para los cálculos referirse a la memoria de cálculo, página 456. Para ver el esquema del tanque dimensionado referirse al apartado C, de esta misma sección, en la página 183. Para la determinación del químico desinfectante ver la matriz construida en la página 463.

Memoria de cálculo: Esta memoria incluye los principales cálculos para el dimensionamiento de los equipos propuestos. Ver anexos, página 454.

Tabla 61. Volumen, dimensiones y material del tanque de almacenamiento dimensionado para hipoclorito de sodio

Equipo	Características	
Tanque almacenamiento (cilíndrico)	Volumen, m <sup>3</sup> (gal)	0.189 (50)
	Diámetro, m	0.55
	Altura, m	0.80
	Material	HDPE
	Factor seguridad	15 %

Nota: Para los cálculos referirse a la memoria de cálculo, página 456

Tabla 62. Caudal, cabeza y materiales de la bomba peristáltica propuesta

Equipo	Características	
Bomba peristáltica	Caudal, m <sup>3</sup> /s (L/d)	6.36*10 <sup>-8</sup> (5.50)
	Cabeza, kPa	170
	Material carcasa	Policarbonato
	Material tubo peristáltico	Santoprene®
	Material tubos succión/descarga	Polietileno

Nota: Para los cálculos referirse a la memoria de cálculo, página 455. En la página 470 puede observarse la compatibilidad de los distintos materiales con el hipoclorito de sodio. En la página 469 se encuentra un esquema de la bomba dosificadora instalada.

Tabla 63. Longitud, diámetro y material del mezclador estático propuesto

Equipo	Características	
Mezclador estático tipo SMV	Longitud, m	0.80
	Diámetro nominal, m (in)	0.1016 (4)
	Material	PVC

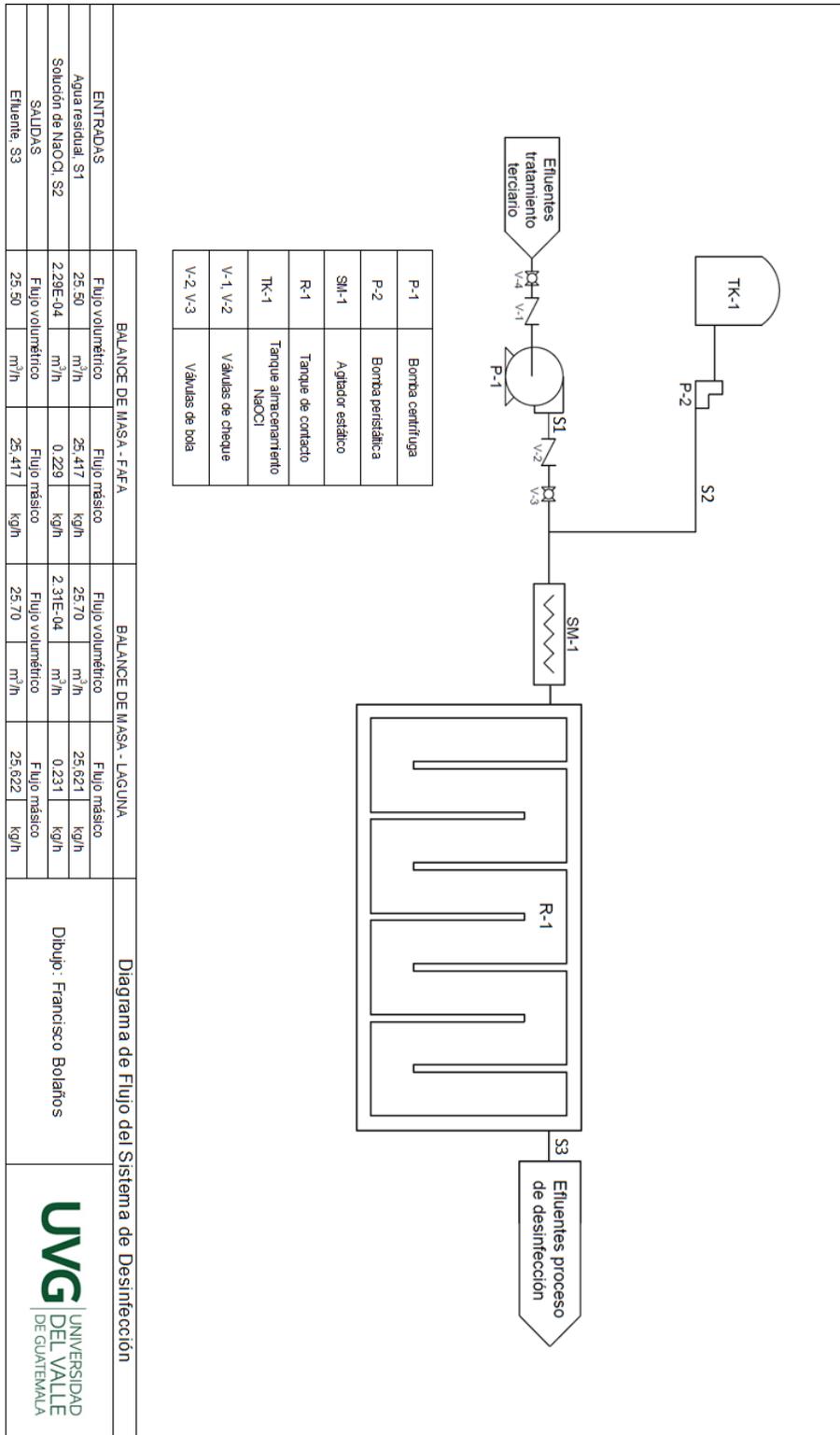
Nota: Para los cálculos referirse a la memoria de cálculo, página 459

Tabla 64. Dimensiones y características de la bomba centrífuga dimensionada para el sistema propuesto

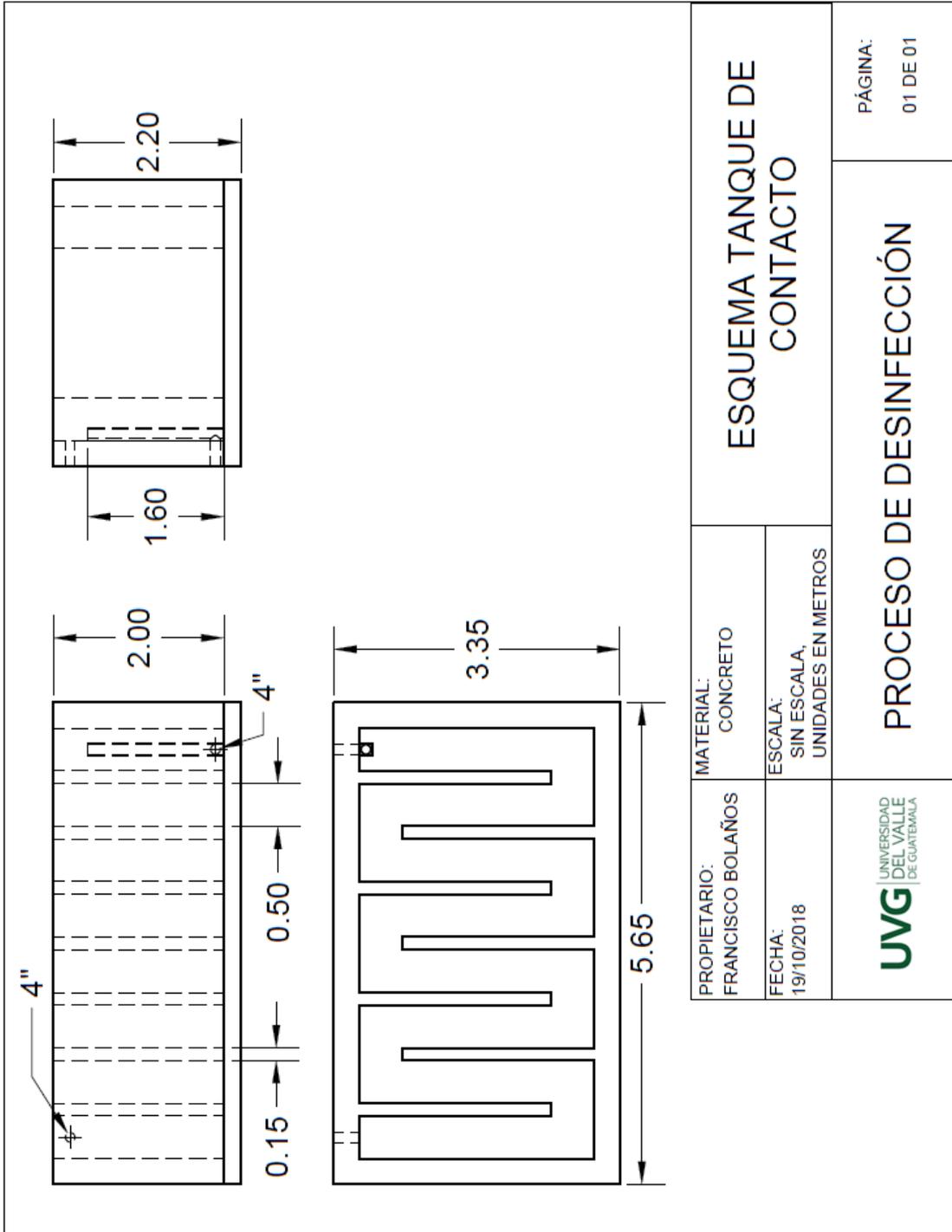
Bomba centrífuga	Caudal, m <sup>3</sup> /h	25.50
	Cabeza, m	4.04
	Eficiencia	50 %
	Diámetro de succión, m (in)	0.0762 (3)
	Diámetro de descarga, m (in)	0.0508 (2)
	Diámetro de impulsor, m (in)	0.1524 (6)
	Material carcasa	Hierro fundido
	Material impulsor	Hierro fundido
	BHP, W (hp)	745.7 (1)

Nota: Para los cálculos referirse a la memoria de cálculo, página 460 , para ver la curva característica de la bomba ir a la página 472.

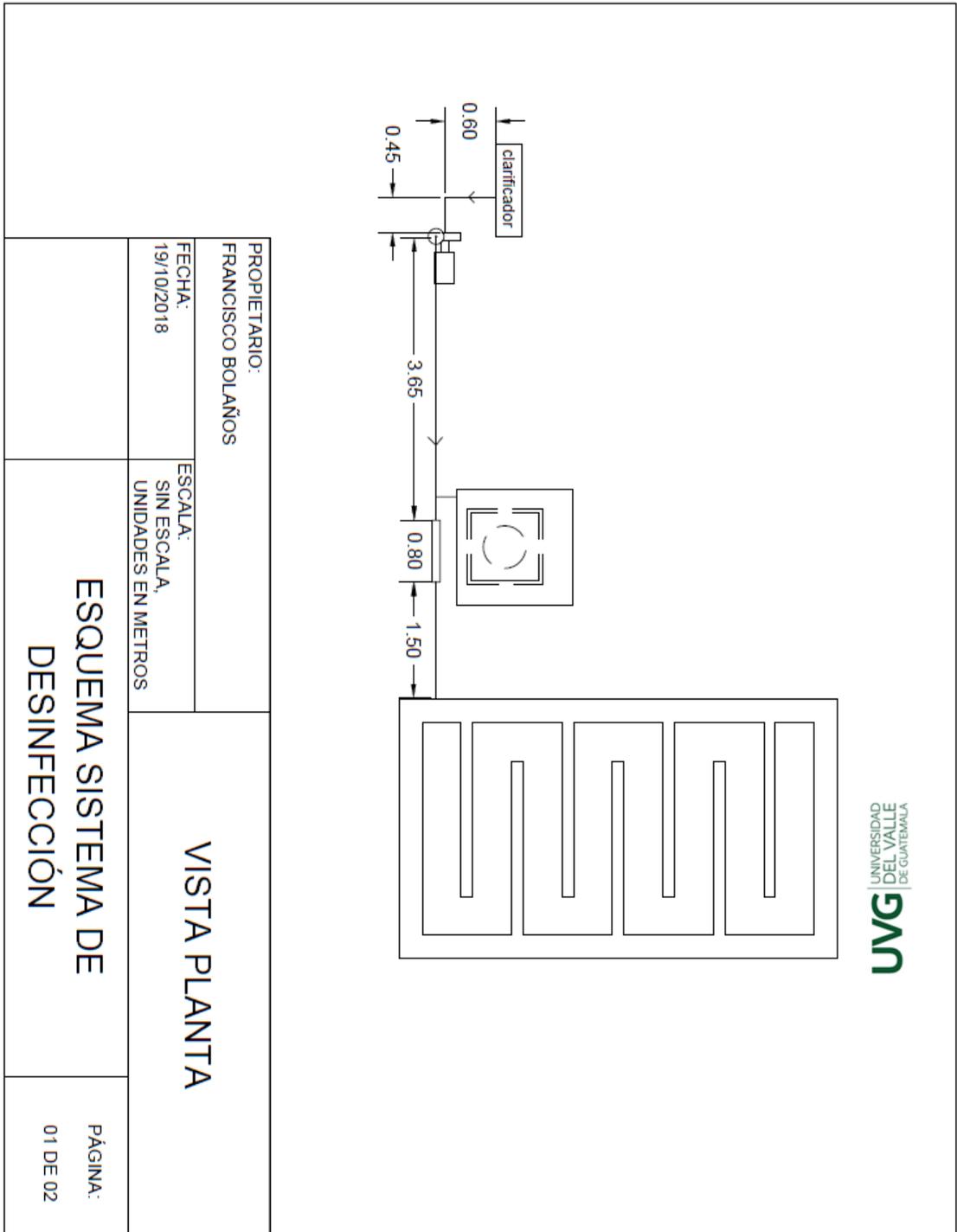
## 2. Diagrama de flujo de la operación diseñada



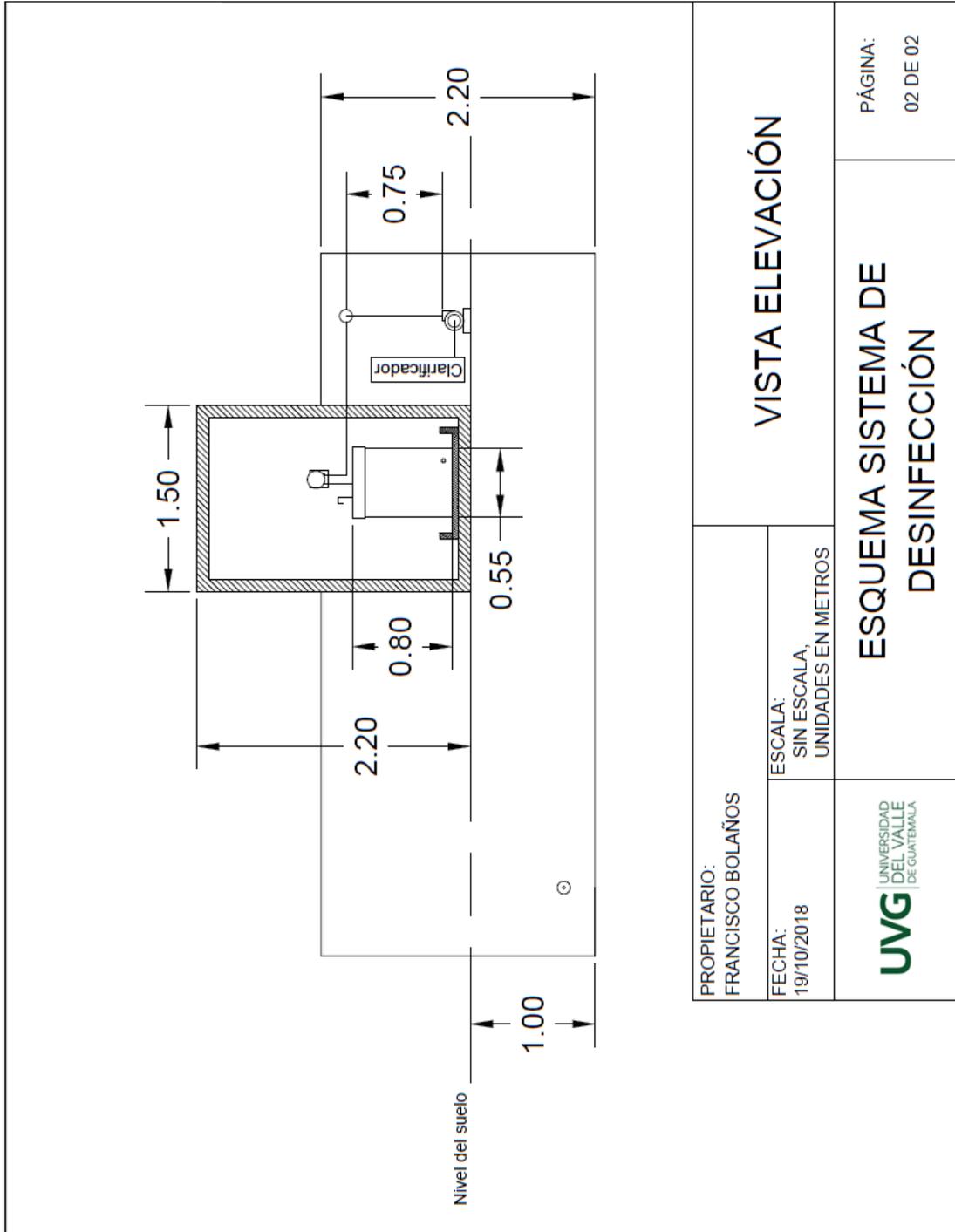
a. Esquema del tanque de contacto



- b. Esquema del sistema de desinfección
- 1) Esquema del sistema de desinfección en vista planta



2) Esquema del sistema de desinfección en vista elevación



## E. Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales

### 1. Proceso de manejo de biogás

Tabla 65. Evaluación de uso de biogás para generación de energía eléctrica.

Parámetro	Valor	Unidades
Cantidad de biogás	463.84	m <sup>3</sup> /día
Temperatura del biogás	25.00	°C
Presión del biogás	3.74	kPa
Energía contenida en el biogás	412.80	MJ/h
Energía requerida por microturbina Capstone CR30	457	MJ/h
Eficiencia de microturbina Capstone CR30	26	%
Potencia de salida de microturbina Capstone CR30	30	kW

Notas: La temperatura corresponde a condiciones ambientales del ingenio. La presión es un valor teórico. Las especificaciones de la microturbina se encuentran detalladas en anexos.

Tabla 66. Evaluación de uso de biogás en cocina industrial para sustituir GLP.

Parámetro	Valor	Unidades
Energía contenida en el biogás	114.67	kW
Energía diaria requerida por el ingenio en la cocina industrial	0.32	kW
Flujo de biogás para suplir requerimiento energético	1.31	m <sup>3</sup> /día

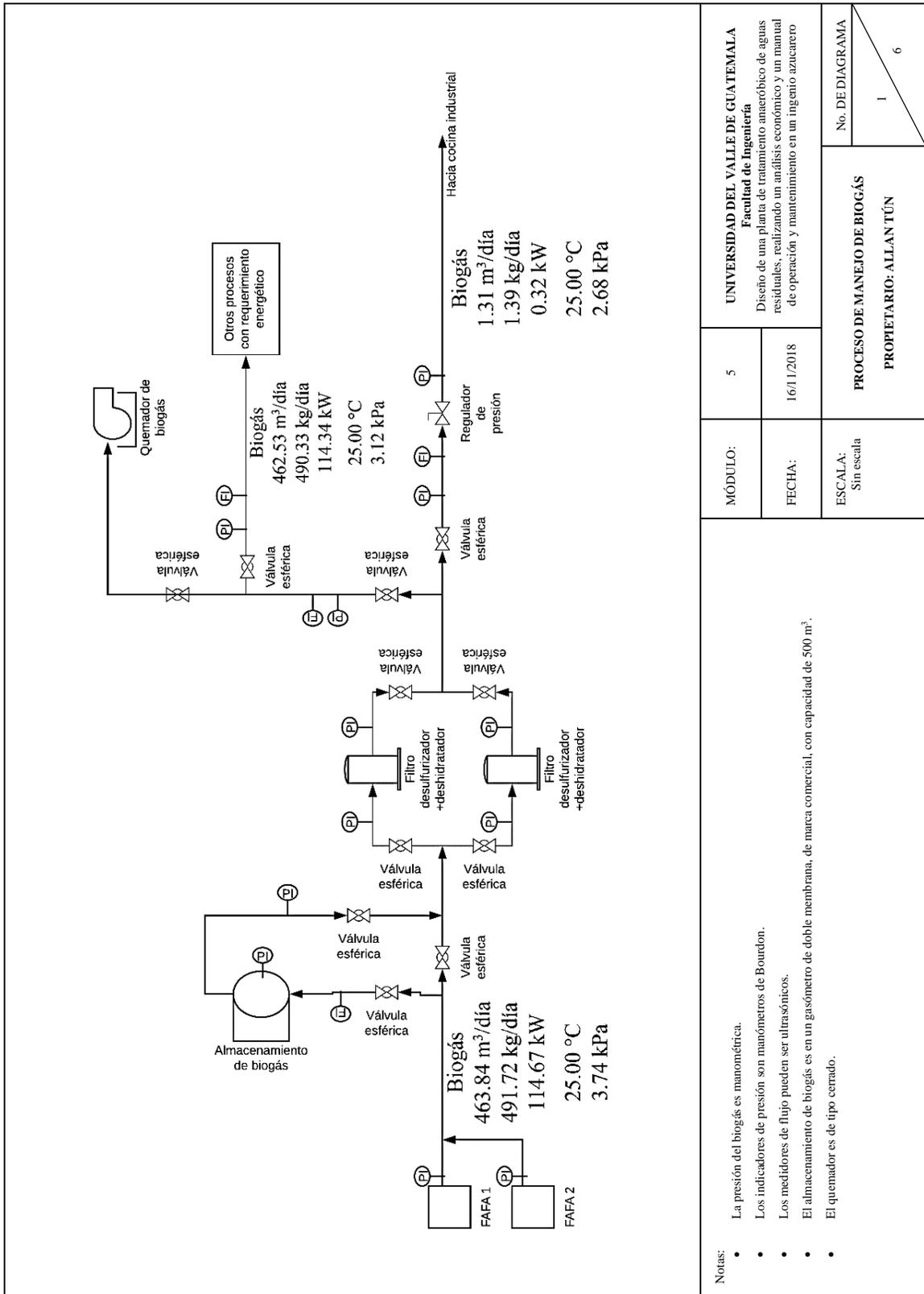
Notas: Los datos de flujo y condiciones de biogás son los mismos que los presentados en la Tabla 66. El requerimiento energético fue calculado según datos proveídos por personal del ingenio.

Tabla 67. Especificaciones del tratamiento para remoción de sulfuro de hidrógeno del biogás producido.

Parámetro	Valor	Unidades
Composición inicial teórica de H <sub>2</sub> S en biogás	130.44	ppm
Cantidad teórica requerida de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para remover el H <sub>2</sub> S del biogás	0.090	kg/día
Composición final de H <sub>2</sub> S en biogás	13.04	ppm

Notas: La composición inicial se calculó según los parámetros teóricos definidos en el cuadro 66. El requerimiento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y la composición final de H<sub>2</sub>S se calculó según una eficiencia de 90% descrita por proveedores comerciales de los filtros Puxin 250L.

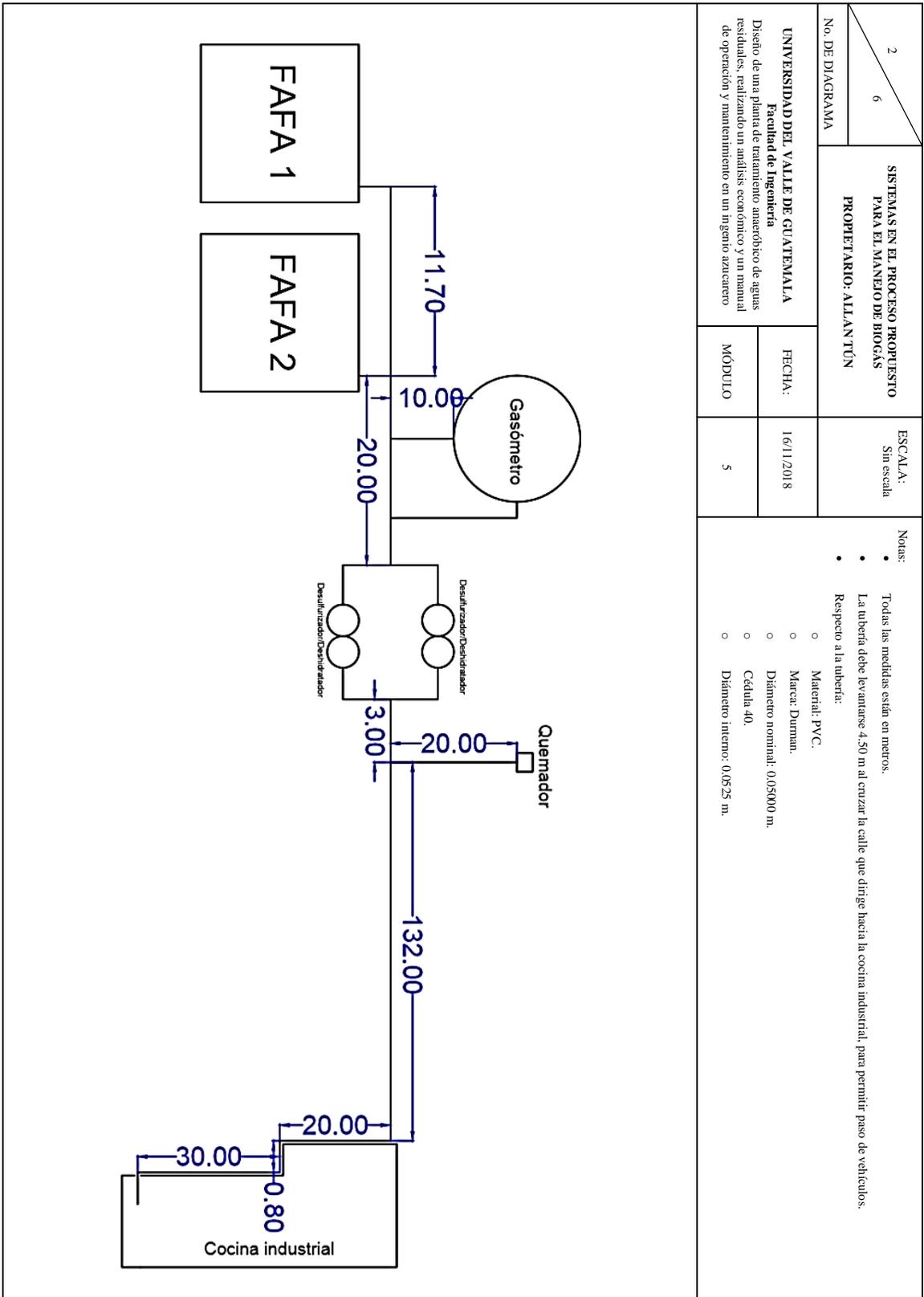
Figura 68. Diagrama del proceso propuesto para el manejo de biogás.



- Notas:
- La presión del biogás es manométrica.
  - Los indicadores de presión son manómetros de Bourdon.
  - Los medidores de flujo pueden ser ultrasónicos.
  - El almacenamiento de biogás es en un gasómetro de doble membrana, de marca comercial, con capacidad de 500 m<sup>3</sup>.
  - El quemador es de tipo cerrado.

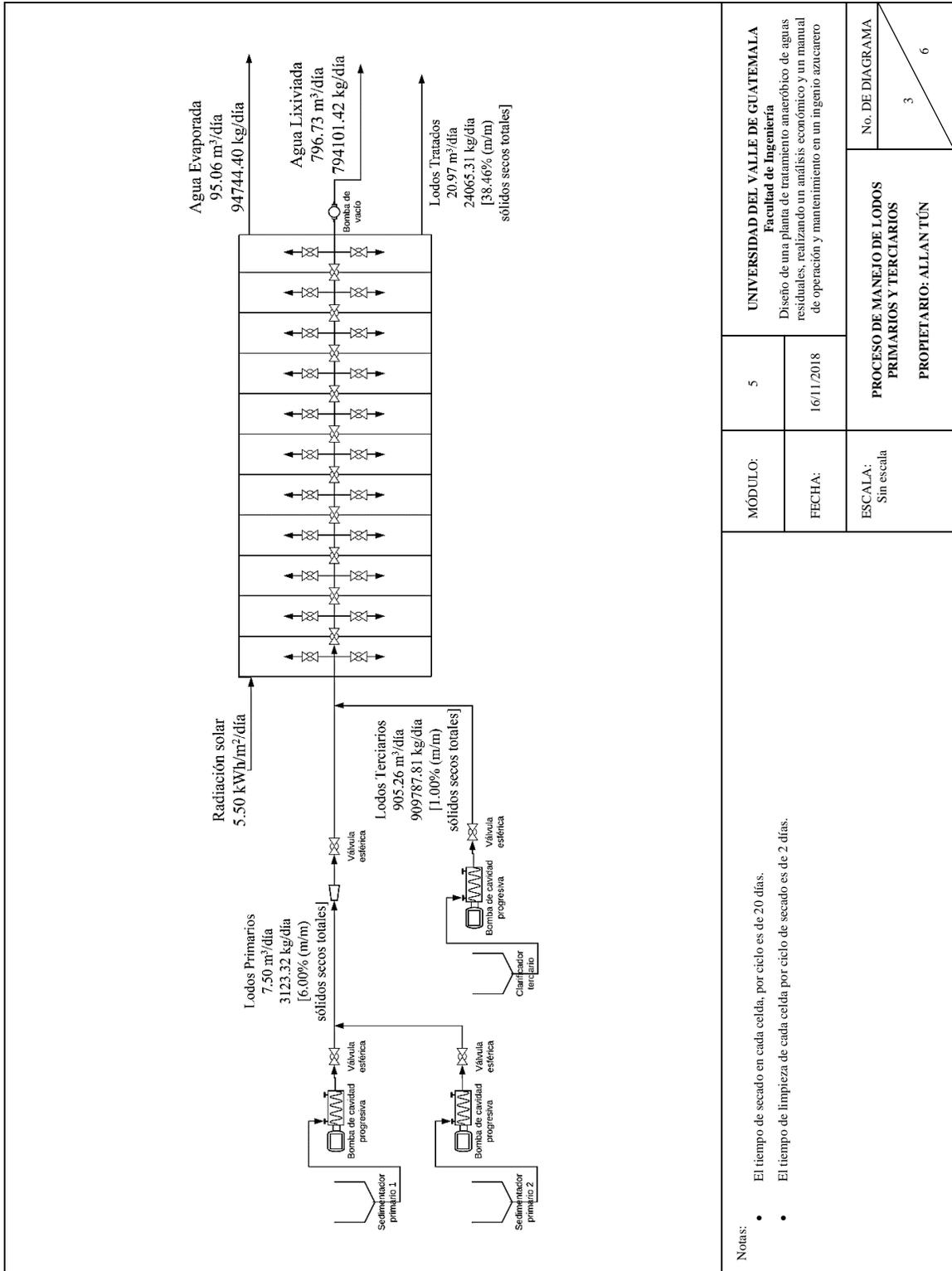
MÓDULO:	5	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA Facultad de Ingeniería Diseño de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, realizando un análisis económico y un manual de operación y mantenimiento en un ingenio azucarero	No. DE DIAGRAMA 1 / 6
FECHA:	16/11/2018		
ESCALA: Sin escala	PROCESO DE MANEJO DE BIOGÁS PROPIETARIO: ALLANTÚN		

Figura 69. Diagrama de los sistemas en el proceso propuesto para el manejo de biogás.



## 2. Proceso de manejo de lodos

Figura 70. Diagrama del proceso propuesto para el manejo de lodos de los tratamientos primario y terciario.



Notas:

- El tiempo de secado en cada celda, por ciclo es de 20 días.
- El tiempo de limpieza de cada celda por ciclo de secado es de 2 días.

MÓDULO:	5	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA Facultad de Ingeniería Diseño de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, realizando un análisis económico y un manual de operación y mantenimiento en un ingenio azucarero	No. DE DIAGRAMA 3 / 6
FECHA:	16/11/2018		
ESCALA: Sin escala	PROCESO DE MANEJO DE LODOS PRIMARIOS Y TERCIARIOS PROPIETARIO: ALLAN TÚN		

Figura 71. Diagrama del proceso propuesto para el manejo de lodos del tratamiento secundario.

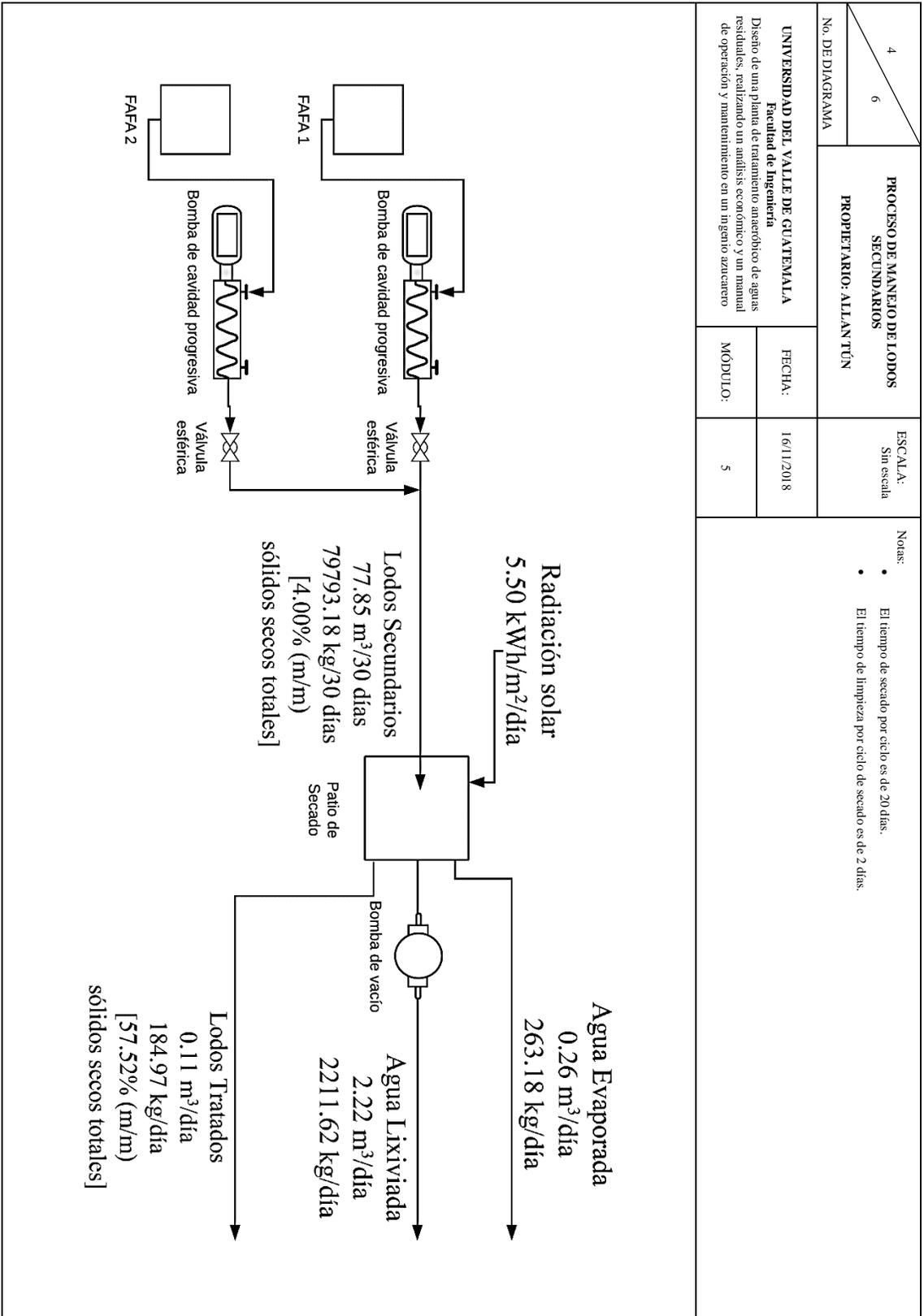
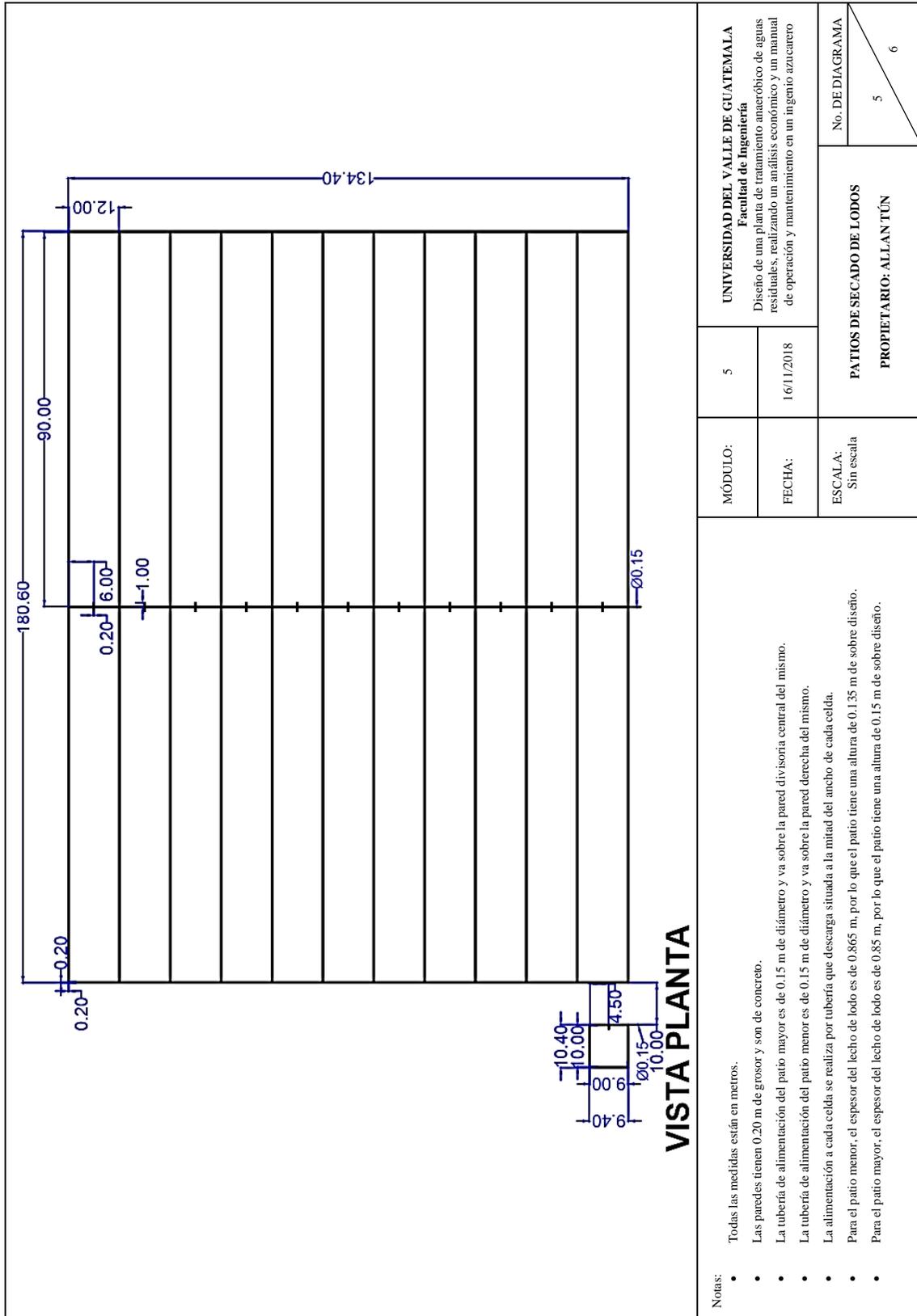


Figura 72. Diagrama en vista planta de los patios propuestos para el secado de lodos.



**Notas:**

- Todas las medidas están en metros.
- Las paredes tienen 0.20 m de grosor y son de concreto.
- La tubería de alimentación del patio mayor es de 0.15 m de diámetro y va sobre la pared divisoria central del mismo.
- La tubería de alimentación del patio menor es de 0.15 m de diámetro y va sobre la pared derecha del mismo.
- La alimentación a cada celda se realiza por tubería que descarga situada a la mitad del ancho de cada celda.
- Para el patio menor, el espesor del lecho de lodo es de 0.865 m, por lo que el patio tiene una altura de 0.135 m de sobre diseño.
- Para el patio mayor, el espesor del lecho de lodo es de 0.85 m, por lo que el patio tiene una altura de 0.15 m de sobre diseño.

MÓDULO:	5	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA Facultad de Ingeniería Diseño de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, realizando un análisis económico y un manual de operación y mantenimiento en un ingenio azucarero	No. DE DIAGRAMA
FECHA:	16/11/2018		
ESCALA:	Sin escala	PATIOS DE SECADO DE LODOS PROPIETARIO: ALLANTUN	

Figura 73. Diagrama de una celda del patio de secado de lodos de los tratamientos primario y terciario.

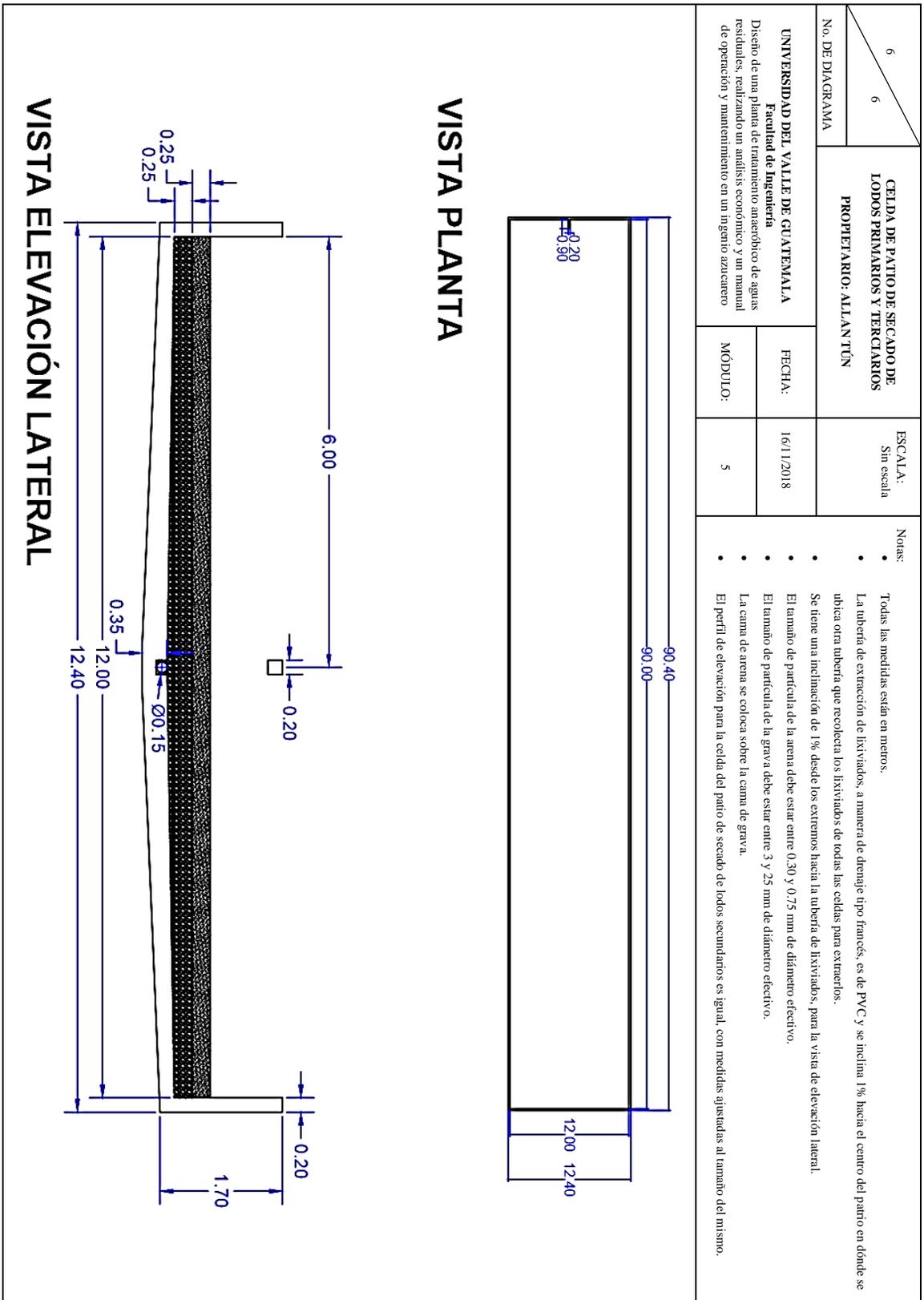


Tabla 68. Especificaciones de tubería de PVC para el transporte de lodos y la extracción de lixiviados.

Parámetro	Unidades	Tratamiento generador de los lodos a transportar			Patio de secado generador de lixiviados a extraer	
		Primario	Secundario	Terciario	Mayor	Menor
Diámetro nominal	m	0.0750 <sup>a</sup> 0.1500 <sup>b</sup>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
Cédula	---	40	40	40	40	40
Diámetro interno	m	0.0779 <sup>a</sup> 0.1541 <sup>b</sup>	0.1541	0.1541	0.1541	0.1541
Diámetro externo	m	0.0889 <sup>a</sup> 0.1683 <sup>b</sup>	0.1683	0.1683	0.1683	0.1683
Longitud	m	213	111	159 50 <sup>c</sup>	140	21

Notas: Las especificaciones corresponden a la marca Durman.

<sup>a</sup>Corresponde al tramo de tubería desde la descarga de los sedimentadores primarios hacia la expansión para unir el flujo de lodos primarios con el flujo de lodos terciarios.

<sup>b</sup>Corresponde al tramo de tubería desde la unión con el flujo de lodos terciarios, hacia el patio de secado mayor.

<sup>c</sup>Corresponde al tramo de tubería para recirculación de lodos hacia el tratamiento terciario.

Tabla 69. Especificaciones de las bombas para el transporte de lodos y la extracción de lixiviados.

Parámetro	Unidades	Tratamiento generador de los lodos a transportar			Patio de secado generador de lixiviados a extraer	
		Primario	Secundario	Terciario	Mayor	Menor
Tiempo de bombeo al día	horas	0.5	12	12 <sup>a</sup> 12 <sup>b</sup>	12	1.5
Eficiencia de la bomba	%	50	50	50	60	60
Potencia requerida del motor	kW	1.25	0.876	1.76	1.05	0.46
Tipo de bomba	---	Desplazamiento positivo de cavidad progresiva			De vacío	

Notas: Las eficiencias se asumieron teóricas.

<sup>a</sup> Corresponde al bombeo hacia el patio de secado de lodos.

<sup>b</sup> Corresponde al bombeo de recirculación hacia el tratamiento terciario.

## F. Módulo 6: Manual de operación y mantenimiento preventivo

### 1. Manual de operaciones

Las plantas de tratamiento de aguas residuales tienen como objetivo eliminar los contaminantes del agua por medio de procesos físicos, químicos y biológicos. Las operaciones principales que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento constan en la eliminación de sólidos gruesos, digestión anaerobia, reducción de nutrientes y desinfección de aguas tratadas.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, además de eliminar contaminantes, forma subproductos que pueden ser aprovechables económicamente, como lo es el gas metano, lodos deshidratados y lixiviados.

El presente manual de operaciones debe utilizarse como material para capacitación de personal nuevo, con el fin de comprender en su totalidad las operaciones, el equipo y tanques necesarios para la planta de tratamiento de aguas residuales.

Al presente manual se debe incorporar las fichas técnicas de los equipos obtenidas por los proveedores, así como un diagrama de distribución de planta.

Figura 74. Diagrama de operaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales

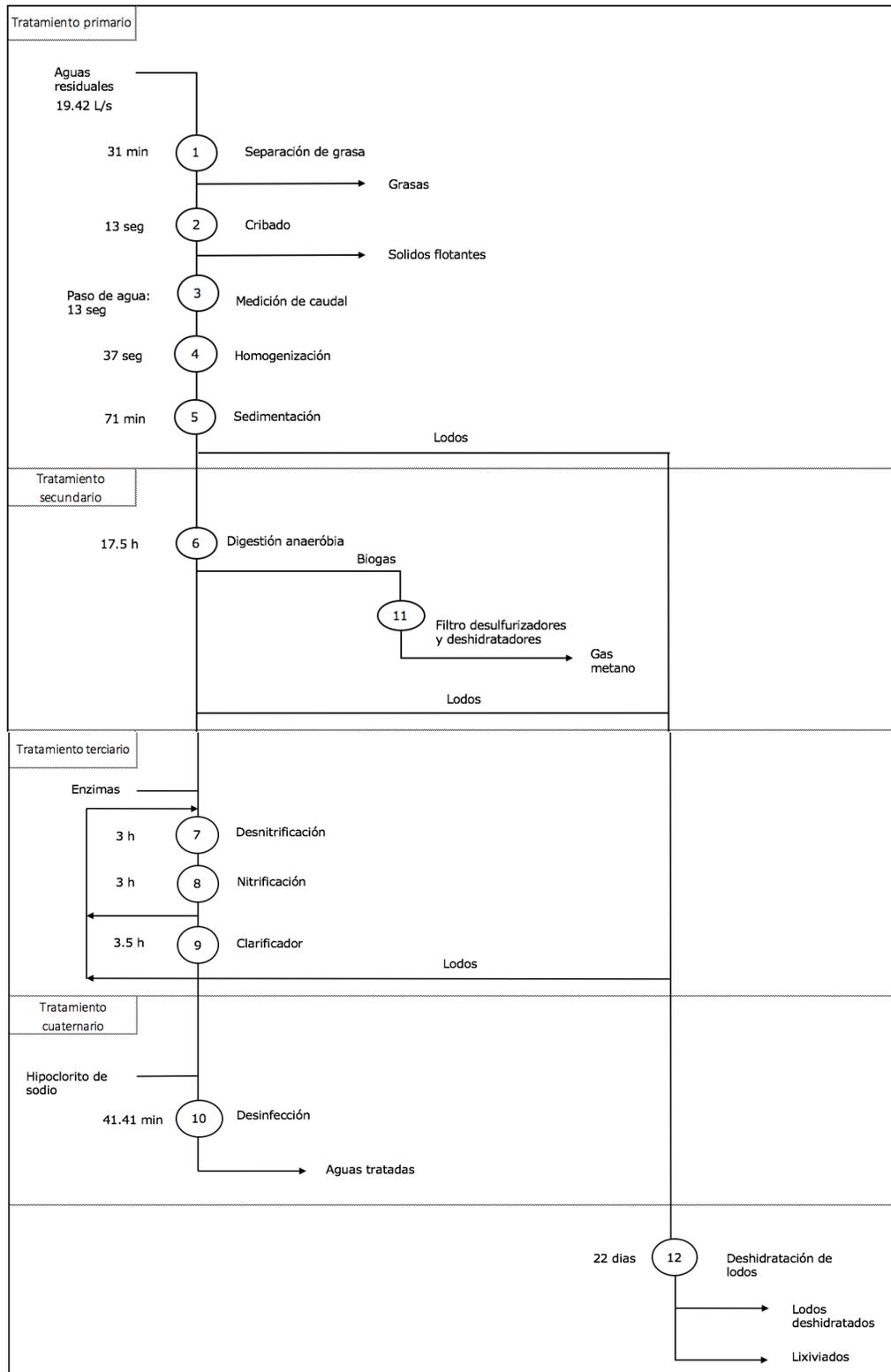


Tabla 70. Tiempo de operación

Aguas residuales tratadas		
Elemento	Número	Tiempo
Operación	10	1 día y 5 h
Lodos		
Elemento	Numero	Tiempo
Operación	4	20 días

Tabla 71. Especificación de la planta de tratamiento de aguas

Tipo de aguas residuales	Ordinario	
Caudal de aguas residuales	19.42 L/s	
	Primera propuesta	Segunda propuesta
Aguas residuales tratadas	612.05 m <sup>3</sup> /día	616.84 m <sup>3</sup> /día
Lodos deshidratados	21.1 m <sup>3</sup> /día	20.68 m <sup>3</sup> /día
Biogás	463.48 m <sup>3</sup> /día	208.82 m <sup>3</sup> /día
Agua lixiviada	798.95 m <sup>3</sup> /día	794.81 m <sup>3</sup> /día

A continuación, se detalla las operaciones que conforman la planta de tratamiento de aguas residuales.

a. Tratamiento primario

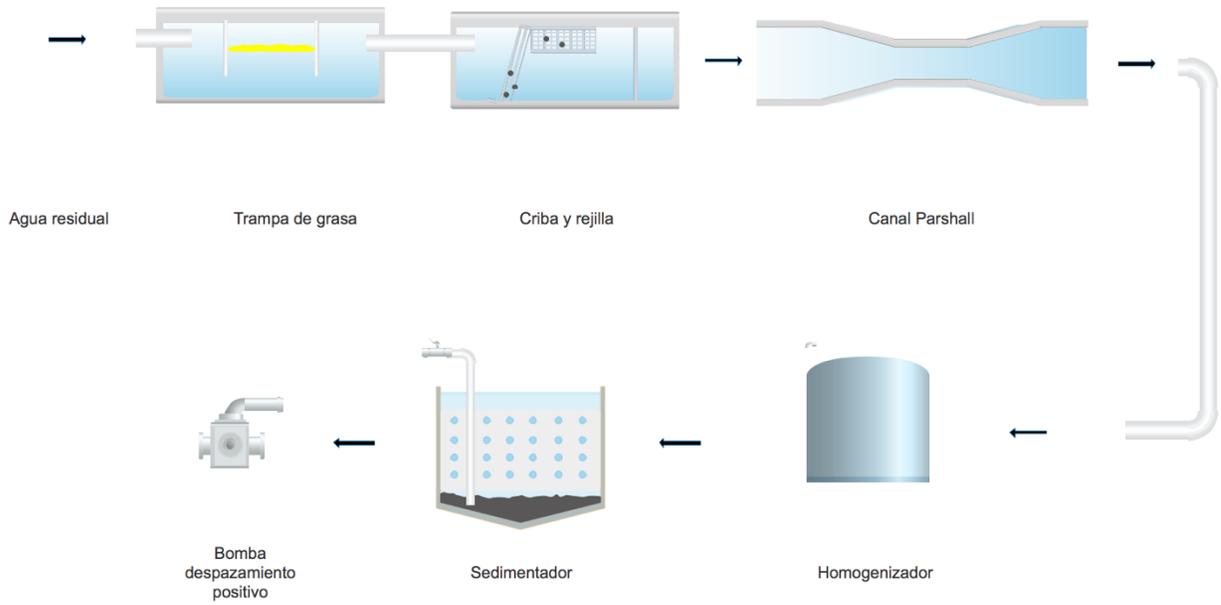
El tratamiento primario tiene por objeto remover, reducir o modificar sólidos gruesos y finos, grasas y aceites presentes en el agua residual, que pueden causar problemas operativos o incrementar la frecuencia de mantenimiento de los equipos por desgaste o atascamiento.

En dicho tratamiento se separa del agua los sólidos gruesos y grasas, por medio de operaciones físicas, mecánicas o manuales.

Es necesario realizar el tratamiento para proteger los equipos como bombas, aireadores y tuberías; evitar dificultades en el tratamiento por grasas y aceites; y en general, para conservar en buenas condiciones el sistema de tratamiento (CONAGUA, 2015).

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del proceso.

Figura 75. Diagrama de flujo - Tratamiento primario



A continuación, se muestra un resumen de las etapas del tratamiento primario y equipos necesarios para una correcta operación del sistema.

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 101 <sup>29</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Separación de aceites y grasas
Equipo / Estructura	Trampa de aceites y grasas
Operación previa	-
Operación posterior	Cribado

Figura 76. Trampa de grasas



#### Función y uso

Etapa 1. El agua residual ingresa por medio de tubería al tanque de separación de grasa.

Etapa 2. El tanque posee, en la parte superior, una pantalla de distribución cercana a la tubería de entrada y una pantalla de retención cercana a la tubería de salida. Esto crea una cámara de separación que permite retener las grasas que, debido a la diferencia de densidades, permanecen en la parte superior y el agua pasa por debajo de la trampa para el siguiente proceso.

Etapa 3. El agua residual con menor concentración de grasas se descarga a por un tubo sumergido por acción de rebalse.

<sup>29</sup> MO - 101: Manual de operaciones - Tratamiento primario, primera operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 101 <sup>30</sup>
Vigencia	Activo

#### Especificaciones técnicas

Flujo de ingreso de agua residual: 19.42 L/s

Ubicación: Subterráneo

Tiempo de retención: 31 min

#### Tanque

Construcción: Obra gris

Cubierto por una tapadera de cemento: grosor 6 cm

Longitud: 5.75 m

Ancho: 2.5 m

Alto: 2.5 m

#### Pantalla de distribución y retención

Material: Obra gris

Ancho: 2.5 m

Alto: 2.1 m

---

(Hidroplayas, 2010)

---

<sup>30</sup> MO - 101: Manual de operaciones - Tratamiento primario, primera operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 102 <sup>31</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Cribado
Equipo / Estructura	Canal, criba y rejilla
Operación previa	Separación de aceites y grasas
Operación posterior	Medición de caudal

Figura 77. Cribas



#### Función y uso

Etapa 1. El agua residual tratada por la trampa de grasa es ingresada al canal por medio de tubería. Dicha agua pasa a través de una criba, permitiendo retener los sólidos gruesos flotantes, tales como bolsas, papel higiénico, toallas sanitarias, conservativos, entre otros.

Etapa 2. El agua residual pasa a través de una rejilla permitiendo retener sólidos medianos y finos para su eliminación.

Etapa 3. El agua residual continúa al siguiente proceso.

<sup>31</sup> MO - 102: Manual de operaciones - Tratamiento primario, segunda operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 102 <sup>32</sup>
Vigencia	Activo

Especificaciones físicas y técnicas

Ubicación: Subterráneo

Tiempo de paso de agua residual: 13 s

Canal de cribado

Construcción: Obra gris

Longitud: 2 m

Ancho: 0.5 m

Alto: 0.3 m

Criba

Material: metal

Inclinación: 40° sobre el eje vertical

Cantidad de barros: 13 unidades

Ancho de la sección transversal de barros: 0.025 m

Canal de rejillas

Construcción: Obra gris

Longitud: 2 m

Ancho: 0.5 m

Alto: 0.3 m

Rejilla

Material: Electro malla de acero al carbón

Inclinación: 40° sobre el eje vertical

Largo: 0.5 m

Ancho: 0.78 m

---

<sup>32</sup> MO - 102: Manual de operaciones - Tratamiento primario, segunda operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 103 <sup>33</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Medición de caudal
Equipo / Estructura	Canal Parshall
Operación previa	Cribado
Operación posterior	Homogenización de caudal

Figura 78. Canal Parshall



#### Función y uso

Es una estructura hidráulica que permite conocer la cantidad de agua tratada, así como su variación a lo largo del día.

Etapas 1. El agua tratada por la criba y rejilla ingresa por un extremo del canal Parshall de manera continua.

Etapas 2. El agua pasa a través del canal donde se estabiliza el flujo y es posible realizar la medición de caudal por medio de un piezómetro.

Etapas 3. El agua residual es trasladada por gravedad al tanque homogeneizador por medio de tubería.

<sup>33</sup> MO - 103: Manual de operaciones - Tratamiento primario, tercera operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 103 <sup>34</sup>
Vigencia	Activo

Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Construcción: Obra gris

Tiempo de paso: 13 s

Longitud de garganta: 0.86 m

Longitud de sección convergente: 0.31 m

Longitud de sección divergente: 0.46 m

Longitud de transición de entrada: 0.31 m

Longitud total: 1.94 m

Altura: 0.51 m

Ancho de garganta: 0.23 m

Ancho de alimentación: 1.08 m

Ancho de descarga: 0.38 m

Medidor de carga: piezómetro

---

<sup>34</sup> MO - 103: Manual de operaciones - Tratamiento primario, tercera operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 104 <sup>35</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Homogenización de caudal
Equipo / Estructura	Tanque homogeneizador
Operación previa	Medición de caudal
Operación posterior	Sedimentación primaria

Figura 79. Tanque homogeneizador de caudal




---

#### Función y uso

Permite regular o evitar la variación del flujo y características del agua residual, que ingresa al tanque sedimentador. Por lo que mantiene un caudal de descarga constante hacia la planta de tratamiento.

Etapa 1. El agua residual ingresa por la parte superior del tanque en un tubo con flujo por gravedad.

Etapa 2. El agua residual es retenida por un tiempo estipulado dentro del tanque.

Etapa 3. El agua residual se descarga por la parte inferior del tanque en un tubo por gravedad.

---

#### Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Tiempo de mezclado: 37 s

Construcción: Obra gris

Diámetro: 0.9 m

Altura: 1.3 m

<sup>35</sup> MO - 104: Manual de operaciones - Tratamiento primario, cuarta operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 105 <sup>36</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Sedimentación primaria
Equipo / Estructura	Tanque sedimentador primario
Operación previa	Homogenización de caudal
Operación posterior	Digestión anaerobia

Figura 80. Tanque sedimentador



#### Función y uso

Tanque el cual permite eliminar los sólidos fácilmente sedimentables, reduciendo la carga orgánica en el tratamiento de aguas residuales.

Etapa 1. El agua ingresa por la parte superior del tanque por medio de tubería que descarga el agua hacia un canal de alimentación dentro del tanque sedimentador.

Etapa 2. El agua residual pasa a través de una membrana difusora con orificios que permite la distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador.

Etapa 3. Las partículas sedimentables, por ser más pesadas que el agua, se acumulan en la parte inferior del tanque formando lodos, mientras que el agua fluye de forma laminar a lo largo del tanque.

Etapa 4. El agua se descarga hacia un canal a la salida.

Etapa 5. Los lodos son extraídos por medio de una bomba de desplazamiento positivo que son transportados al patio de secado.

Etapa 6. El agua residual que se encuentra sobre los lodos es extraída del tanque por medio de tubería, sin perturbar los lodos sedimentados.

<sup>36</sup> MO - 105: Manual de operaciones - Tratamiento primario, quinta operación

MANUAL DE OPERACIONES

Sección Planta de tratamiento de aguas residuales

Código MO - 105<sup>37</sup>

Vigencia Activo

Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Tiempo de retención hidráulico: 71 min

Descarga de lodos: 30 min

Construcción: Obra gris

Tanque sedimentador

Posee una válvula de compuerta en la tubería de entrada al tanque y una válvula en la tubería de extracción de lodos.

Largo: 11.65 m

Ancho: 3.5 m

Alto: 4.32 m

Pantalla difusora

Largo: 2.0 m

Ancho: 3.5 m

Grosor: 0.15 m

Cantidad de agujeros: 54

(OPS, 2005)

---

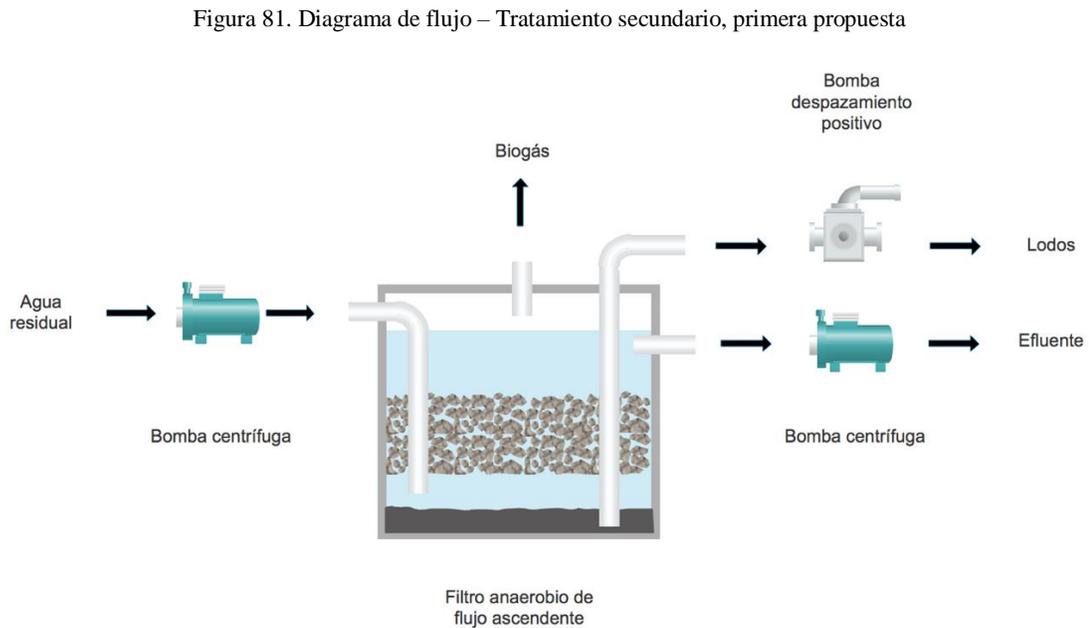
<sup>37</sup> MO - 105: Manual de operaciones - Tratamiento primario, quinta operación

b. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario tiene por objeto la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno y por medio de la acción bacteriana y otros microorganismos. Dicho proceso se lleva a cabo en el filtro anaerobio de flujo ascendente o la laguna anaerobia.

A partir de este proceso se obtiene biogás y lodos que posteriormente son tratados para su aprovechamiento económico.

En la Figura 81 se muestra un ejemplo del proceso.



A continuación, se muestra un resumen de las etapas del tratamiento secundario y equipos necesarios para una correcta operación del sistema.

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 201 <sup>38</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Digestión anaerobia
Equipo / Estructura	Filtro anaerobio de flujo ascendente
Operación previa	Sedimentación
Operación posterior	Nitrificación

Figura 82. Filtro anaerobio de flujo ascendente



#### Función y uso

Es un tanque de flujo ascendente, lo cual indica que es llenado con agua residual desde la parte inferior hasta la superior. Su función es la remoción de materia orgánica en condiciones anaerobias. Consta de 3 cámaras:

Inferior: Ingreso de agua residual y sedimentación de lodos.

Media: Filtro

Superior: salida de agua residual y gas.

Etapa 1. Ingreso de agua residual por medio de tubería en la parte inferior del tanque.

Etapa 2. A medida que se llena el tanque, el agua pasa por la cámara media, la cual posee tubos de PVC con orificios que sirven como medio filtrante para retener sólidos debajo de ellos o biomasa adherida en ellos. Debido a que el material filtrante está completamente sumergido en el agua residual, no hay aire en el sistema, por lo que se mantienen las condiciones anaerobias.

Etapa 3. Debido al proceso anaerobio, se produce biogás, el cual es extraído en la parte superior del tanque que posteriormente se envía a un gasómetro para su almacenamiento o a un filtro para ser tratado.

Etapa 4. Cada 30 días, se extrae los lodos por medio de una bomba de desplazamiento positivo durante 1 hora y media, que se envían al patio de secado.

Etapa 5. Se extrae el agua residual tratada por medio de una bomba centrífuga, que es enviada al siguiente proceso.

<sup>38</sup> MO - 201: Manual de operaciones – Tratamiento secundario, primera propuesta

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 201 <sup>39</sup>
Vigencia	Activo

Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Construcción: Obra gris, sellado

Tiempo de retención hidráulica: 17.5 h

Tiempo de retención de lodos: 30 días

Tanque

Alto: 5.4 m

Ancho: 11.7 m

Largo: 11.7 m

Cámaras

Inferior

Alto: 1 m

Ancho: 11.7 m

Largo: 11.7 m

Media

Alto: 3 m

Ancho: 11.7 m

Largo: 11.7 m

Superior

Alto: 0.5 m

Ancho: 11.7 m

Largo: 11.7 m

Losa perforada

Alto: 0.3 m

Ancho: 11.7 m

Largo: 11.7 m

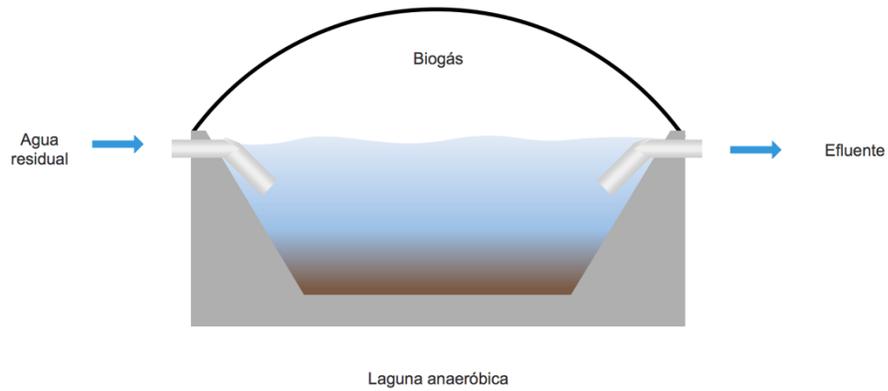
Filtro

105 toneladas métricas de tubo PVC de 4" con orificios  
(CONAGUA, 2015)

---

<sup>39</sup> MO - 202: Manual de operaciones – Tratamiento secundario, primera propuesta

Figura 83. Diagrama de flujo – Tratamiento secundario, segunda propuesta



MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 202 <sup>40</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Digestión anaerobia
Equipo / Estructura	Laguna anaerobia
Operación previa	Sedimentación
Operación posterior	Reducción de nutrientes

Figura 84. laguna anaerobia



<sup>40</sup> MO - 202: Manual de operaciones – Tratamiento secundario, segunda propuesta

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 202 <sup>41</sup>
Vigencia	Activo

#### Función y uso

Es una excavación en el suelo, cubierta por taludes de concreto y una geomembrana en donde el agua residual se almacena para su tratamiento por actividad bacteriana y otros microorganismos. Permite la reducción en contenido sólido y materia orgánica del agua residual en un medio anaerobio. El tiempo de retención del agua residual permite la sedimentación de lodos en el fondo del tanque, estos se descomponen formando biogás el cual es capturado por la geomembrana.

#### Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Cubierta por una geomembrana en la parte inferior del tanque para evitar la contaminación de los suelos y otra en la parte superior para almacenamiento de biogás.

Construcción: Obra gris

Tiempo de retención de lodos: 12 años

Alto: 5.5 m

Largo: 39.0 m

Ancho: 21.0 m

(Reutelshöfer, 2015)

<sup>41</sup> MO - 202: Manual de operaciones – Tratamiento secundario, segunda propuesta

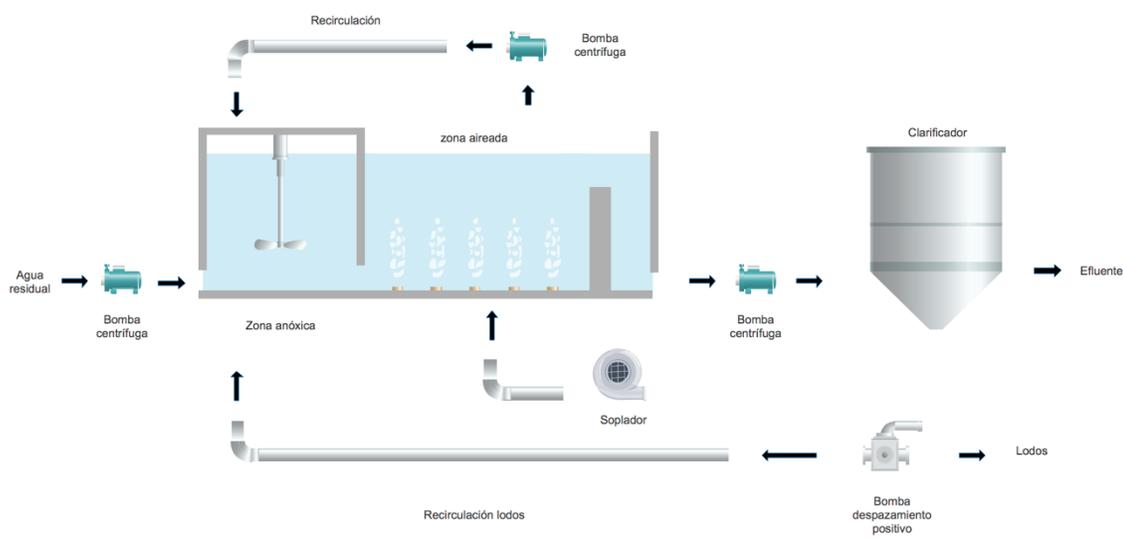
### c. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario tiene como objetivo la reducción de nutrientes en el agua residual. Se produce un proceso microbiológico de desnitrificación y nitrificación, el cual consiste en la transformación de nitratos a nitrógeno gaseoso. Es decir, la eliminación de nitrógeno. Dicho proceso ocurre en un tanque de reducción de nutrientes el cual está dividido en dos zonas, anóxica y aireada.

Posteriormente, el agua trata es enviada a un tanque clarificador el cual permite eliminar los sólidos fácilmente sedimentables, reduciendo la carga orgánica del agua residual.

En siguiente figura se muestra un ejemplo del proceso.

Figura 85. Diagrama de flujo - Tratamiento terciario



A continuación, se muestra un resumen de las etapas del tratamiento terciario y equipos necesarios para una correcta operación del sistema.

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 301 <sup>42</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Reducción de nutrientes
Equipo / Estructura	Tanque de reducción de nutrientes
Operación previa	Digestión anaerobia
Operación posterior	Clarificación

Figura 86. Tanque de reducción de nutrientes



#### Función y uso

Tanque que tiene como objetivo la eliminación de nitrógeno en el agua residual. El tanque está dividido en dos zonas, una anóxica donde ocurre una desnitrificación y una zona aireada en donde ocurre la nitrificación.

Paso 1. Ingreso de agua residual por medio de una bomba centrífuga.

Paso 2. Agua residual pasa por la zona anóxica, la cual posee agitadores para mantener los sólidos suspendidos.

Paso 3. El agua residual pasa por la zona aireada, en donde se agregan burbujas de aire por medio de difusores y un compresor de aire.

Paso 4. El agua es recirculada a la zona anóxica. Este proceso se repite 3 veces.

Paso 5. El agua residual continua al siguiente proceso.

<sup>42</sup> MO - 301: Manual de operaciones – Tratamiento terciario, primera operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 301 <sup>43</sup>
Vigencia	Activo

#### Especificaciones técnicas

##### Tanque

Ubicación: Subterráneo

Cubierta la zona anóxica por un techo

Construcción: Obra gris

Alto: 5.0 m

Largo: 13.4 m

Ancho: 6.6 m

Agitadores

Potencia: 1.96 kW

Difusores

Cantidad: 152

Enzimas

Dosis: 1.2 kg cada 8 días

Soplador

Presión: 34.47 kPa

(NDN, 2004) (OPS, 2005)

<sup>43</sup> MO - 301: Manual de operaciones – Tratamiento terciario, primera operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 302 <sup>44</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Clarificación
Equipo / Estructura	Tanque clarificador secundario
Operación previa	Reducción de nutrientes
Operación posterior	Desinfección y deshidratación de lodos

Figura 87. Tanque clarificador



#### Función y uso

Paso 1. El agua residual tratada por el proceso anterior es ingresada al tanque por medio de una bomba centrífuga.

Paso 3. Los sólidos flotantes, por ser más pesados que el agua, se sedimentan en la parte inferior del tanque, formando lodos.

Paso 4. Lodos formados son recirculados a la zona anóxica.

Paso 5. Los lodos obtenidos son extraídos por medio de una bomba de desplazamiento positivo que son transportados al patio de secado.

Paso 6. El agua residual que se encuentra sobre los lodos es extraída del tanque por medio de tubería y es bombeada al proceso de desinfección.

<sup>44</sup> MO - 302: Manual de operaciones – Tratamiento terciario, segunda operación

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 302 <sup>45</sup>
Vigencia	Activo

Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Construcción: Obra gris

Diámetro: 10 m

Profundidad: 4.7 m

(Ramírez, 2000)

---

<sup>45</sup> MO - 302: Manual de operaciones – Tratamiento terciario, segunda operación

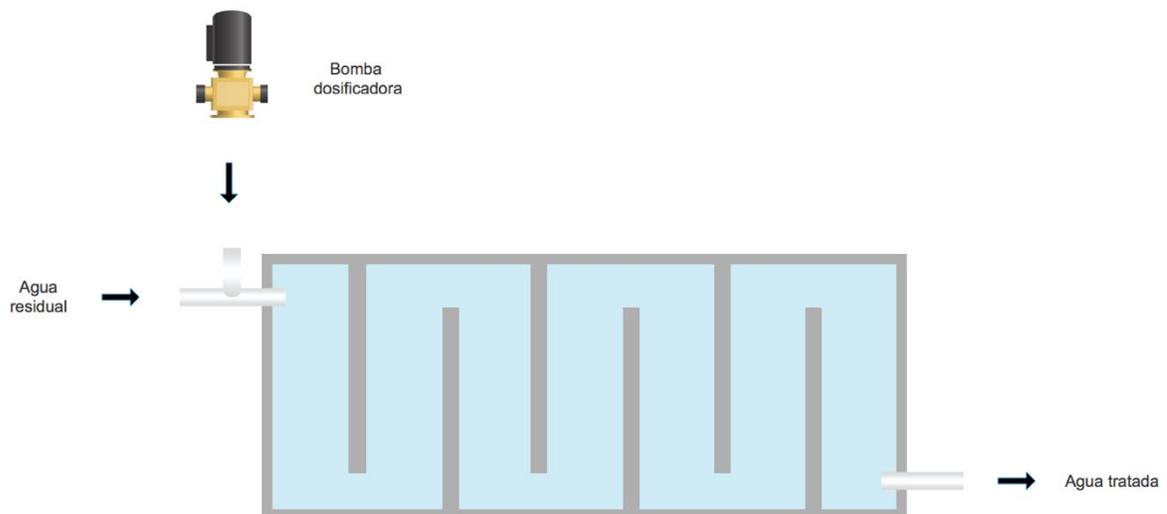
#### d. Tratamiento cuaternario

El tratamiento cuaternario tiene como objetivo la eliminación de microorganismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales, como coliformes. La desinfección se realiza con una disolución de hipoclorito de sodio la cual es inyectada y mezclada con las aguas residuales en un tanque de contacto. Dicho tanque posee una forma serpenteada con el fin de aprovechar el espacio de una mejor manera.

Posteriormente el agua tratada es descargada en el río Achiguate.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del proceso.

Figura 88. Diagrama de flujo – Tratamiento cuaternario



A continuación, se muestra un resumen de las etapas del tratamiento cuaternario y equipos necesarios para una correcta operación del sistema.

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 400 <sup>46</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Desinfección
Equipo / Estructura	Tanque de desinfección
Operación previa	Clarificación
Operación posterior	Descarga de aguas tratadas

Figura 89. Tanque de contacto



#### Función y uso

Es un tanque de contacto con forma serpenteada, que permite eliminar microorganismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales, como coliformes. Dicha desinfección se realiza con una disolución de hipoclorito de sodio, la cual es inyectada al tanque por medio de una bomba dosificadora.

Paso 1. El agua residual ingresa por medio de una bomba centrífuga al tanque de desinfección.

Paso 2. La solución de hipoclorito de sodio es inyectada a la tubería por medio de una bomba dosificadora.

Paso 3. El agua residual y el hipoclorito de sodio son mezcladas por medio de un mezclador estático incorporado en la tubería de ingreso al tanque.

Paso 4. El agua ya tratada es descargada al río Achiguate.

<sup>46</sup> MO - 400: Manual de operaciones – Tratamiento cuaternario, operación única

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 400 <sup>47</sup>
Vigencia	Activo

Especificaciones técnicas

Ubicación: Subterráneo

Construcción: Obra gris

Sin cubierta

Tanque

Alto: 2.20 m

Largo: 5.65 m

Ancho: 3.35 m

Hipoclorito de sodio (NaOCl - Cloro)

Solución al 10%

Cantidad requerida: 43.5 galones / mes

Almacenamiento: Tanque de polietileno de alta densidad (HDPE) dentro de una bodega de obra gris de tamaño reducido, con el fin de cubrir el tanque de los rayos del sol.

(Córdoba, Del Coco, Minvielle & Basualdo, 2010)

<sup>47</sup> MO - 400: Manual de operaciones – Tratamiento cuaternario, operación única

e. Manejo y tratamiento de biogás

El tratamiento de biogás tiene como objetivo el aprovechamiento económico de los subproductos obtenidos por la planta de tratamiento de aguas residuales. Por tal razón, este debe ser tratado para cumplir con su objetivo.

El biogás obtenido será utilizado en la cocina del ingenio azucarero como alternativa al gas propano. Por lo que será limpiado mediante un filtro desulfurador y deshidratador para eliminar el sulfuro de hidrógeno el cual es tóxico y con alto impacto ambiental. Si el gas no es consumido en la cocina, este podrá ser almacenado en un gasómetro.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del proceso.

Figura 90. Diagrama de flujo - Desulfuración y deshidratación de biogás



A continuación, se muestra un resumen de las etapas del tratamiento de biogás, lodos y los equipos necesarios para una correcta operación del sistema.

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 500 <sup>48</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Desulfuración y deshidratación de biogás
Equipo / Estructura	Filtros desulfuradores y deshidratadores, gasómetros y quemador de biogás.
Operación previa	Digestión anaerobia
Operación posterior	Uso de gas en cocina

Figura 91. Gasómetro



#### Función y uso

El biogás obtenido del tratamiento secundario es extraído por medio de tubería de PVC y tratada por medio de filtros desulfurizadores y deshidratadores. Esto se debe a que el biogás contiene sulfuro de hidrógeno, el cual es corrosivo, tóxico y posee alto impacto ambiental. Posteriormente este es trasladado a la cocina del ingenio para ser utilizado como alternativa al gas propano o es almacenado en un gasómetro.

Paso 1. Se extrae el biogás producido del tratamiento secundario, por medio de tubería de PVC.

Paso 2. El biogás es tratado por medio de filtros desulfurizadores y deshidratadores para remover sulfuro de hidrógeno y agua.

Paso 3. El gas obtenido es trasladado a la cocina para ser utilizado en vez de gas propano.

Paso 4. Si no se utiliza en la cocina, este puede ser almacenado en gasómetro de capacidad de almacenamiento para un día de producción de biogás.

Paso 5. En caso de que no se utilice el gas en la cocina y el gasómetro cumpla con su capacidad máxima de almacenamiento, el gas será eliminado por medio de un quemador tipo cerrado.

<sup>48</sup> MO - 500: Manual de operaciones – Desulfuración y deshidratación de biogás, operación única

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 500 <sup>49</sup>
Vigencia	Activo

Especificaciones técnicas

Filtros

Funcionamiento con óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Capacidad: 465 m<sup>3</sup>/día

Gasómetro

Capacidad de almacenamiento: 500 m<sup>3</sup>

(Merino, 2017)

---

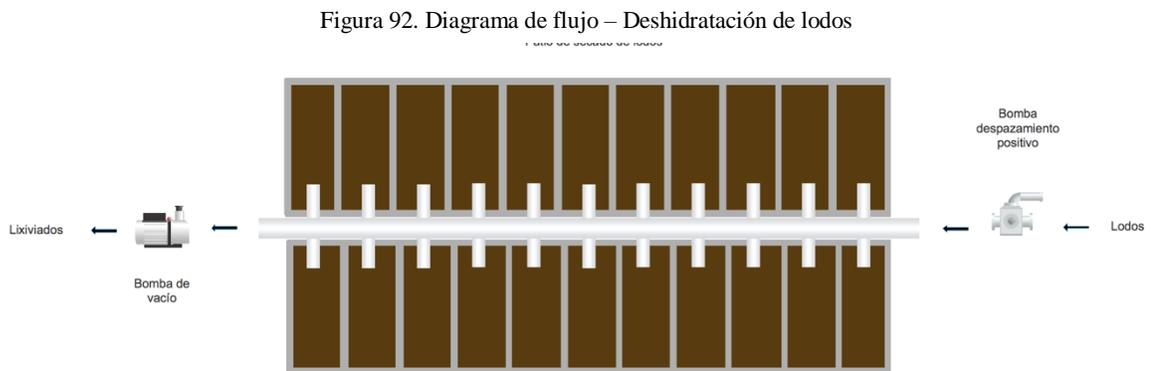
<sup>49</sup> MO - 500: Manual de operaciones – Desulfuración y deshidratación de biogás, operación única

## f. Deshidratación de lodos

El tratamiento de biogás tiene como objetivo el aprovechamiento económico de los subproductos obtenidos por la planta de tratamiento de aguas residuales. Por tal razón, estos deben ser tratados para su correcto uso.

Por otro lado, los lodos obtenidos del tratamiento primario, secundario y terciario serán deshidratados en el patio de secado y posteriormente removidos para disposición del ingenio azucarero.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del proceso.



MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 600 <sup>50</sup>
Vigencia	Activo
Operación	Deshidratación de lodos
Equipo / Estructura	Patio de secado
Operación previa	Sedimentación, digestión anaerobia y clarificación.
Operación posterior	

Figura 93. Patio de secado



#### Función y uso

Los lodos obtenidos de la sedimentación, digestión anaerobia y clarificación son bombeados mediante bombas de desplazamiento positivo hacia el patio de secado, en donde el agua que poseen es evaporada y lixiviada.

Paso 1. Bombeo de lodos hacia patio de secado por medio de bombas de desplazamiento positivo.

Paso 2. Lodos son secados durante 20 días.

Paso 3. Agua es evaporada y lixiviada. Agua obtenida por lixiviación será bombeada por medio de una bomba de vacío para disposición de Ingenio.

Paso 4. Lodos deshidratados serán extraídos de las celdas para disposición del Ingenio.

#### Especificaciones técnicas

##### Patio de secado

Estará dividido en 2 secciones, 11 celdas en la primera sección y 11 celdas en la segunda. Entre ambas secciones habrá dos tuberías, una para la extracción de lixiviados y una tubería de ingreso de lodos a las celdas. Se llenará una celda de lodos al día.

<sup>50</sup> MO - 600: Manual de operaciones – Deshidratación de lodos, operación única

MANUAL DE OPERACIONES	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MO - 600 <sup>51</sup>
Vigencia	Activo

#### Especificaciones técnicas

##### Celda

Las celdas tendrán una pendiente de 1% hacia las tuberías.

Construcción: Obra gris

Profundidad: 1.50 m

Largo: 90 m

Ancho: 12 m

Cada celda tendrá dos diferentes capas en su interior:

Grava: 25 cm

Arena: 25 cm

---

<sup>51</sup> MO - 600: Manual de operaciones – Deshidratación de lodos, operación única

## 2. Manual de mantenimiento preventivo

El manual de mantenimiento preventivo define las actividades necesarias de limpieza, inspección y mantenimiento de los tanques y equipo necesario para la planta de tratamiento de aguas residuales. De igual forma se evalúan los riesgos de cada operación y la acción correctiva a tomar.

El mantenimiento definido debe ingresarse al sistema SIGES para la programación y gestión de dichas actividades. De igual forma, las indicaciones de mantenimiento proporcionadas por los proveedores de los equipos, tales como bombas y filtros, debe incluirse en el presente manual.

### a. Valorización de riesgos

Tabla 72. Valorización de consecuencia

Consecuencias	C
CATASTROFE, numerosas muertes	100
VARIAS MUERTES	50
MUERTE	25
LESIONES GRAVES	15
LESIONES CON BAJA	5
LESIONES SIN BAJA	1

Tabla 73. Valorización de exposición

Exposición	E
CONTINUAMENTE, muchas veces al día	10
FRECUENTEMENTE, aproximadamente una vez al día	6
OCASIONALMENTE, de una vez a la semana a una vez al mes	3
IRREGULARMENTE, de una vez al mes a una vez al año	2
RARAMENTE, cada bastantes años	1
REMOTAMENTE, no se sabe que haya ocurrido, pero se descarta	0.5

Tabla 74. Valorización de probabilidad

Probabilidad	P
Es el resultado más probable y esperado	10
Es completamente posible, no será nada extraño	6
Sería una secuencia o coincidencia rara pero posible, ha ocurrido	3
Coincidencia muy rara, pero se sabe que ha ocurrido	2
Coincidencia extremadamente remota pero concebible	0.5
Coincidencia prácticamente imposible, jamás ha ocurrido	0.3

Tabla 75. Categoría de riesgos

Grado de peligrosidad	Clasificación del riesgo	Actuación ante el riesgo
Mayor de 400	Inaceptable (grave e inminente)	Detención inmediata de la actividad peligrosa
Entre 200 y 400	Riesgo alto	Corrección inmediata
Entre 70 y 200	Riesgo notable	Corrección necesaria urgente
Entre 20 y 70	Riesgo moderado	No es emergencia, pero debe corregirse
Menor de 20	Riesgo aceptable	Puede omitirse la corrección, aunque debe establecerse medidas correctoras sin plazo definido.

b. Valorización de riesgos

Ecuación 62. Riesgo

$$\text{Riesgo} = \text{consecuencia} * \text{exposición} * \text{probabilidad}$$

c. Herramientas de mantenimiento

A continuación, se detalla de forma visual las herramientas propuestas para el mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas.

Tabla 76. Herramientas de mantenimiento

Cubeta de 1 galón	Pala cuadrada de albañil	Cuchara de albañil
		
Desnatadora manual	Rastrillo de metal plano	Cepillo de alambre
		

d. Tratamiento primario

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO						
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales					
Código	MMP - 101 <sup>52</sup>					
Vigencia	Activo					
Equipo / Estructura			Trampa de aceite y grasas			
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN	
1	Riesgo en la forma de eliminar grasa de las manos. Al momento de tener contacto con la grasa, es posible que se utilice thinner u otro tipo de químico.	1	2	6	12	
Ítem	Acciones que tomar					
1	Riesgo aceptable. Utilizar guantes de neopreno. En caso de tener contacto con grasa, lavar con agua y jabón.					
Ítem	Problemas operativos					
1	Acumulación excesiva de grasas por falta de limpieza.					
2	Si la grasa continua en el proceso de la planta de tratamiento de aguas puede provocar baja eficiencia en el proceso.					
3	Debido a la menor densidad de la grasa respecto al agua, esta forma una capa en la superficie de los reactores biológicos que dificulta la transferencia de oxígeno.					
4	Debido a que las grasas no se degradan con facilidad, estas pueden continuar durante todo el proceso de la planta inclusive en la salida del agua ya tratada.					
Ítem	Acciones que tomar					
1	Aumentar la frecuencia de limpieza de trampa de grasa.					
2	Eliminar grasa.					
3	Retener la grasa en tratamiento primario.					
4	Asegurar la retención y eliminación de grasas en el tratamiento primario.					

<sup>52</sup> MMP - 101: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, primera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 101 <sup>53</sup>
Videncia	Activo

Utensilios de trabajo y herramientas:

2 cubetas de 1 galón

Pala cuadrada de albañil

Desnatadora manual

Cepillo de plástico con cerdas de nylon

Pistola de agua a presión

---

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Uniforme de trabajo

Guantes de neopreno

Mascarilla

Botas de hule y de labor

---

Mantenimiento - Limpieza manual de grasas

Mantenimiento semanal

Observar si hay aceites y grasas en la trampa, de ser así, proceder con el mantenimiento, de lo contrario, posponer mantenimiento para la siguiente semana.

Paso 1. Colocarse guantes de neopreno, mascarilla, destapar tanque y tomar cubeta.

Paso 2. Con la desnatadora manual, sumergir la mitad del colador y desplazar por toda la superficie con el fin de recolectar la grasa retenida en la trampa de grasas. Colocar grasa capturada en una cubeta. Repetir proceso hasta eliminar grasa de la superficie.

Paso 3. Tomar cubeta con grasa y colocarla en recipientes reciclados, como botellas plásticas o de vidrio y desecharlas al basurero.

<sup>53</sup> MMP - 101: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, primera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 101 <sup>54</sup>
Videncia	Activo

#### Mantenimiento - Limpieza manual de grasas

Observar si hay lodos sedimentados en el fondo del canal, de ser así, proceder con el mantenimiento, de lo contrario, posponer mantenimiento para la siguiente semana.

Paso 4. Con una pala, recolectar la mayor cantidad de lodos que quedaron en el fondo del canal. Colocarlos en la segunda cubeta.

Paso 5. Tomar cubeta con lodos y trasladarlos a patio de secado.

Paso 6. Limpiar cubetas con agua y guardar.

#### Mantenimiento cada 3 meses

Paso 1. Vaciar canal.

Paso 2. Colocarse guantes de neopreno y botas de hule.

Paso 3. Cepillar paredes del canal con el cepillo de cerdas de nylon.

Paso 4. Enjuagar paredes y fondo del canal con la pistola de agua a presión hasta que quede limpio.

Paso 5. Si hay lodos asentados en la parte inferior del canal, tomar pala, extraer lodos y trasladarlos a patio de secado.

(Water power sewer, 2012) (Iagua, 2018)

---

<sup>54</sup> MMP - 101: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, primera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales				
Código	MMP - 102 <sup>55</sup>				
Videncia	Activo				
Equipo / Estructura			Cribas y rejilla		
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un canal subterráneo sin tapadera.	1	10	6	60
2	Cortadas o lesiones abrasivas por uso de herramientas manuales. Al utilizar lija y cepillo de alambre.	1	2	3	6
Ítem	Acciones que tomar				
1	Riesgo moderado. Implementar barandas en el perímetro del canal de cribado.				
2	Riesgo aceptable. Utilizar guantes de carnaza.				
Ítem	Problemas operativos				
1	Malos olores, presencia de moscas y otros insectos. Puede darse por acumulación de basura debido a falta de limpieza en criba.				
2	Atascamiento excesivo en la criba o rejilla. Puede darse por un aumento en los desechos.				
3	Barrotes de la criba corroídos o quebrados.				
4	Corrosión de rejilla.				
Ítem	Acciones que tomar				
1	Retirar la basura y aumentar la frecuencia de limpieza.				
2	Aumentar la frecuencia de limpieza.				
3	Limpieza de corrosión con cepillo de alambre y aplicación de pintura. Si no es posible la reparación se debe reemplazar el equipo.				
4	Aplicación de pintura. Si la rejilla presenta niveles altos de corrosión, se debe reemplazar por una rejilla nueva.				

<sup>55</sup> MMP - 102: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, segunda operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 102 <sup>56</sup>
Videncia	Activo

Utensilios de trabajo y herramientas:

Rastrillo de metal plano

Cuchara de albañil

2 cubetas de 1 galón

Cepillo de alambre

Pintura anticorrosiva

Cepillo de plástico con cerdas de nylon

Lija para metal

Pistola de agua a presión

---

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Lentes protectores

Uniforme de trabajo

Guantes de neopreno y de carnaza

Botas de caucho y de labor

---

Mantenimiento - Limpieza manual de criba y rejilla.

Mantenimiento diario

Observar si hay acumulación de sólidos grandes, de ser así, proceder con el mantenimiento, de lo contrario, posponer mantenimiento para el siguiente día.

Paso 1. Colocarse botas y guantes de hule.

Paso 2. Tomar cubeta y rastrillo.

Paso 3. Colocar el rastrillo en la parte más baja de los barrotes y arrastrar rastrillo sobre ellos para recoger los sólidos gruesos que han quedado retenidos. Repetir paso hasta que los barrotes estén completamente limpios.

Paso 4. Colocar los sólidos en una de las cubetas.

<sup>56</sup> MMP - 102: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, segunda operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 102 <sup>57</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento - Limpieza manual de criba y rejilla:

Paso 5. Si hay lodos sedimentados en el fondo del tanque, tomar la cuchara de albañil y remover los lodos que quedaron en el fondo del canal. Colocarlos en la segunda cubeta.

Paso 6. Tomar cepillo de plástico con cerdas de nylon y retirar rejilla del canal.

Paso 7. Cepillar suavemente la rejilla para evitar salpicadura. Cepillar hasta eliminar los sólidos medianos y finos, colocar nuevamente la rejilla.

Paso 10. Colocar solidos medianos y finos en la cubeta con solidos gruesos.

Paso 11. Tomar cubeta con solidos gruesos y finos y depositarlos en un basurero para desechos sólidos.

Paso 12. Tomar cubeta con lodos y trasladarlos a patio de secado.

Paso 13. Limpiar cubetas con agua y guardar.

Mantenimiento cada 6 meses

Observar si la criba muestra corrosión en los barrotes, de ser así proceder con el mantenimiento, de lo contrario, posponer mantenimiento para el siguiente mes.

Paso 1. Colocarse guantes de carnaza, retirar criba del canal y tomar cepillo de alambre.

Paso 2. Cepillar los barrotes hasta eliminar la corrosión.

Paso 3. Aplicar pintura anticorrosiva para aumentar la vida útil de los barrotes. Esperar hasta que la pintura esté completamente seca.

Nota: Si los barrotes de la criba muestran daños graves por corrosión o están quebradas, se debe reemplazar por una criba nueva.

Si la rejilla muestra corrosión:

Paso 1. Colocarse guantes de carnaza, retirar rejilla de canal y tomar lija.

Paso 2. Lijar suavemente la rejilla para eliminar corrosión.

Paso 3. Aplicar pintura anticorrosiva para aumentar la vida útil. Esperar hasta que la pintura esté completamente seca.

Nota: Si la rejilla muestra daños graves por corrosión, se debe reemplazar por una rejilla nueva.

(CONAGUA, 2015)

<sup>57</sup> MMP - 102: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, segunda operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 103 <sup>58</sup>
Videncia	Activo

Equipo / Estructura		Canal Parshall			
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un canal subterráneo sin tapadera.	1	10	6	60
Ítem	Acciones que tomar				
1	Riesgo moderado. Implementar barandas en el perímetro del canal Parshall.				
Ítem	Acciones que tomar				
1	Lectura incorrecta del caudal.				
Ítem	Acciones que tomar				
1	Utilizar ficha para control de medición de caudal.				

Utensilios de trabajo y herramientas

Cepillo de cerdas de nylon

Equipo de protección personal

Casco de seguridad

Uniforme de trabajo

Botas de labor

Mantenimiento - Manual

Mantenimiento diario

Se realizará una lectura diaria del caudal por medio del piezómetro.

Paso 1. Leer valor en el piezómetro.

Paso 2. Apuntar valor en ficha de registro de caudal.

<sup>58</sup> MMP - 103: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, tercera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 103 <sup>59</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento - Manual

Mantenimiento cada 6 meses

Se recomienda hacer las operaciones necesarias en la temporada de mantenimiento general del ingenio.

Paso 1. Observar si el canal presenta grietas, de ser así, informar al jefe directo y reparar.

Paso 2. En caso de que las paredes del canal presenten sedimentos o basura, limpiar con el cepillo de cerdas de nylon.

Paso 3. Recolectar basura y trasladar a basurero.

---

<sup>59</sup> MMP - 103: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, tercera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO						
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales					
Código	MMP - 104 <sup>60</sup>					
Videncia	Activo					
	Equipo / Estructura	Homogeneizador de caudal				
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN	
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un tanque subterráneo sin tapadera.	1	10	6	60	
Ítem	Acciones que tomar					
1	Riesgo moderado. Implementar barandas en el perímetro del tanque homogeneizador de caudal.					
Ítem	Problemas operativos					
1	Taponamiento en tubo de descarga hacia sedimentador primario.					
Ítem	Acciones que tomar					
1	Realizar mantenimiento periódico de tubería.					

Utensilios de trabajo y herramientas:

Cepillo de cerdas de nylon

Cuchara de albañil

Cubeta de 1 galón

Equipo de protección personal:

Casco de seguridad

Uniforme de trabajo

Botas de hule y labor

Guantes de neopreno

<sup>60</sup> MMP - 104: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, cuarta operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 104 <sup>61</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento - Manual

#### Consideraciones

Se utilizará dos tanques homogeneizadores que operen en paralelo, a fin de permitir un correcto mantenimiento.

#### Cada 6 meses

Se recomienda hacer las operaciones necesarias en la temporada de mantenimiento general del ingenio.

Paso 1. Observar si el tanque presenta grietas, de ser así, informar al jefe directo y reparar.

Paso 2. En caso de que las paredes del tanque presenten sedimentos o basura, limpiar con el cepillo de cerdas de nylon.

Paso 3. Recolectar basura y trasladar a basurero.

Observar si hay lodos sedimentados en el fondo del tanque, de ser así, proceder con el mantenimiento, de lo contrario, posponer mantenimiento.

Paso 4. Con la cuchara de albañil, recolectar la mayor cantidad de lodos que quedaron en el fondo del tanque. Colocarlos en la cubeta.

Paso 5. Tomar cubeta con lodos y trasladarlos a patio de secado.

Paso 6. Limpiar cubeta con agua y guardar.

(Ramírez, 2000)

---

<sup>61</sup> MMP - 104: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, cuarta operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales				
Código	MMP - 105 <sup>62</sup>				
Videncia	Activo				
Equipo / Estructura			Tanque sedimentador primario		
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un tanque de 2 m de altura sin cubierta.	15	2	6	180
2	Caída o vuelco de la escalera portátil por puntos de apoyo inapropiados. Al colocar la escalera portátil en el fondo resbaloso del tanque.	5	2	6	60
3	Caídas de personas al mismo nivel. Debido a que el fondo del tanque es resbaloso por los sedimentos y el agua.	1	2	6	12
4	Proyección de fragmentos o partículas. Al momento de limpiar las paredes del tanque con la pistola de agua a presión.	1	2	3	6
Ítem	Acciones que tomar				
1	Riesgo notable. Implementar barandas en el perímetro del tanque sedimentador de 1 m de altura.				
2	Riesgo moderado. Implementar escaleras metálicas fijas de servicio.				
3	Riesgo aceptable. Utilizar botas de caucho antideslizantes.				
4	Riesgo aceptable. Utilizar lentes de protección.				
Ítem	Problemas operativos				
1	Si el tiempo de retención es muy corto, no se eliminará la cantidad suficiente de sólidos fácilmente sedimentables. Por otro lado, si el tiempo de retención es muy largo, se puede producir una condición séptica la cual genera más olor y reduce la eficiencia de los procesos posteriores.				
2	Si existe variación en el flujo de ingreso al tanque, este tiende a levantar el material sedimentado, mintiéndolo en suspensión y provocando que la sedimentación no se lleve a cabo en su totalidad.				
Ítem	Acciones que tomar				
1	Procurar que la duración de sedimentación sea de 1 hora.				
2	Mantener el caudal lo más estable o constante posible.				

<sup>62</sup> MMP - 105: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, quinta operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 105 <sup>63</sup>
Videncia	Activo

Utensilios de trabajo y herramientas:

Escoba de cerdas de nylon

Pala de metal plana

Manguera

Pistola de agua a presión

Pintura anticorrosiva

---

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Lentes protectores

Uniforme de trabajo

Delantal impermeable de PVC

Guantes de neopreno

Botas de caucho y de labor

---

Mantenimiento – Limpieza manual

Consideraciones

Se utilizará dos tanques sedimentadores que operen en paralelo, a fin de permitir un tiempo adecuado de retención, extracción de lodos y correcto mantenimiento.

Descarga cada 2 días y medio de lodos

Paso 1. Abrir válvula de purga de lodos.

Paso 2. Extraer lodos por medio de la bomba de desplazamiento positivo durante 30 min.

Paso 3. Lodos son transportados por medio de tubería al patio de secado.

<sup>63</sup> MMP - 105: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, quinta operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 105 <sup>64</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento – Limpieza manual

Mantenimiento semanal

Revisar que las válvulas no presenten fugas.

Observar si el tanque presenta grietas, de ser así, reportar al jefe directo y reparar.

Mantenimiento cada 6 meses

Se realizará lavado de un tanque mientras que el segundo sigue en funcionamiento. Al terminar mantenimiento del primer tanque, proseguir con el segundo.

Es importante no realizar los cortes de suministro de agua residual en horas de máxima demanda. Se recomienda realizar mantenimiento a media tarde y en temporada de mantenimiento general del ingenio.

Es necesario realizar el mantenimiento con dos personas para introducir el equipo y herramientas de mantenimiento, de forma segura.

Tanque

Paso 1. Cerrar la válvula de entrada al tanque.

Paso 2. Evacuar agua residual y lodos.

Paso 3. Ponerse botas de hule, guantes de neopreno, gabacha de PVC y lentes de protección.

Paso 5. Desprender el material adherido en las paredes del tanque por medio de la escoba con cerdas de nylon.

Paso 4. Con una pala, remover los lodos sedimentados en el fondo del tanque. Repetir hasta que el tanque esté completamente limpio.

Paso 5. Empujar lodos hacia el drenaje para poder extraerlos del tanque.

Paso 6. Con agua a presión, enjuagar paredes y fondo del tanque.

Paso 7. Recircular agua de enjuague a la planta de tratamiento de aguas en el tratamiento primario por medio de una bomba centrífuga.

Paso 8. Cerrar los drenajes y abrir válvula para llenar el tanque.

(OPS, 2005)

---

<sup>64</sup> MMP - 105: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento primario, quinta operación

e. Tratamiento secundario

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 201 <sup>65</sup>
Videncia	Activo
Equipo / Estructura	Filtro anaerobio de flujo ascendente

Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Choques, golpes, tropiezo contra objetos inmóviles o caída de personas a nivel. Debido a la tubería que sobresale del filtro anaerobio de flujo ascendente.	1	10	3	30

Ítem	Acciones que tomar
------	--------------------

- |   |  |
|---|--|
| 1 | Riesgo moderado. Señalizar “¡Atención! Riesgo de tropezar” |
|---|--|

Figura 94. Señalización - Riesgo de tropezar



Ítem	Problemas operativos
1	Atascamiento en el material filtrante.
2	Dificultad para identificar inconvenientes por ser un sistema cerrado.
3	Si el pH se encuentra por debajo del rango permitido de 6.0 a 8.0 puede inhibir los microorganismos formadores de metano, es decir reducir la formación de biogás.

Ítem	Acciones que tomar
1	Procurar que el material filtrante posea una alta porosidad.
2	Seguimiento estricto del programa de mantenimiento.
3	Si el pH se encuentra por debajo del rango permisible, aplicar bicarbonato de sodio (NaHCO <sub>3</sub> ).

<sup>65</sup> MMP - 201: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento secundario, primera propuesta

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 201 <sup>66</sup>
Videncia	Activo

Utensilios de trabajo y herramientas:

Agua residual tratada

---

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Uniforme de trabajo

Botas de labor

---

Mantenimiento – Mecánico

Consideraciones

Se utilizará dos tanques homogeneizadores que operen en paralelo, a fin de permitir un correcto mantenimiento.

Diario:

Se realizará análisis de pH en la entrada al tanque.

Paso 1. Anotar valor obtenido en ficha de registro de pH.

Paso 2. Si el valor obtenido se encuentra por debajo del rango permisible, se debe aplicar bicarbonato.

Paso 3. Anotar si es necesario la aplicación de bicarbonato de sodio.

Mensual:

Paso 2. Extraer lodos a patio de secado por medio de una bomba de desplazamiento positivo.

Anual:

Se realizará un retro-lavado, en el cual se inyectará agua a presión con el fin de limpiar le medio filtrante del tanque. Dicha agua será obtenida del agua residual tratada por la planta.

Paso 1. Vaciar filtro anaerobio de flujo ascendente.

Paso 2. Por medio de una bomba centrífuga inyectar agua a presión para limpiar los tuvo de PVC, el agua fluye a través del tanque de forma descendente para realizar el retro lavado.

Paso 3. Recircular el agua de retro-lavado al tratamiento primario por medio de una bomba centrífuga.

(Tarraza, 2015)

<sup>66</sup> MMP - 201: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento secundario, primera propuesta

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales				
Código	MMP - 202 <sup>67</sup>				
Videncia	Activo				
	Equipo / Estructura	Laguna anaerobia			
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Trabajo en espacios confinados. Por limpieza manual de la laguna anaerobia.	15	1	10	150
Ítem	Acciones que tomar				
1	Riesgo notable. Se tercerizará la limpieza de la laguna.				
Ítem	Problemas operativos				
1	Si el pH se encuentra por debajo del rango permitido de 6.0 a 8.0 puede inhibir los microorganismos formadores de metano, es decir reducir la formación de biogás.				
Ítem	Acciones que tomar				
1	Si el pH se encuentra por debajo del rango permisible, aplicar bicarbonato de sodio (NaHCO <sub>3</sub> ).				
Utensilios de trabajo y herramientas					
Camión cisterna con equipo de succión.					
Equipo de protección personal					
-					
Mantenimiento – Servicio tercerizado					
Mantenimiento cada 12 años					
Se debe contratar servicio de limpieza de posos sépticos.					
Se extraerán los lodos acumulados en el interior del tanque por medio un camión cisterna con equipo de succión.					

<sup>67</sup> MMP - 202: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento secundario, segunda propuesta

f. Tratamiento terciario

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales				
Código	MMP - 301 <sup>68</sup>				
Videncia	Activo				
Equipo / Estructura	Tanque de reducción de nutrientes				
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un tanque de 4.7 m de altura sin cubierta.	15	2	6	180
2	Ahogamiento. Por ser un tanque de 4.7 m de profundidad aireado.	25	3	3	225
3	Caída o vuelco de la escalera portátil por puntos de apoyo inapropiados. Al colocar la escalera portátil en el fondo resbaloso del tanque.	5	2	6	60
4	Caídas de personas al mismo nivel. Debido a que el fondo del tanque es resbaloso.	1	2	6	12
5	Proyección de fragmentos o partículas. Al momento de limpiar las paredes del tanque con la pistola de agua a presión.	1	2	3	6
Ítem	Acciones que tomar				
1	Riesgo notable. Implementar barandas en el perímetro del tanque de 1 m de altura. Señalizar “Prohibido el paso, solo personal autorizado”				

Figura 95. Señalización - Prohibido el paso



<sup>68</sup> MMP - 301: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, primera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 301 <sup>69</sup>
Videncia	Activo

Ítem	Acciones que tomar
------	--------------------

- |   |  |
|---|--|
| 2 | Riesgo alto. Implementar puente de seguridad y utilizar línea de vida. Señalizar “Peligro ahogamiento” y “uso obligatorio de arnés de seguridad” |
|---|--|

Figura 97. Señalización - Peligro ahogamiento



Figura 96. Señalización - Uso obligatorio de arnés de seguridad



- |   |   |
|---|---|
| 3 | Riesgo moderado. Implementar escaleras metálicas fijas de servicio. |
| 4 | Riesgo aceptable. Utilizar botas de caucho antideslizantes.         |
| 5 | Riesgo aceptable. Utilizar lentes de protección.                    |

Ítem	Problemas operativos
------	----------------------

- |   |   |
|---|---|
| 1 | Obstrucción de salida de aire en difusores.   |
| 2 | Alto contenido de oxígeno disuelto limita el proceso de desnitrificación.   |
| 3 | Si el valor de nitrógeno total no cumple con el parámetro establecido, las aguas residuales tratadas portarán altos contenidos de nitrógeno que pueden ser tóxicos para el cuerpo receptor. |

Ítem	Acciones que tomar
------	--------------------

- |   |   |
|---|---|
| 1 | Limpieza periódica.   |
| 2 | Regular la salida de aire de los difusores.                   |
| 3 | Dosificar enzimas Bio Zyme al tanque en la zona de aireación. |

Utensilios de trabajo y herramienta:

Escoba con cerdas de nylon

Pistola de agua a presión con manguera

Cubeta de 1 galón

Enzimas

<sup>69</sup> MMP - 301: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, primera operación

## MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 301 <sup>70</sup>
Videncia	Activo

Equipo de protección personal

Casco de protección

Lentes protectores

Uniforme de trabajo

Delantal impermeable de PVC

Guantes de neopreno

Botas de caucho y de labor

---

### Mantenimiento – Manual

Mantenimiento cada 6 meses

Es necesario realizar el mantenimiento con dos personas para introducir el equipo y herramientas de mantenimiento, de forma segura.

Tanque

Paso 1. Cerrar la válvula de entrada al tanque.

Paso 2. Evacuar agua residual y lodos.

Paso 3. Ponerse botas de hule, guantes de neopreno, gabacha de PVC y lentes de protección.

Paso 5. Desprender el material adherido en las paredes del tanque por medio de la escoba con cerdas de nylon.

Paso 6. Con agua a presión, enjuagar paredes y fondo del tanque.

Difusores y agitador

Paso 1. Enjuagar con agua a presión.

Nota: Si los difusores o agitadores no cumple con su funcionamiento, deben ser reemplazados por nuevos.

---

<sup>70</sup> MMP - 301: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, primera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 301 <sup>71</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento – Manual

Mantenimiento 1 vez por semana

Se debe realizar análisis de nitrógeno total, en caso de no cumplir con el parámetro de nitrógeno permisible, agregar enzimas. Anotar valor medido y si hay necesidad de aplicar enzimas; en ficha de registro de nitrógeno total.

Paso 1. Verter 1.2 kg de enzimas en cubeta con dosis de agua. El agua utilizada puede ser limpia o el agua tratada por la planta.

Paso 2. Esperar 1 hora para que las enzimas estén completamente hidratadas.

Paso 3. Utilizar línea de vida y sobre el puente de seguridad verter el contenido del cubo en la zona aireada del tanque.

(Molina, 2009)

---

<sup>71</sup> MMP - 301: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, primera operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales				
Código	MMP - 302 <sup>72</sup>				
Videncia	Activo				
	Equipo / Estructura	Clarificador			
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un tanque de 2 m de altura sin cubierta.	15	2	6	180
2	Caída o vuelco de la escalera portátil por puntos de apoyo inapropiados. Al colocar la escalera portátil en el fondo resbaloso del tanque.	5	2	6	60
3	Caídas de personas al mismo nivel. Debido a que el fondo del tanque es resbaloso por los sedimentos y el agua.	1	2	6	12
4	Proyección de fragmentos o partículas. Al momento de limpiar las paredes del tanque con la pistola de agua a presión.	1	2	3	6
Ítem	Acciones que tomar				
1	Riesgo notable. Implementar barandas en el perímetro del tanque sedimentador de 1 m de altura.				
2	Riesgo moderado. Implementar escaleras metálicas fijas de servicio.				
3	Riesgo aceptable. Utilizar botas de caucho antideslizantes.				
4	Riesgo aceptable. Utilizar lentes de protección.				
Ítem	Problemas operativos				
1	Si el tiempo de retención es muy corto, no se eliminará la cantidad suficiente de sólidos fácilmente sedimentables. Por otro lado, si el tiempo de retención es muy largo, se puede producir una condición séptica la cual genera más olor y reduce la eficiencia de los procesos posteriores.				
2	Burbujas de nitrógeno.				
Ítem	Acciones que tomar				
1	Procurar que la duración de sedimentación sea de 3.5 hora.				
2	Aumentar recirculación a tanque reductor de nutrientes.				

<sup>72</sup> MMP - 302: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, segunda operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 302 <sup>73</sup>
Videncia	Activo

Utensilios de trabajo y herramientas:

Escoba con cerdas de nylon

Pala de metal plana

Manguera

Pistola de agua a presión

---

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Lentes protectores

Uniforme de trabajo

Delantal impermeable de PVC

Guantes de neopreno

Botas de caucho y de labor

---

Mantenimiento – Limpieza manual

Descarga diaria de lodos

Paso 1. Extraer lodos por medio de la bomba de desplazamiento positivo durante 12 h.

Paso 2. Lodos son transportados al patio de secado.

Mantenimiento semanal

Observar si el tanque presenta grietas, de ser así, reportar al jefe directo y reparar.

Mantenimiento cada 6 meses

Se realizará lavado de tanque.

Se recomienda realizar mantenimiento a media tarde y en temporada de mantenimiento general del ingenio.

Es necesario realizar el mantenimiento con dos personas para introducir el equipo y herramientas de mantenimiento, de forma segura.

---

<sup>73</sup> MMP - 302: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, segunda operación

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 302 <sup>74</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento – Limpieza manual

Tanque

Paso 1. Cerrar la válvula de entrada al tanque.

Paso 2. Evacuar agua residual y lodos.

Paso 3. Ponerse botas de hule, guantes de neopreno, gabacha de PVC y lentes de protección.

Paso 4. Desprender el material adherido en las paredes del tanque por medio de la escoba con cerdas de nylon.

Paso 5. Con una pala, remover los lodos sedimentados en el fondo del tanque. Repetir hasta que el tanque esté completamente limpio.

Paso 6. Empujar lodos hacia tubería de extracción de lodos hacia patio de secado.

Paso 7. Con agua a presión, enjuagar paredes y fondo del tanque.

(Ramírez, 2000)

---

<sup>74</sup> MMP - 302: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento terciario, segunda operación

g. Tratamiento cuaternario

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 400 <sup>75</sup>
Videncia	Activo
Equipo / Estructura	Tanque de contacto

Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Caída de personas a distinto nivel. Por ser un tanque de 2 m subterráneo y sin cubierta.	15	2	6	180
2	Caída o vuelco de la escalera portátil por puntos de apoyo inapropiados. Al colocar la escalera portátil en el fondo resbaloso del tanque por biopelícula formada.	5	2	6	60
3	Caídas de personas al mismo nivel. Debido a que el fondo del tanque es resbaloso por biopelícula formada.	1	2	6	12
4	Proyección de fragmentos o partículas. Al momento de limpiar las paredes del tanque con la pistola de agua a presión.	1	2	3	6
5	Contacto con sustancias nocivas. Debido al manejo del hipoclorito de sodio.	5	2	10	100

Ítem	Acciones que tomar
1	Riesgo notable. Implementar barandas en el perímetro del tanque de desinfección de 1 m de altura.
2	Riesgo moderado. Implementar escaleras metálicas fijas de servicio.
3	Riesgo aceptable. Utilizar botas de caucho antideslizantes.
4	Riesgo aceptable. Utilizar lentes de protección.

<sup>75</sup> MMP - 400: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento cuaternario, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 400 <sup>76</sup>
Videncia	Activo

5 Riesgo notable.

- Señalizar “Materias nocivas o irritantes”, “regadera de emergencia”, “ubicación de lavaojos”, “Uso obligatorio de guantes”, “Uso obligatorio de mascarillas”
- Implementar duchas y lavaojos de seguridad.
- Utilizar respirador con máscara antigases inorgánicos.
- Utilizar guantes largos de neopreno, resistentes a productos químicos.
- Utilizar delantal de poliéster para sustancias químicas.

Figura 98. Señalización - Materiales oxidantes



Figura 99. Señalización - Lavaojos



Figura 100. Señalización - Regadera de emergencia



Figura 101. Señalización - Uso obligatorio de mascarilla



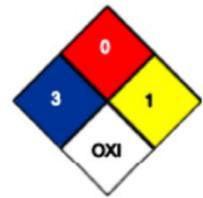
Figura 102. Señalización - Uso obligatorio de guantes



<sup>76</sup> MMP - 400: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento cuaternario, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 400 <sup>77</sup>
Videncia	Activo

- 5 En caso de inhalación:  
Trasladar a la persona al aire fresco. Solicitar atención medica inmediatamente.
- En caso de contacto dérmico y ocular:  
Lavar con abundante agua durante 15 min. Solicitar atención médica en caso de contacto ocular.
- En caso de ingestión:  
Solicitar atención médica inmediata.
- En tanque de almacenamiento del hipoclorito de sodio incorporar:
- Riesgo de vida: 3 “Serio”  
Inflamabilidad: 0 “No se inflama”  
Reactividad: 1 “Inestable en caso de calentamiento”  
Riesgo específico: OXI “Oxidante”



Ítem	Problemas operativos
1	Si la dosis de hipoclorito de sodio es menor a la requerida, no se logrará la eliminación completa de organismos patógenos. Si la dosis de hipoclorito de sodio es mayor a la necesaria, el agua tratada presentará altos niveles de cloro.
2	Si existe una alta concentración de biopelícula en las paredes del tanque, esta reacciona con el cloro, disminuyendo su concentración y limitando la desinfección del agua tratada.

Ítem	Acciones que tomar
1	Seguimiento estricto del programa de mantenimiento.
2	Evitar la formación de capas gruesas de biopelícula.

<sup>77</sup> MMP - 400: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento cuaternario, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 400 <sup>78</sup>
Videncia	Activo

Utensilios de trabajo y herramientas:

Escoba con cerdas de nylon

Manguera

Pistola de agua a presión

Calculadora

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Uniforme de trabajo

Botas de labor y botas de caucho antideslizantes

Respirador con mascarilla antigases inorgánicos

Guantes largos de neopreno, resistentes a productos químicos

Delantal de poliéster para sustancias químicas

Mantenimiento – Manual

Se debe regular la dosificación de hipoclorito de sodio al tanque de contacto. Por lo que se realizarán pruebas para evaluar el cloro libre residual en el agua mediante un test de cloro.

Paso 1. Realizar medición. Pasos especificados en el manual del proveedor.

Paso 2. Anotar valor obtenido en la ficha de dosificación de hipoclorito de sodio, columna “Cloro residual libre”.

Paso 3. Utilizar calculadora y dividir 0.284 entre el valor obtenido con la prueba de cloro.

Paso 4. Anotar valor en columna “Dosificación de hipoclorito de sodio”.

Paso 5. Se debe regular la bomba dosificadora respecto al valor obtenido.

Nota: Si durante una semana la variación en la dosificación de hipoclorito de sodio no varía significativamente, la prueba de cloro libre se realizará en periodos más prolongados, así sucesivamente hasta encontrar un valor estable de dosificación.

<sup>78</sup> MMP - 400: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento cuaternario, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 400 <sup>79</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento – Manual

#### Mantenimiento mensual

Se debe observar y tocar las paredes internas del tanque. Si estas presentan una capa gruesa ligosa, se debe proceder a realizar el mantenimiento. De lo contrario, se pospone el mantenimiento para el siguiente mes.

Es necesario realizar el mantenimiento con dos personas para introducir el equipo y herramientas de mantenimiento, de forma segura.

Paso 1. Cerrar llave de ingreso de agua residual.

Paso 2. Ponerse botas de hule, guantes de neopreno, gabacha de PVC y lentes de protección.

Paso 5. Desprender el material adherido en las paredes del tanque por medio de la escoba con cerdas de nylon.

Paso 6. Con agua a presión, enjuagar paredes y fondo del tanque.

#### Mensual

Paso 1. Ponerse botas de caucho, delantal de poliéster, respirador con máscara antigases y guantes de neopreno.

Paso 2. Destapar tanque de almacenamiento de hipoclorito de sodio.

Paso 3. Llenar y cerrar tanque.

(NIOSH, 2003)

(DUPONT, 2018)

(ARVI, 2015)

---

<sup>79</sup> MMP - 400: Manual de mantenimiento preventivo – Tratamiento cuaternario, operación única

h. Manejo y tratamiento de biogás

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales				
Código	MMP - 500 <sup>80</sup>				
Videncia	Activo				
	Equipo / Estructura	Filtro desulfurador y deshidratador de biogás, gasómetro y quemador			
Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Explosiones. Posibilidad de formación de una atmosfera explosiva en el interior del sistema de almacenamiento de biogás.	50	6	2	600
2	Incendio. Por uso de quemador de gas.	25	3	3	225
3	Inhalación de sustancias nocivas. Por contacto con biogás o metano.				
	Metano				
	En caso de inhalación				
	Puede causar asfixia por desplazamiento de oxígeno, pérdida de conocimiento, dolor de cabeza y nauseas.				
	Sulfuro de hidrógeno	15	2	2	60
	En caso de inhalación				
	Puede causar náusea, vómito, diarrea, irritación a la piel, falta de olfato, visión nublada, arritmia cardíaca, parálisis respiratoria.				
	En caso de contacto con los ojos				
	Puede provocar lagrimeo, dolor y visión nublada.				

<sup>80</sup> MMP - 500: Manual de mantenimiento preventivo – Manejo y tratamiento de biogas, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 500 <sup>81</sup>
Videncia	Activo
Ítem	Acciones que tomar

- 1 Riesgo inaceptable. Suprimir fuentes de incendio. Mantener quemador alejado, se recomienda implementar un sistema de pararrayos en caso de descargas atmosféricas. Señalizar “Peligro de explosión”, “Prohibición de producción de fuego”.

Figura 104. Señalización - Riesgo de explosión



Figura 103. Señalización - Prohibición de producción de fuego



- 2 Riesgo alto. Contar con un área de seguridad alrededor del quemador de 15 m de diámetro. El área debe estar libre de vegetación, edificio y rutas de tránsito.

- 3 Riesgo moderado. Señalización. “Sustancias nocivas”, “Materiales inflamables.”

Figura 106. Señalización - Sustancias nocivas



Figura 105. Señalización - Materiales inflamables



Metano

En caso de inhalación

Suministrar atención médica inmediatamente. Trasladar a la víctima al área no contaminada para que inhale aire fresco.

<sup>81</sup> MMP - 500: Manual de mantenimiento preventivo – Manejo y tratamiento de biogas, operación única

**MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 500 <sup>82</sup>
Videncia	Activo

Sulfuro de hidrógeno

En caso de inhalación: Suministrar atención médica inmediatamente. Trasladar a víctima a área no contaminada para que inhale aire fresco.

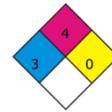
En caso de contacto con los ojos: Lavar con abundante agua durante 15 min. Solicitar atención médica.

En la geomembrana incorporar:

Riesgo de vida: 3 “Serio”

Inflamabilidad: 4 “Extremadamente inflamable”

Reactividad: 0 “Estable”



Ítem	Problemas operativos
1	Si no se elimina el sulfuro de hidrógeno, este tiene efectos potenciales a la salud y posee un alto impacto ambiental.
2	Si no se elimina el agua del biogás, este puede condensarse y tapan la tubería.
3	Fuga de biogás de la membrana interna hacia membrana externa. Puede alcanzar concentraciones inflamables de metano.

Ítem	Acciones que tomar
1	Utilizar filtro adecuado.
2	Utilizar filtro adecuado.
3	Cerrar válvula de suministro hacia el gasómetro e investigar anomalía.

Utensilios de trabajo y herramientas

Filtro desulfurador y deshidratador

Equipo de protección personal

Casco de protección

Uniforme de trabajo

Botas de labor

<sup>82</sup> MMP - 500: Manual de mantenimiento preventivo – Manejo y tratamiento de biogas, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 500 <sup>83</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento – Manual

#### Mantenimiento diario

Paso 1. Controlar y monitorear el volumen del gasómetro.

Paso 2. Si el volumen medido por el sensor se encuentra cercano, igual o sobrepasa el volumen permisible de almacenamiento (500 m3) se debe utilizar el quemador de gas.

#### Quemador

Paso 3. Encender quemador manualmente.

Paso 4. Abrir válvula de salida de gas.

Paso 5. Monitorear el volumen del gasómetro hasta que esté por debajo del valor permisible.

Paso 6. Apagar quemador.

#### Filtro

En caso de que el filtro haya cumplido su vida útil, se debe cambiar de filtro desulfurizador y deshidratador por uno nuevo.

Nota: Para el mantenimiento se debe tomar en cuentas las especificaciones del proveedor.

(Linde, 2012)

(López, Ramírez, Gomes & Morgan, 2017)

---

<sup>83</sup> MMP - 500: Manual de mantenimiento preventivo – Manejo y tratamiento de biogas, operación única

i. Deshidratación de lodos

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 600 <sup>84</sup>
Videncia	Activo
Equipo / Estructura	Patio de secado de lodos

Ítem	Riesgos	Consecuencia	Exposición	Probabilidad	VALORACIÓN
1	Sobreesfuerzos, posturas inadecuadas o movimientos repetitivos. Al utilizar la pala a diario para remover los lodos.	1	10	6	60

Ítem	Acciones que tomar
------	--------------------

1	Riesgo moderado. Se recomienda realizar la limpieza de las celdas con dos operarios para disminuir el tiempo de exposición.
---	---

Ítem	Problemas operativos
------	----------------------

1	Moscas y malos olores. Se debe a que los lodos fueron mal estabilizados.
---	--

Ítem	Acciones que tomar
------	--------------------

1	Adicionar cal.
---	----------------

Utensilios de trabajo y herramientas:

Pala cuadrada de albañil

Camión ligero

Equipo de protección personal:

Casco de protección

Uniforme de trabajo

Botas de hule

Guantes de nitrilo

<sup>84</sup> MMP - 600: Manual de mantenimiento preventivo – deshidratación de lodos, operación única

MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Sección	Planta de tratamiento de aguas residuales
Código	MMP - 600 <sup>85</sup>
Videncia	Activo

Mantenimiento – Mecánico / Manual

Las celdas del patio de secado serán llenadas una cada día.

Se realizarán descargas diarias del tanque clarificador secundario por 12 h. Descargas cada 2.5 días del sedimentador primario por 30 min y descargas cada 30 días del tratamiento secundario por 1.5 h.

El tiempo de secado de los lodos por celda es de 20 días.

El tiempo de limpieza por celda es de 2 días.

Mantenimiento diario

Paso 1. Abrir válvula de tubería de descarga de lodos en la celda correspondiente.

Paso 2. Por medio de la bomba de desplazamiento positivo, bombear lodos durante el tiempo correspondiente según la fuente de descarga.

Paso 3. Secado de lodos durante 20 días.

Para la limpieza de las celdas es necesario realizarla con 3 operarios.

Paso 4. Ponerse botas de hule, guantes de nitrilo, utilizar pala y camión ligero.

Paso 5. En el día 1 de mantenimiento, se realizará la limpieza parcial de la celda por medio de palas. Procurar extraer únicamente la capa de lodos y no la capa de grava y arena. Dichos lodos serán depositados en camión que quedarán a disposición del ingenio.

Paso 6. En el día 2 de mantenimiento, se terminará de limpiar la celda del día anterior y se limpiará parcialmente la siguiente celda.

Paso 7. Se extraerán lixiviados por medio de una bomba de vacío para disposición del ingenio.

Mantenimiento cada 8 meses

Debido a la pérdida de grava y arena por la extracción de lodos diaria. Se debe rellenar las celdas con la cantidad mencionada anteriormente.

En caso de crecimiento de vegetación en las celdas del patio de secado, estas deben ser removidas.

(Dodane & Ronteltap, 2014) (3M, 2018)

<sup>85</sup> MMP - 600: Manual de mantenimiento preventivo – deshidratación de lodos, operación única

#### 4. Mantenimiento general

Tabla 76. Mantenimiento general

Equipo / Estructura	Mantenimiento	Frecuencia
Bombas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Filtro de succión. Verificar la diferencia de presión entre los manómetros colocados a cada lado del filtro. Si la caída de presión aumenta, se debe limpiar el filtro.</li> <li>Inspeccionar empaques, de ser necesario lubricar. En caso de que ya no pueda controlarse la fuga de la caja de empaque ajustando el collarín, se debe reemplazar el empaque.</li> </ul>	Diario
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lubricación de cojinete. Verificar nivel y estado de aceite.</li> <li>Sellos mecánicos. Si presenta fugas debe reemplazarse.</li> </ul>	Semanal
Tubería	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observar estado de tuberías para evitar obstrucciones en el sistema</li> <li>Revisar si hay fugas en tuberías.</li> </ul>	Semanal
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limpieza de tuberías con agua a presión</li> </ul>	Anual
Válvulas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Engrasado de válvulas.</li> <li>Pintar válvulas con pintura anticorrosiva.</li> <li>Reparación o cambio de válvulas.</li> </ul>	Semestral
Barandas	<ul style="list-style-type: none"> <li>En caso de que las barandas presenten corrosión, se deben limpiar con un cepillo de cerdas de alambre y pintar con pintura anticorrosión.</li> </ul>	Anual

(SENA, 1995)

(Movilla, 2012)

## 5. Programa de mantenimiento preventivo

A continuación, se muestra un resumen del periodo de mantenimiento necesario para la planta de tratamiento de aguas residuales. De igual forma, se detalla la cantidad de operarios necesaria para cada actividad. Cabe mencionar, que se debe registrar el mantenimiento realizado en las fichas de registro de limpieza y mantenimiento 1, 2 o 3 según actividad realizada.

Tabla 77. Programa de mantenimiento preventivo

	Equipo / Estructura	Periodo de mantenimiento <sup>86</sup>						Personal requerido
		D	S	M	TM	SM	A	
Tratamiento Primario	Remover aceites y grasas		1					1
	Limpieza trampa de grasa				1			1
	Eliminar solidos gruesos	1						1
	Limpieza de corrosión de rejilla y cribas					1		1
	Limpieza canal Parshall					1		1
	Limpieza tanque homogeneizador					1		1
	Limpieza tanque sedimentador primario					1		2
Tratamiento Secundario	Retro-lavado de filtro anaerobio de flujo ascendente						1	1
Tratamiento Terciario	Limpieza tanque reducción de nutrientes					1		2
	Limpieza tanque clarificador					1		2
Tratamiento cuaternario	Limpieza de tanque de contacto			1				2
Manejo y tratamiento de biogás y lodo	Quemador de gas	1						1
	Limpieza de patio de secado de lodos	1						4
Otros	Inspección de bombas y tuberías	1						1
	Inspección y mantenimiento de válvulas					1		1
	Mantenimiento de barandas						1	1

<sup>86</sup> D: Diario, S: semanal, M: Mensual, TM: Trimestral, SM: Semestral, A: Anual

Para el mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales es necesario dos operarios para realizar las actividades diarias y de forma segura. Ambos tendrán una jornada ordinaria de trabajo efectivo no mayor a 8 horas como lo indica el Código de Trabajo en el artículo 116. De igual forma, tendrán goce de incentivo y los derechos sociales mínimos de la legislación de trabajo como lo indica la Constitución de la Republica de Guatemala en el artículo 102. Cabe mencionar que para la limpieza del patio de secado de lodos es necesario dos personas adicionales para extraer los lodos a diario. Estas personas operarán en la planta de tratamiento únicamente para dicha actividad y queda a discreción del ingenio azucarero el pago por las horas de labor realizadas y su calendarización con otras actividades dentro del Ingenio.

## 6. Plan de emergencias

En caso de emergencia puede ser necesaria la evacuación del lugar de trabajo y el personal debe ser dirigido a un punto de reunión específico. Dicho punto de encuentro debe definirse en base a la distribución de la planta de tratamiento de aguas residuales. Entre las consideraciones para definir el lugar indicado se encuentran, la fácil accesibilidad, disposición de rutas de evacuación y distancia suficiente entre los posibles riesgos del punto de reunión para no afectar al personal evacuado. Se debe señalar con “Ruta de evacuación” y “Punto de reunión”.

Figura 107. Señalización - Ruta de evacuación



Figura 108. Señalización - Punto de encuentro



## 7. Parámetros de control

A continuación, se detallan los parámetros de medición de las características del agua residual para el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236 – 2006. Los límites máximos permisibles se muestran en la Tabla 78.

Tabla 78. Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores

Parámetros	Unidades	Valores
Temperatura	°C	TCR +/- 7
Grasas y aceites	ppm	10
Material flotante	Ausencia / presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	ppm	100
Nitrógeno total	ppm	20
Fósforo total	ppm	10
Potencial de hidrógeno	pH	6 a 9
Coliformes fecales	Coliformes fecales	< 1 x 10 <sup>4</sup>
Arsénico	ppm	0.1
Cadmio	ppm	0.1
Cianuro total	ppm	1
Cobre	ppm	3
Cromo hexavalente	ppm	0.1
Mercurio	ppm	0.01
Níquel	ppm	2
Plomo	ppm	0.4
Zinc	ppm	10
Color	UPT	500

Los lodos obtenidos por la planta de tratamiento de aguas residuales quedarán a disposición del ingenio azucarero. Se recomienda realizar análisis fisicoquímicos para efectuar la disposición final como lo indica el Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 Artículo 41. Los parámetros y límites máximos permisibles para lodos se muestran la Tabla 31.

Tabla 79. Parámetros y límites máximos permisibles para lodos

Disposición final	Unidades	Aplicación al suelo	Disposición en relleno sanitario	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	ppm a 104 °C	50	100	> 100
Cadmio	ppm a 104 °C	50	100	> 100
Cromo	ppm a 104 °C	1500	3000	> 3000
Mercurio	ppm a 104 °C	25	50	> 50
Plomo	ppm a 104 °C	500	1000	> 1000

La frecuencia de toma de muestras para seguimiento y evaluación de aguas residuales y lodos será como mínimo 2 veces al año, según lo estipulado en el Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 Artículo 49. Las muestras deberán tomarse por laboratorios certificados y se recomienda archivar los resultados originales.

Adicional, se debe realizar los siguientes análisis, para una correcta operación del sistema.

Tabla 80. Análisis químico

Prueba	Ubicación	Descripción	Frecuencia
Cloro libre residual	Tratamiento cuaternario - Tanque de contacto	Realizar análisis para regular la dosificación de hipoclorito de sodio al tanque.	Diario
Nitrógeno total	Tratamiento terciario - Tanque de reducción de nutrientes	Realizar análisis para programar dosificación de enzimas al tanque, en caso de no cumplir con el parámetro estipulado.	Semanal
pH	Tratamiento secundario	Realizar análisis para programar dosificación de bicarbonato de sodio, en caso de no cumplir con el parámetro estipulado.	Diario

Las acciones que deben tomarse según el resultado de cada análisis se detallan en el manual de mantenimiento.

## 8. Registro de mantenimiento

Tabla 81. Ficha de registro de caudal

Fecha	Hora de medición	Caudal	Observaciones

Tabla 82. Ficha de dosificación de hipoclorito de sodio

Nota	Dosis de hipoclorito de sodio = 0.284/ cloro residual libre		
Fecha	Cloro residual libre (mg/L)	Dosis de hipoclorito de sodio (L/h)	Observaciones

Tabla 83. Ficha de registro de nitrógeno total

Nota	Valores permisibles, por debajo de 20 miligramos por litro		
Fecha	Nitrógeno total	Aplicación de enzimas (Sí / No)	Observaciones

Tabla 84. Ficha de registro de pH

Nota	Rango permisible 0.6 a 0.8		
Fecha	pH	Aplicación de bicarbonato de sodio (Sí / No)	Observaciones

Tabla 85. Ficha de registro de limpieza y mantenimiento 1

Nota		Marcar con una "X" la actividad realizada				Observaciones
Fecha	Remoción aceites y grasas	Limpieza trampa de grasa	Limpieza de solidos gruesos	Limpieza patio de lodos	Limpieza tanque de contacto	

Tabla 86. Ficha de registro de limpieza y mantenimiento 2

Nota		Marcar con una "X" la actividad realizada					
Fecha	Limpieza corrosión rejilla y criba	Limpieza canal Parshall	Limpieza tanque homoge- neizador	Limpieza tanque sedimen- tador.	Limpieza tanque reductor de nutrientes	Limpieza tanque clarifica- dor	Retro- lavado de filtro anaerobio

Tabla 87. Ficha de registro de limpieza y mantenimiento 3

Nota		Marcar con una "X" la actividad realizada		Observaciones
Fecha		Mantenimiento de válvulas	Mantenimiento de barandas	

## 9. Perfil del operario

A continuación, se detalla las funciones y competencias que debe tener un operario en la plata de tratamiento de aguas residuales. Cabe mencionar que este debe poseer un estado físico saludable debido a las actividades de limpieza y mantenimiento de la planta.

Tabla 88. Perfil del operario

Puesto de trabajo	Operador y encargado de mantenimiento
Lugar de trabajo	Planta de tratamiento de aguas residuales
Personal a su cargo	-
Descripción del cargo	
Supervisar el proceso de las aguas residuales a través de la planta de tratamiento. El trabajo supone hacer funcionar la planta, realizar el mantenimiento y limpieza necesario.	
Funciones y responsabilidades principales	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supervisión del proceso de tratamiento de aguas residuales.</li> <li>• Controlar parámetros de funcionamiento de la planta.</li> <li>• Limpieza periódica de tanques y equipos.</li> </ul>	
Perfil	
Carrera base	Experiencia
Estudios medios	Ninguna.
Competencias requeridas para el cargo	
Competencia organizacional	Nivel requerido
Concentración	Medio
Trabajo en equipo	Alto
Responsabilidad	Alto
Disciplina	Alto
Capacidad de análisis	Medio
Toma de decisiones	Medio
Organización	Alto
Comunicación	Medio

## G. Módulo 7: Análisis económico

### 1. Costos de energía PTAR

Tabla 89. Costo de energía PTAR

Potencia requerida (kW)	Precio aproximado kWh (Quetzales)	Gastos anuales	Cantidad de bombas	
29.1967		0.31	Q452,439.43	15

### 2. Costo de mano de obra PTAR

Tabla 90. Costo de mano de obra PTAR

Cantidad operarios	Descripción puesto	Salario por hora	Horas al día	Salario base	Prestaciones	Bono incentivo	Salario con bono incentivo	Salarios anuales
Fijos	Operario maquinaria pesada	Q12.00	8	Q2,880.00	Q4,123.01	Q250.00	Q8,746.02	Q104,952.19
Ayudantes	Ayudantes	N/A	8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

### 3. Componente de la inversión inicial por tratamiento en la PTAR.

Las propuestas para los tratamientos secundario y terciario fueron diseñadas de dos opciones utilizando un FAFA (Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente) o una Laguna para la purificación de agua, Sin embargo, se realizaron ambos costeos de las opciones para la PTAR, con diferencias en las operaciones unitarias, tanto de tamaño como la cantidad de equipos necesarios. El alto costo de inversión de las lagunas<sup>87</sup>, rechazó dicha propuesta, además se debe mencionar que la laguna tiene menor eficiencia de remoción de materia orgánica que el FAFA. Por lo tanto, se descarta la propuesta de la utilización de una laguna para la remoción de materia orgánica.

<sup>87</sup> Consultar tratamiento secundario.

Tabla 91. Comparación inversión total -ambas propuestas<sup>88</sup>

RESUMEN INVERSIÓN FAFA	
Total, PTAR	Q11,898,796.55
Inversión en dólares <sup>89</sup>	\$1,537,312.22
RESUMEN INVERSIÓN LAGUNAS	
Total, PTAR	Q13,131,447.82
Inversión en dólares	\$ 1,696,569.49

a. Tratamiento preliminar y primario

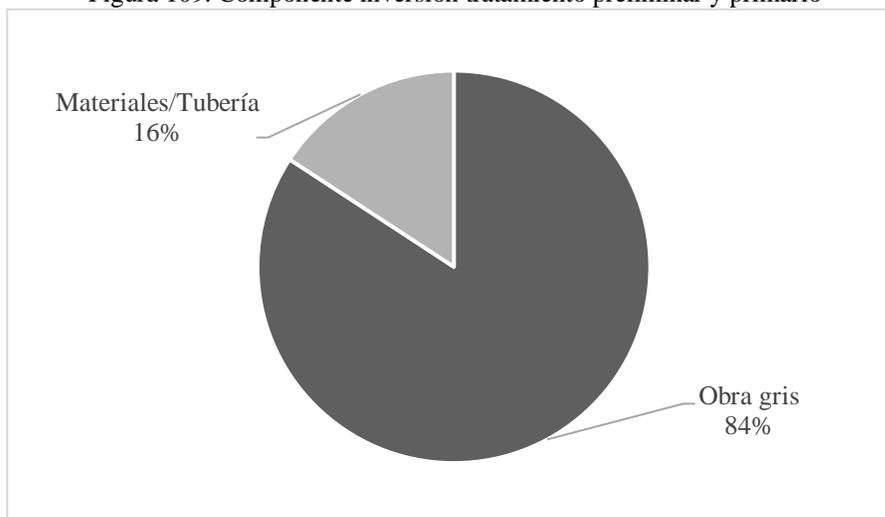
Tabla 92. Componente inversión tratamiento preliminar y primario

Inversión Inicial	
Obra gris	Q381,753.98
Equipos	Q766.26
Materiales/Tubería	Q133,820.10
<b>Total</b>	<b>Q516,340.34</b>
Costos de operación (6%)	Q30,980.42
Imprevistos (5%)	Q1,549.02
Inversión con COP e imprevistos	Q548,869.79

<sup>88</sup> El resultado de la inversión no contempla gastos de operación, ni imprevistos.

<sup>89</sup> Cambio de dólar a Q7.74

Figura 109. Componente inversión tratamiento preliminar y primario

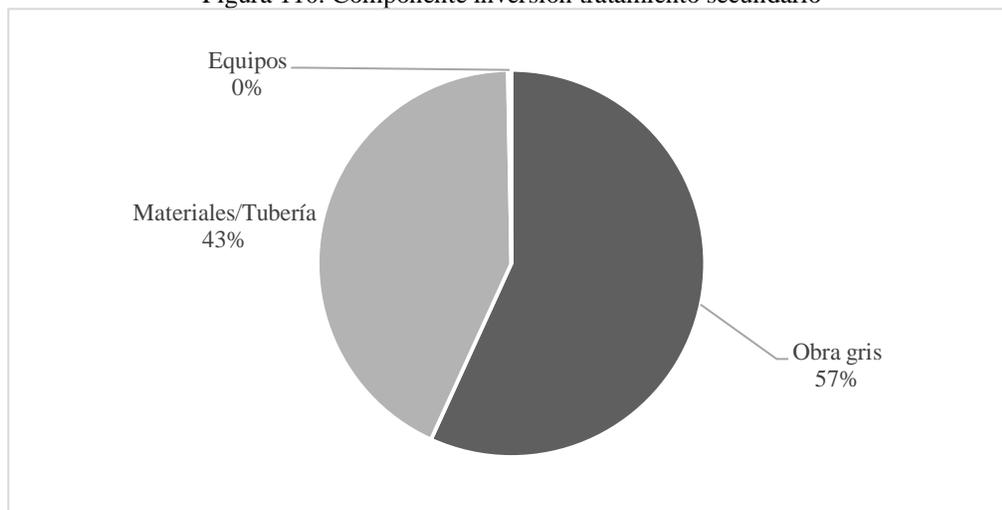


b. Tratamiento secundario

Tabla 93. Componente inversión tratamiento secundario

Inversión Inicial	
Obra gris	Q987,505.45
Equipos	Q4,985.00
Materiales/Tubería	Q745,686.77
<b>Total</b>	<b>Q1,738,177.22</b>
Costos de operación (6%)	Q104,290.63
Imprevistos (5%)	Q5,214.53
<b>Inversión con COP e imprevistos</b>	<b>Q1,847,682.39</b>

Figura 110. Componente inversión tratamiento secundario

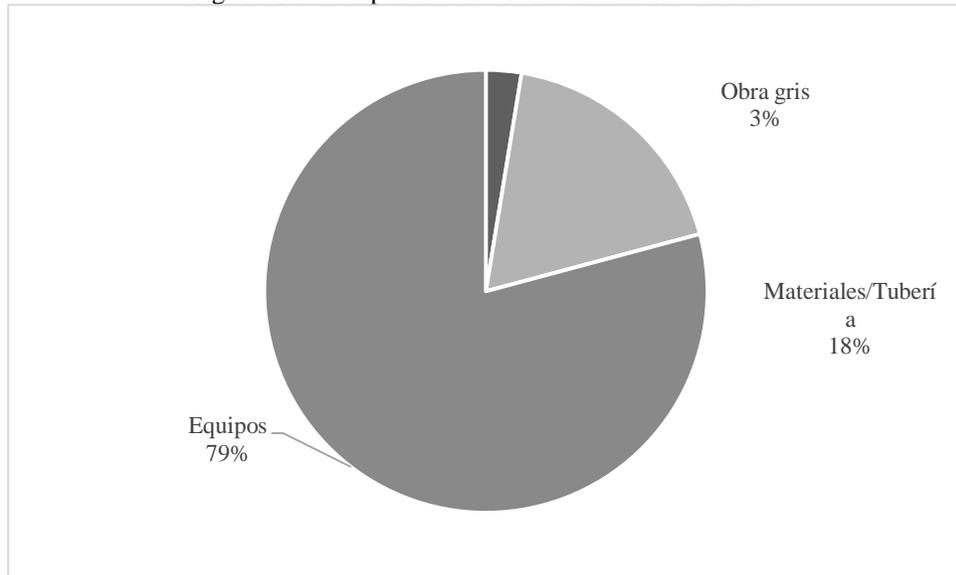


c. Tratamiento terciario

Tabla 94. Componente inversión tratamiento terciario

Inversión Inicial	
Obra gris	Q12,702.02
Equipos	Q274,210.22
Materiales/Tubería	Q54,391.76
<b>Total</b>	<b>Q341,303.99</b>
Costos de operación (6%)	Q20,478.24
Imprevistos (5%)	Q1,023.91
<b>Inversión con COP e imprevistos</b>	<b>Q362,806.14</b>

Figura 111. Componente inversión tratamiento terciario

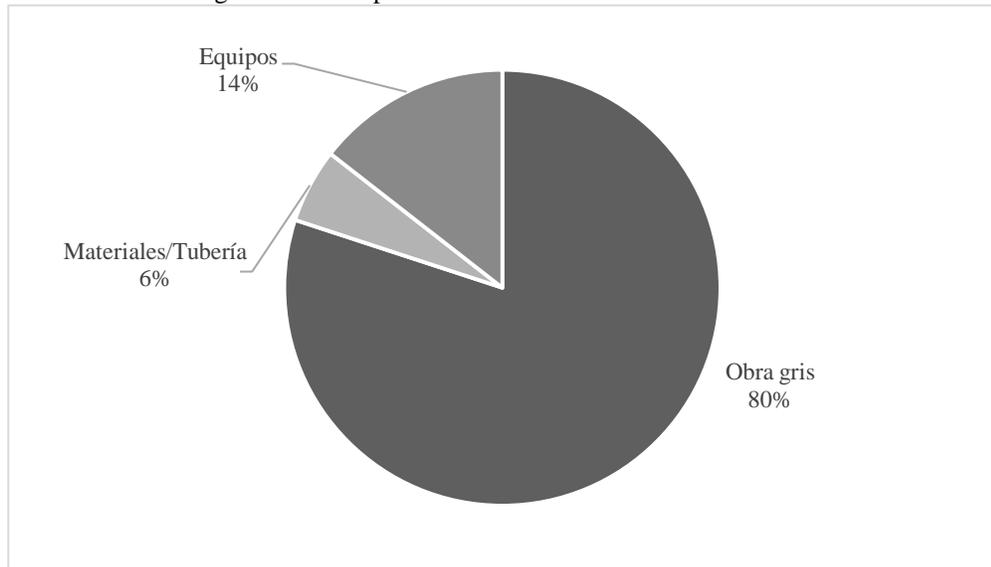


d. Tratamiento cuaternario

Tabla 95. Componente inversión tratamiento cuaternario

Inversión Inicial	
Obra gris	Q40,590.47
Equipos	Q7,330.84
Materiales/Tubería	Q2,795.20
<b>Total</b>	<b>Q50,716.51</b>
Costos de operación (6%)	Q3,042.99
Imprevistos (5%)	Q152.15
<b>Inversión con COP e imprevistos</b>	<b>Q53,911.65</b>

Figura 112. Componente inversión tratamiento cuaternario

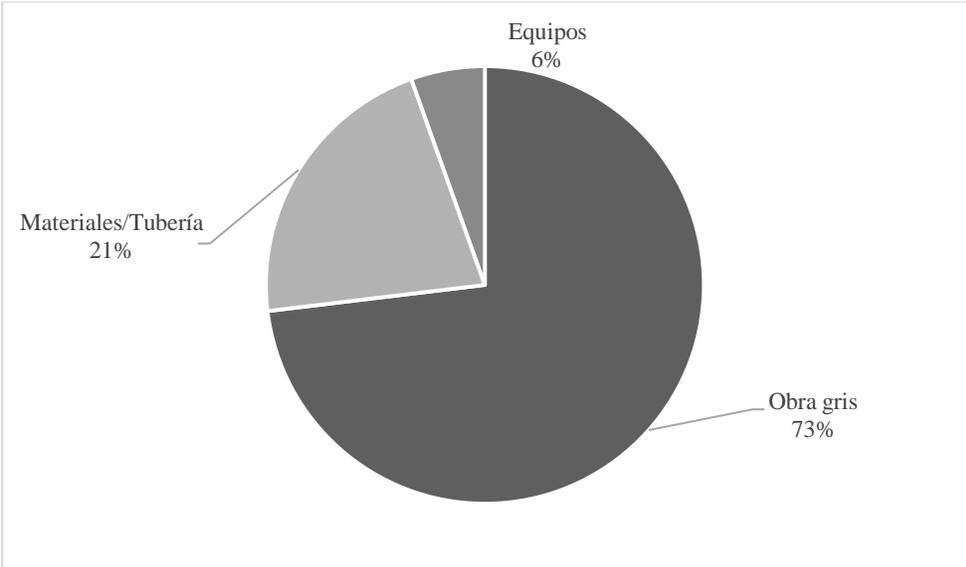


e. Tratamiento de lodos y biogás

Tabla 96. Componente inversión tratamiento de lodos y biogás

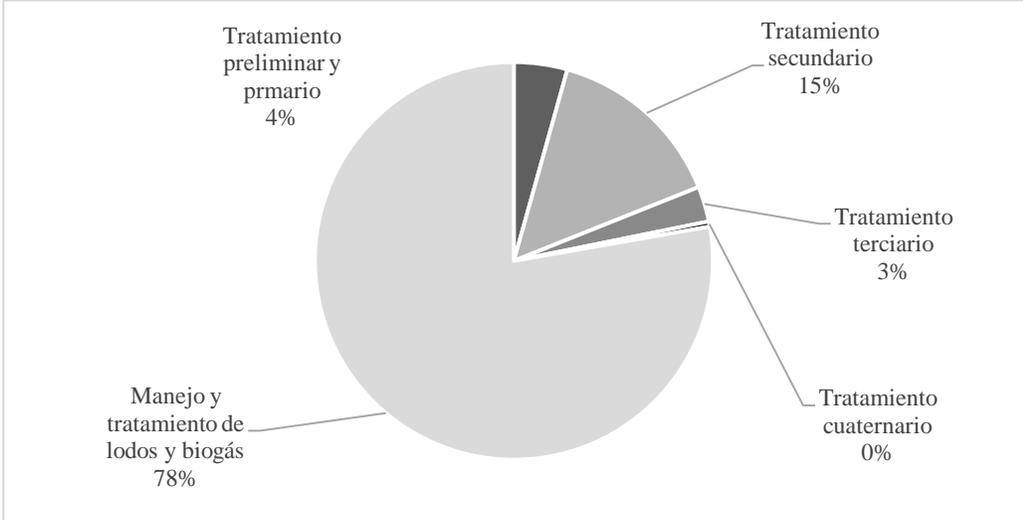
Inversión Inicial	
Obra gris	Q6,763,136.64
Equipos	Q505,204.80
Materiales/Tubería	Q1,984,683.31
<b>Total</b>	<b>Q9,253,024.75</b>
Costos de operación (6%)	Q555,181.48
Imprevistos (5%)	Q27,759.07
<b>Inversión con COP e imprevistos</b>	<b>Q9,835,965.31</b>

Figura 113. Componente inversión tratamiento de lodos y biogás



4. Porcentaje de participación económica en la PTAR.

Figura 114. Participación económica de los tratamientos que incluye la PTAR

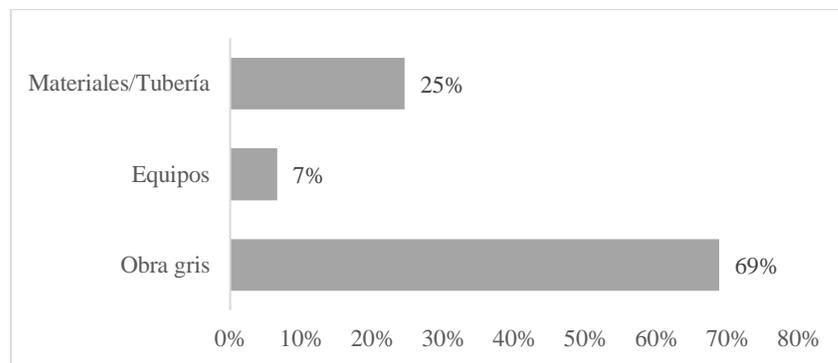


## 5. Inversión total inicial

Tabla 97. Inversión inicial PTAR

Inversión Total	
Obra gris	Q8,185,688.56
Equipos	Q791,730.86
Materiales/Tubería	Q2,921,377.13
<b>Total</b>	<b>Q11,898,796.55</b>

Figura 115. Participación económica por división de requerimientos



## 6. Costo de operaciones unitarias y volúmenes

Tabla 98. Costo de operaciones unitarias

	Volumen (m3)	Costo (Q)
<b>Operaciones unitarias</b>	<b>1,664.51</b>	<b>Q8,011,650.72</b>
Canal de cribado	0.3	Q282.27
Canal de rejillas	0.79	Q743.30
Canal Parshall	0.92	Q863.53
Celda para secado de lodo 2rio	135	Q108,736.02
Celdas para secado de lodo 1rio y 3rio	768.96	Q6,558,453.36
Clarificador	13.5	Q12,702.02
Filtro	486	Q915,420.11
Tanque de contacto	41.64	Q39,179.13
Tanque homogenizador	3.68	Q6,916.79
Tanque sedimentador primario	177.78	Q334,540.97
Tanque separador de grasas	35.94	Q33,813.23

## 7. Escenarios de flujo de efectivo para recuperación de inversión

### a. Ahorro en gas propano por la producción de biogás en cocina industrial

Gas propano <sup>90</sup>		
Cantidad requerida anual (litros)	Precio del litro de gas propano (Q)	Gasto anual (Q)
109020	Q3.18	Q346,683.60

### b. Comercialización del compost

Compost <sup>91</sup>		
Producción anual (m3)	Costo de producción anual (Q)	Ventas anuales (Q)
7560	Q899,640.00	Q6,415,200.00

### c. Escenario No. 1 Pesimista, Cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Flujo de efectivo escenario 1, se encuentra en el apartado de anexos página 513, mostrando como resultado lo siguiente:

Tabla 99. Resultados escenario pesimista<sup>92</sup>

N (años)	15
i - tasa de interés (TMAR <sup>93</sup> )	13%
VAN <sup>94</sup>	-Q18,451.76
Inversión Inicial	Q 11,898.80

<sup>90</sup> Ver detalle de cálculos anexos, pág 355

<sup>91</sup> Ver detalle de cálculos anexos, pág 356

<sup>92</sup> Resultados se encuentran en miles de quetzales.

<sup>93</sup> Tasa Mínima de Aceptable de Rendimiento.

<sup>94</sup> Valor Actual Neto.

- d. Escenario No. 2, Más Probable, Cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006 y la producción de biogás como producto secundario

Flujo de efectivo escenario 2, se encuentra en el apartado de anexos página 514, mostrando como resultado lo siguiente:

Tabla 100. Resultados escenario más probable, biogás<sup>95</sup>

N (años)	15
i - tasa de interés (TMAR)	13%
VAN	-Q16,486.14
Inversión Inicial	Q 11,898.80

- e. Escenario No. 2 Más Probable, Cumplimiento de Acuerdo Gubernativo 236-2006 y la comercialización de compost como producto secundario

Flujo de efectivo escenario 2, se encuentra en el apartado de anexos página 515, mostrando como resultado lo siguiente:

Tabla 101. Resultados escenario más probable, compost<sup>96</sup>

N (años)	15
i - tasa de interés (TMAR)	13%
VAN	-Q6,713.30
TIR	4%
Inversión Inicial	Q 11,898.80

---

<sup>95</sup> Resultados se encuentran en miles de quetzales.

<sup>96</sup> Resultados se encuentran en miles de quetzales.

- f. Escenario No. 3 Optimista, Cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006, la producción de biogás y comercialización de compost

Flujo de efectivo escenario 3, se encuentra en el apartado de anexos página 516, mostrando como resultado lo siguiente:

Tabla 102. Resultados escenario optimista<sup>97</sup>

N (años)	15
i - tasa de interés (TMAR)	13%
VAN	-Q5,059.37
TIR	7%
Inversión Inicial	Q 11,898.80

---

<sup>97</sup> Resultados se encuentran en miles de quetzales.

## 8. Análisis estratégico de la implementación de la PTAR en un ingenio azucarero.

### a. FODA, implementación de una PTAR en un ingenio azucarero.

Tomando en cuenta el escenario 3, suponiendo que la PTAR cumpla con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, generación biogás y la comercialización de compost, se concluye en el siguiente FODA.

Tabla 103. FODA

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingenio azucarero reconocido por su conciencia ambiental en la generación de bioenergía.</li> <li>• Reconocimiento por proyectos de responsabilidad ambiental.</li> <li>• Reutilización de desechos, generando productos con valor para seguir un modelo de negocios con esto.</li> <li>• Cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de negocio de compost para el ingenio azucarero.</li> <li>• Ahorro en el gas propano y compost para las cosechas.</li> <li>• Reutilización de aguas, en proceso de lixiviación, para fertirriego.</li> <li>• Certificaciones de calidad para generar prestigio al ingenio azucarero.</li> <li>• Aumento en ingresos por la producción de compost.</li> </ul>
DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de inversión es alto.</li> <li>• Los ingresos comenzarían a producirse al año de la implementación de la PTAR.</li> <li>• Se desconoce la calidad del compost que se estará produciendo.</li> <li>• Minusvalorar la producción del biogás debido a su ineficiencia energética.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encontrar otras soluciones para tratar las aguas residuales, omitiendo así la producción de ambos productos secundarios.</li> <li>• Refutar propuesta de PTAR, sabiendo los beneficios económicos que esta traería si se implementa de la manera propuesta.</li> </ul>

b. PESTEL, implementación de una PTAR en un ingenio azucarero.

Tabla 104. PESTEL

<b>POLÍTICOS</b>	<b>ECONÓMICOS</b>	<b>SOCIALES</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La inestabilidad política puede afectar en la inversión de la PTAR, debido a que, si existe inestabilidad política, bajan los ingresos, por lo tanto, invertir en el proyecto se vuelve un inconveniente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los tipos de interés brindados por los bancos para los préstamos de inversión aumentan, debido a la inestabilidad política. Este interés está directamente correlacionado con el riesgo del país.</li> <li>• Aumento de ingresos si se decide vender la producción de compost generado.</li> <li>• Ahorro en gas propano para cocina industrial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de empleo en el área del ingenio azucarero.</li> </ul>
<b>TECNOLÓGICOS</b>	<b>ECOLÓGICOS</b>	<b>LEGALES</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Creación de bioenergía por medio de biogás.</li> <li>• Utilización de biogás para cocinas industriales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reutilización de aguas.</li> <li>• Creación de compost por medio de aguas residuales ordinarias.</li> <li>• Utilización de aguas de proceso de lixiviado para fertirriego.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumplimiento con el Acuerdo Gubernativo 236-2006.</li> </ul>

c. Análisis de las 5 fuerzas de Porter para la comercialización del compost en el ingenio azucarero.

Tabla 105. 5 fuerzas de Porter

<p align="center"><b>PODER DE NEGOCIACIÓN DE LOS CLIENTES</b></p>	<p align="center"><b>RIVALIDAD ENTRE LAS EMPRESAS</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brindar el mejor precio de mercado, cumpliendo así con la calidad requerida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 son los ingenios azucareros que operan en Guatemala, por lo tanto, la producción de compost por una PTAR, es de fácil replicación, esto haría que el mercado de compost aumente y se deba bajar los precios del mismo, volviendo el negocio no rentable.</li> </ul>
<p align="center"><b>AMENAZA DE LOS NUEVOS ENTRANTES</b></p>	<p align="center"><b>PODER DE NEGOCIACIÓN DE LOS PROVEEDORES</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento en la producción de demanda de compost, reducir precio de venta para reducir rentabilidad del modelo de negocio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En Guatemala se produce compost de diferentes materias orgánicas en su mayoría estiércol animal, si en algún momento nuestra planta no está produciendo el compost con las especificaciones necesarias, se deberá acordar una alianza con estos proveedores para no perder la producción de compost en el ingenio.</li> </ul>
<p align="center"><b>AMENAZA DE PRODUCTOS SUSTITUTOS</b></p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El estiércol animal es de los mayores productos sustitutos, debido a que esta PTAR estará tratando excremento humano tendrá que cumplir con los requerimientos del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para ser utilizado como compost.</li> </ul>	



## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### A. Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico

Con el objetivo de diseñar el tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales tipo ordinario provenientes de 27 baterías de baños partiendo de un caudal teórico y del cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236 – 2006, se identificaron las principales etapas de los tratamientos y se calculó la cantidad promedio generada para el año 15 de la operación de la PTAR. Se determinó el caudal promedio de aguas residuales en tiempo de zafra en el año 15 a partir de la actualidad. Dicha proyección se estimó como la vida útil de la PTAR, además de que asegura el funcionamiento con una capacidad superior a la que requiere hoy en día.

El caudal de aguas residuales generadas en la actualidad se calculó teóricamente usando dos métodos: por dotación y de Hunter (ver Tabla 30 página 147). Sin embargo, el método por dotación posee más parámetros variables que alteran el resultado; los caudales de consumo para los aparatos sanitarios como el mingitorio de pared, duchas y lavamanos fueron obtenidos experimentalmente. Las unidades de cada uno tienen un efecto importante en la generación de aguas residuales. Por ello, al asumir un tiempo de uso de 12 horas, 5 minutos y 30 segundos, para todos los mingitorios de pared, duchas y lavamanos, respectivamente, se acarrea un error de precisión. Específicamente, se consideró únicamente el caudal generado por las duchas para hombres por ser el sexo representativo y mayoritario en el ingenio azucarero. Ellos aportan la mayoría del caudal por este accesorio. Además, la magnitud del caudal de los hombres discrepa significativamente del de mujeres (ver Tabla 139 página 365). En cuanto al mingitorio de pared, se midió en triplicado las tres salidas de agua sobre la pared para una abertura de la válvula determinada. El caudal medido no está calibrado ni cuantificado propiamente por el encargado del sanitario. Dicho caudal puede variar a diario y repercutir en el flujo enviado a la planta de tratamiento, ya que el personal encargado puede interrumpir el flujo de agua basándose en la frecuencia de uso de los mingitorios (ver Tabla 141 página 366). Una variación en el caudal alteraría el funcionamiento de las etapas diseñadas puesto a que un caudal mayor reduce los tiempos de retención en los equipos cuya capacidad está hecha para un flujo menor. Por ende, los porcentajes de remoción de grasas y partículas sedimentables, según sea el caso, son menores a lo establecido. Por último, se midieron los caudales del lavamanos en triplicado para los baños de la fosa séptica 1, los cuales cambian en diferentes puntos de descarga debido a la trayectoria de la tubería, la cabeza que la bomba debe de vencer para descargar el agua del pozo. Adicionalmente, se usaron unidades fijas para los índices de

generación de aguas residuales en los diferentes servicios como el salón de actos, la tienda y la gasolinera (ver Tabla 134 página 364). Se cuantificaron las personas asistentes a los lugares dado el rango registrado por el departamento de Recursos Humanos en el ingenio azucarero, pero no se consideró la fluctuación de personas que asisten a los servicios a diario. Los cambios de turno y días de cambio de horario generan picos para el consumo. Por lo tanto, el método de Hunter parametriza mejor los caudales según el accesorio sanitario, sin necesidad de suponer el consumo. Dicho esto, se usó el método de Hunter para corroborar que el caudal promedio por el método por dotación brindara un flujo del mismo orden de magnitud.

El factor de retorno utilizado para conocer el flujo volumétrico de las aguas residuales fue de 0.85, debido a que el uso de los sanitarios y demás servicios es muy frecuente con relación a la limpieza realizada. Para obtener el caudal promedio del año 15, se usó un indicador del caudal producido por la cantidad de personas que laboran dentro de la planta de producción en el ingenio azucarero para la zafra del 2017-2018. Se usó un porcentaje de crecimiento poblacional como la unidad superior al crecimiento más alto durante el 2015 al 2017 (ver Tabla 142 página 366). La proyección con tal crecimiento coincide con el comportamiento creciente en las contrataciones del ingenio en cada zafra. Finalmente, resultó en un caudal futuro que ya no requiere de factores de seguridad para diseñar los equipos. A pesar de haber utilizado el método de Hunter para avalar el método por dotación, es necesario realizar un análisis de caudal por 24 horas para la descarga de aguas residuales al ingreso de las fosas sépticas de mayor aporte. Las fosas sépticas número 1, 11 y 21, que corresponden al baño industrial, a los baños del departamento de Compras, Recursos Humanos, Comedor Administrativo, Recepción y Salas de Capacitación y los baños del parqueo de buses, en ese orden, hubiesen brindado información acerca de la generación promedio, mínima y máxima de agua residual (ver Tabla 115 página 339). Este dato sirve para confirmar la veracidad de los métodos de cálculo. Sin este análisis, el dimensionamiento del tratamiento preliminar y primario, así como los tratamientos que le proceden, son únicamente aplicables al ingenio azucarero si y solo si posee el caudal presentado en este trabajo y los parámetros de caracterización iniciales para el efluente alimentado a la PTAR.

Para la implementación de la presente propuesta o la elaboración de futuros trabajos, se debe de llevar a cabo un análisis microbiológico y fisicoquímico de las baterías con mayor aporte al caudal previamente mencionadas. Las demandas bioquímicas de oxígeno y las concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos son de suma relevancia para justificar las etapas propuestas, así como confirmar que las dimensiones son adecuadas para la composición de las aguas residuales. Si el análisis a la entrada de las fosas sépticas muestra que existe mayor demanda química y biológica o más concentración de sólidos suspendidos totales, el sedimentador primario deberá descargar lodos con más frecuencia porque más partículas se asientan en el mismo tiempo de retención. Es decir que, el diseño y el plan de operación y mantenimiento presentado en otro módulo ya no aplica y deberá adaptarse. Por

ello, el ingenio debe de corroborar las etapas propuestas para el tratamiento preliminar y primario, o bien, modificar los parámetros de diseño para cada equipo.

La ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales fue evaluada haciendo un estudio topográfico con una estación total. El Supervisor del Departamento de Servicios Administrativos delimitó un terreno tentativo sobre el cuál se podría construir la PTAR. Se consideró que era adecuado por la lejanía a los procesos productivos, así como la posibilidad de que fuese un punto con mayor desnivel a comparación del resto del área (ver Figura 117 página 385). Con esta información, se prosiguió con la delimitación del área a medir, de tal manera que abarcara las 27 baterías de baños. Como resultado, se obtuvieron curvas de nivel de los puntos en donde se originan los caudales calculados para las baterías ver Figura 118 página 386). Al analizar radialmente los niveles es notorio que al centro el suelo es más alto que en los niveles externos. Si se estudian linealmente hacia el terreno adyacente al ingenio en el sur oeste, el terreno asciende de un extremo al centro y desciende del centro al otro extremo. Esto implica que, para poder unificar las aguas residuales de diferentes partes del ingenio azucarero, será necesario excavar una pendiente suficiente, de 6%, con el fin de que la tubería se posicione y haya flujo por gravedad. Se deberá usar una tubería que permita el paso del efluente a 0.30 m/s aproximadamente. Los parámetros mencionados mantienen un caudal controlado y en dirección hacia el terreno de la PTAR. Utilizando el programa Civil 3D se calcularon las pendientes porcentuales para dos trayectorias propuestas (ver Figura 119 página 387). Estas facilitan la unificación de los caudales por la cercanía que hay sin necesidad de alterar o modificar las construcciones presentes. La primera consiste en una línea a un costado del ingenio con un solo cruce que llega al terreno de interés. Se eligió porque (1) tiene la misma ruta que las aguas que se dirigen al alcantarillado y confirman el flujo por gravedad, (2) ambas rectas poseen una pendiente descendente de 0.1%. No hay edificios ni asfalto a romper, por lo que el aspecto anterior podría reducir los costos para instalar el sistema de tubos. La segunda está conformada por dos cruces y tres rectas, de los cuales únicamente la recta que llega hacia el terreno de interés tiene un nivel descendente de 0.4%. La segunda recta no presenta desnivel mientras que la tercera es ascendente. Se escogió esta trayectoria porque tiene un acercamiento a las baterías. Cabe mencionar que las trayectorias son rutas principales para el sistema de recolección de aguas residuales. Esto no toma en cuenta las implicaciones para instalar y conectar las tuberías desde la descarga de aguas de cada batería de baño.

Para la propuesta del sistema de tratamiento preliminar y primario de aguas residuales tipo ordinario, y realizar los diagramas de la distribución y equipo necesario, se desarrolló el diseño de un tanque separador de aceites y grasas, un canal de cribado, un canal Parshall, un par de tanques de homogeneización de caudal y un par de tanques de sedimentación primaria. La elección del primer equipo está apoyada por la presencia de aceites de los lavamanos y lavaplatos de la cocina administrativa y de la tienda. Para ello se usó una concentración inicial de grasas baja, 0.040 kilogramo por metro cúbico, según lo cataloga Metcalf y Eddy (ver Tabla 149 página 370). La propuesta se realizó

tomando en cuenta que las grasas y aceites que el efluente posean provocarían taponamiento, acumulación y, por consiguiente, mayores costos en mantenimiento para las etapas que le procedan. Su relevancia recae en que es un equipo que admite la adición de aguas residuales provenientes de la cocina industrial u otras áreas en un futuro.

Por ello, la trampa de aceites y grasas es la primera etapa que remueve el 92% de las grasas y aceites por flotación. Por ello se corroboró que el diseño permitiera un tiempo de retención de 30 minutos (ver Tabla 34 página 156). A partir de este intervalo, la teoría indica que es posible obtener un porcentaje de remoción superior al 50% (Romero, 2000, *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*). Como parte de las condiciones para asegurar dicha eficiencia, se considera que no hay emulsiones de glóbulos en el agua y que únicamente se separan los compuestos inmiscibles flotantes. El parámetro utilizado para iniciar el diseño fue el área superficial requerida según la velocidad de ascenso para una densidad de grasas determinada. Luego, se obtuvo las dimensiones del tanque de acuerdo al factor de compensación, tomando en cuenta la turbulencia y el cortocircuito (ver Tabla 150 página 371). El factor prevé que el régimen del fluido pase de laminar a turbulento, y que exista estancamiento. Este valor influye proporcionalmente en el área superficial mínima que requiere dicho tanque. Estas situaciones disminuyen la separación de glóbulos de grasa en el agua residual y la turbulencia, como mecanismo de mezclado, provoca una emulsión en fluidos de dos fases. Esta composición requiere de más tiempo para separar, y en algunos casos no es posible hacerlo. El paso de las moléculas por el tanque en un tiempo inferior al de retención hidráulica es una situación no deseada durante la operación; afecta la alimentación y descarga a un ritmo continuo en la trampa de aceites y grasas. El tanque presentado reduce la probabilidad de que cualquiera de las dos situaciones ocurra por medio de la adición de una pantalla de distribución y del área superficial de la cámara de separación (ver Figura 51 página 151). La pantalla con diámetro de orificio de 0.1 m mantiene un flujo ordenado y, por ende, reduce la turbulencia. Además, se procuró que el área superficial de la cámara de separación fuera superior al mínimo. Esto con el fin de asegurar que la capacidad y el tiempo de retención hidráulico sean suficientes para la remoción especificada. A pesar de que se supuso una baja concentración de aceites y grasas en el agua residual, se debe de desnatar la fase orgánica que se recolecta en la parte superior del tanque. Una vez se haya recolectado, se almacena en un recipiente impermeable y se le vende a un ente que los pueda aprovechar para la producción de combustibles.

El canal de cribado se diseñó en dos partes con el objetivo de remover la totalidad de sólidos flotantes y de unificar la construcción con el canal Parshall. La primera es una criba gruesa compuesta por 13 barrotes a 40° de la vertical con un ancho de luz de 0.0250 m y una pérdida de carga de 0.0315 m (ver Figura 52 página 152). Esta separa sólidos de gran tamaño que contaminan y atascan las etapas siguientes tal y como puede hacerlo el papel higiénico, bolsas, toallas sanitarias, preservativos, basura acumulada, entre otros. La segunda es una malla electrosoldada de 0.006 m de diámetro a 40° de la vertical con una distancia entre varillas de 0.0120 m. Su propósito es retener sólidos de menor tamaño

que se filtran en los barrotes por su forma irregular como por ejemplo cabellos. Se decidió que ambas fueran de limpieza manual. Las dimensiones de cada criba no justifican su automatización con rastrillos y bandas receptoras accionadas por motores. Además, el origen de las aguas residuales no conlleva la adición de basura como contenedores plásticos, empaques de golosinas, entre otros, durante su trayectoria hacia la planta de tratamiento. Entonces el cribado es una etapa de protección ante posibles sólidos que bloqueen y reduzcan la eficiencia en el tratamiento secundario. Dicha decisión representa un ahorro en costos para los instrumentos mecánicos de limpieza. Durante la operación, los sólidos reducen el área de paso del fluido y aumentan la velocidad de las aguas residuales. Se verificó que la cabeza del cribado grueso y fino fuese menor al límite, 0.15 m (ver Tabla 123 página 343). La pérdida de energía en la malla sucia resultó ser de 0.0258 m. La altura del canal se determinó tomando medidas preventivas; en base al nivel del agua, el cual se obtuvo con el área transversal y la pérdida de energía máxima. Puesto a que los rangos de caudal medibles por un canal Parshall son sumamente amplios, se identificaron los que permitieran una medición del caudal promedio para el año 15. Luego se escogió el de ancho de garganta de 9 pulgadas (ver Figura 53 página 153) por poseer dimensiones adaptables al canal de cribado. Por ende, la capacidad del canal Parshall indica que es posible medir caudales superiores, sin problemas en su operación.

Los tanques de homogeneización reciben el efluente del canal Parshall a través de un tubo por gravedad con el fin de abastecer a la planta de tratamiento con un caudal constante durante el tiempo de operación. En la propuesta, están instalados en paralelo para que mientras uno de ellos está operando, el otro está en mantenimiento y será el respaldo del primero (ver Figura 54 página 154). Se diseñó de esta forma para facilitar el llenado y limpieza de los tanques. Adicionalmente, usó un método de cálculo en el que se analizó el comportamiento del volumen acumulado de aguas generadas por el inodoro de tanque o fluxómetro, según fuera el caso, lavamanos y mingitorios de porcelana. Se determinó el volumen necesario para almacenar las aguas generadas por el baño industrial de la fosa séptica 1, para 8 días (ver Tabla 166 página 383). Con la desviación estándar se generó un rango para el volumen necesario de la etapa de homogeneización. La estadística brindó una desviación amplia para los volúmenes la cual se explica por la cantidad de datos registrados para las visitas al sanitario durante los 8 días. Se eligieron días con la mayor datos y horas tabuladas por lo que son los días en los que se llevó un mejor conteo del uso de los sanitarios. Con la información se calculó el volumen promedio acumulado para diferentes horas en un día y con ellos se obtuvo gráficamente el volumen del tanque de homogeneización. Por lo tanto, la desviación estándar depende directamente del detalle y frecuencia del registro. El valor elegido dentro del rango representa el volumen de ambos tanques. Esto significa que, si el caudal aumenta hasta su máximo extraordinario, el arreglo permite desviar el flujo al segundo tanque y operar continuamente.

Se diseñó un tanque rectangular abierto con un canal de alimentación, pantalla difusora, canal de descarga, cámara de rebose y un bordillo (ver Figura 55 página 155). El sistema consta de dos

sedimentadores en un arreglo en paralelo; opera de la misma forma que los tanques de homogeneización. Se delimitaron parámetros de diseño dentro de los rangos de un sedimentador primario (Romero, 2000, *Purificación del agua*). La eficiencia del equipo se determina con el tiempo de residencia de las aguas. La Universidad de las Américas Puebla aconseja que el tiempo de retención sea como mínimo de 30 minutos y máximo de 60 minutos, si la sedimentación precede a un tratamiento secundario anaeróbico. la propuesta contempla que las aguas residuales se dirigen a una laguna anaerobia la cual aprovecha y digiere la materia orgánica remanente y produce una cantidad de lodos y biogás mientras que descarga agua cuyos parámetros de sólidos suspendidos y demandas de oxígeno estarán por debajo de los límites del AG 236 – 2006. El tiempo afecta directamente en la remoción de sólidos suspendidos totales y en la demanda biológica y química de oxígeno. Para las aguas residuales a 25 °C, se tiene una viscosidad baja de las partículas sedimentables que son capaces de depositarse fácilmente en el fondo. Es por ello por lo que, al diseñar un sedimentador primario con 71 minutos de retención (ver Tabla 39 página 158), habrá una remoción parcial de estos parámetros. Las propiedades de las partículas y su comportamiento en el fluido indican que existe un régimen de flujo laminar. Al modelar la sedimentación de las aguas como una corriente a lo largo del tanque como un flujo unidireccional cuyas partículas recorren un trayecto parabólico hasta el fondo, se usó la Ley de Stokes para calcular la velocidad de sedimentación. Se determinó que es inferior a la velocidad horizontal del flujo por lo que cuenta con una remoción de DBO y SST del 28.37 y 49.13% (ver Tabla 168 página 383).

## B. Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales

El objetivo principal del módulo era dimensionar dos sistemas de tratamiento secundario de una planta tratamiento anaeróbico, para reducir la concentración de materia orgánica y comparar los resultados de ambas propuestas. Los dos sistemas dimensionados fueron: filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) y una laguna anaerobia de estabilización. Los resultados de ambas propuestas se muestran en la sección B de Resultados. Ambos sistemas de tratamiento anaeróbico permiten una reducción significativa de la concentración de materia orgánica, como lo muestran las concentraciones de salida (Tabla 43 y Tabla 46) en comparación con las concentraciones de entrada (Tabla 171). Esto permitiría el cumplimiento del artículo 19 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 “*Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*”, el cual exige una descarga de afluentes con una concentración menor a 200 mg/L de DBO y cargas menores a 300 kg/d de DBO. Se concluyó que se logró dimensionar dos propuestas independientes que permiten la reducción de materia orgánica en las aguas negras.

Como parte del objetivo, se comparó los resultados de las dos propuestas. Para ello, se tomó en cuenta la reducción esperada de materia orgánica, el área superficial necesaria y la producción de subproductos, en este caso biogás y lodos. Como se puede observar en la Tabla 43 y Tabla 46, con la

instalación de los FAFA se esperaría una mayor reducción de la materia orgánica. Además, los filtros anaerobios tienen un menor requerimiento de área para su construcción. También se estimó una mayor producción de biogás con el sistema de filtros (Tabla 44 y Tabla 47) lo cual se considera una ventaja por la posibilidad de utilizarlo como fuente de energía. Por último, se espera una menor producción de lodos con la laguna anaerobia, así como una menor frecuencia de descarga de estos. Esto es una ventaja para el tratamiento usando la laguna anaerobia, pues su mantenimiento sería más simple. En el caso de los FAFA, se propone instalar una bomba de desplazamiento positivo para el vaciado, dado que su frecuencia de descarga es de 30 días. El dimensionamiento de la bomba diseñada puede consultarse en el módulo *“Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos residuales obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales”*. En el caso de la laguna anaerobia de estabilización, se recomienda realizar la descarga de lodos utilizando las pipas que actualmente se usan para vaciar las fosas sépticas. Esto debido a que la frecuencia de descarga es muy baja (12 años) y se considera innecesario invertir en una bomba para realizar esta operación.

Dado el interés del ingenio por el aprovechamiento del biogás como fuente de energía y la menor área necesaria, se considera al sistema con filtros anaerobios la opción que mejor se adapta a las necesidades del ingenio, desde un punto de vista técnico. Sin embargo, debe considerarse la evaluación económica antes de realizar una decisión final sobre ambos tipos de tratamiento. La evaluación económica puede consultarse en el módulo *“Análisis económico de la implementación de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en un ingenio azucarero, por medio de los métodos de valor presente neto y tasa interna de retorno, para el crecimiento de esta dentro de 15 años”*.

El diseño de los dos sistemas de tratamiento secundario se ve afectado por la calidad de la caracterización del afluente. Esta se obtuvo como resultado del trabajo de graduación *“Diseño del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico”*, en donde se calculó el caudal de entrada por el método de dotaciones y se consideró las reducciones en el mismo durante los tratamientos preliminar y primario. Estos cálculos presentan un error por no ser totalmente exactos y no basarse en mediciones directas del caudal. Variaciones entre el caudal real y el calculado ocasionan volúmenes diferentes en los equipos dimensionados, para un mismo tiempo de retención hidráulica. La concentración de DBO y DQO utilizada para el diseño fue supuesta y considerada igual a la medida en aguas residuales de tipo ordinario en otra empresa, debido a que no se realizó un análisis fisicoquímico de las aguas residuales que salen de los baños. Esto se supuso considerando que las condiciones de uso de los sanitarios en ambas instalaciones son similares. Esta suposición representa errores en el dimensionamiento de los equipos, pues variaciones significativas entre la concentración real de las aguas residuales del ingenio y las concentraciones supuestas generarían diferentes cargas volumétricas orgánicas en el equipo. Esto provocaría que el tiempo de retención hidráulica necesario fuera diferente y, por ende, el volumen. Por ello, se recomienda hacer mediciones exactas del caudal y determinar la

concentración de DBO y DQO de las aguas residuales, para comprobar que los equipos dimensionados cumplan con los parámetros de carga orgánica volumétrica. Al realizar estas mediciones, también se podría evaluar la construcción de equipos con un menor volumen nominal. La caracterización de la DQO también permitirá hacer mejores estimaciones de la producción de biogás.

Para el diseño de los filtros, se decidió dividir la operación en dos equipos en paralelo. Esto permitiría suspender la operación de uno de los filtros durante el mantenimiento, mientras el otro continúe en operación. Además, permitiría una mejor distribución del peso del material filtrante. El tiempo de retención hidráulica de los FAFA se determinó por medio de siete iteraciones, comprobando en cada uno que se cumplieran los parámetros de carga hidráulica y carga orgánica volumétrica teóricos. Las iteraciones se muestran en la Tabla 176. La altura seleccionada para cada sección de los filtros fue igual al máximo teórico, con el fin de que el sistema utilizara la menor área superficial posible. Por la misma razón, se decidió diseñar los filtros de forma cuadrada y no circular, aunque deben redondearse las esquinas de los filtros para facilitar la limpieza y evitar la acumulación de contaminantes. Para evitar el uso de espacio sobre el suelo y facilitar la alimentación de los tanques, se propone una construcción subterránea, la cual reduce la cabeza a desarrollar por la bomba de alimentación. Las dimensiones necesarias para los equipos se muestran en la Tabla 41. Con el tiempo de retención determinado de 17.5 horas, se calculó una eficiencia de remoción de DBO y DQO igual al 79.2%, por lo que se considera que los filtros anaeróbicos de flujo ascendente cumplen con el objetivo de la reducción de materia orgánica. Esta eficiencia podría variar, debido a que se calculó a partir de una ecuación empírica teórica, la cual se basa únicamente en el tiempo de retención, sin tomar en cuenta otros parámetros como la altura del lecho filtrante, temperatura de operación o tipo de empaque.

Para el material de empaque de los filtros, se evaluó el uso de anillos de Raschig de PVC con un diámetro nominal de 33.4 mm (1"). Estos pueden obtenerse al cortar tubería de dicho diámetro nominal en trozos con un largo igual al diámetro. Se realizaron mediciones experimentales para comprobar que el área de contacto aportada por el material cumpliera con las recomendaciones teóricas de  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Se determinó que el empaque tiene un área de  $112 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , por lo que el empaque de este diámetro cumple con este parámetro. Sin embargo, se estimó que son necesarios 455,916 metros de tubería para producir el empaque, el cual es un resultado excesivo y representaría altos costos para el ingenio. El alto resultado obtenido se debe al alto volumen de los FAFA, el cual es producto de un caudal de diseño significativamente alto. Por lo tanto, una mejor estimación de la cantidad de material de empaque necesaria y su costo puede obtenerse al hacer mediciones directas del caudal. Otra opción es utilizar anillos de Raschig con diámetros nominales mayores al propuesto, los cuales tendrían una menor densidad y requerimiento de material. Sin embargo, estos podrían no cumplir con el mínimo de área teórico. No se recomienda el uso de empaques con materiales diferentes al plástico, pues estos podrían ser más pesados o causar taponamientos.

Para el diseño de la laguna anaerobia de estabilización, la carga orgánica máxima permisible a la temperatura de diseño es de 350 g DBO/m<sup>3</sup>-d, valor que minimizaría el volumen del sistema. Sin embargo, el tiempo de retención hidráulica correspondiente a esta carga es de 1.04 días. Este valor es muy cercano al mínimo teórico de 1 día y alcanzaría menores tiempos de retención conforme se acumulen lodos y reduzca el volumen útil de la laguna. Por ello, se decidió establecer una menor carga orgánica que resultara en un mayor tiempo de retención. La carga orgánica establecida fue de 250 g DBO/m<sup>3</sup>-d, valor medio del rango teórico (100 a 400 g DBO/m<sup>3</sup>-d), la cual resultó en un tiempo de retención hidráulica de 1.45 días. La profundidad de líquido establecida fue igual al límite máximo teórico, con el fin de reducir el área superficial requerida. Las dimensiones de la laguna anaerobia de estabilización encontradas para estos parámetros se muestran en la Tabla 45. La eficiencia de remoción de DBO para la laguna fue del 70%, por lo que se considera que el equipo tiene una alta capacidad de reducción de materia orgánica. Esta eficiencia se calculó en función de la temperatura de diseño de 25 °C, obtenida como el promedio anual de temperaturas (Tabla 172). La eficiencia de remoción de DQO se supuso igual a un valor teórico del 40% y no se calculó en relación con otros parámetros del diseño, debido a la falta de correlaciones teóricas para este parámetro en lagunas anaerobias. Por ello, se considera un valor menos confiable, lo cual podría causar diferencias significativas entre las concentraciones de DQO reales del afluente y las estimadas, al igual que con la producción de biogás.

Ambos equipos propuestos para el tratamiento secundario cuentan con sobredimensionamientos que les permiten tratar flujos de entrada mayores al promedio esperado. Esto debido a que fueron dimensionados utilizando el caudal proyectado después de un crecimiento de 15 años. Adicional a esto, se añadió un bordo libre de 0.5 m a la laguna anaerobia de estabilización. Este es igual al recomendado de forma teórica y representa un sobredimensionamiento adicional para la laguna. Otra situación en la que existirán sobre flujos de entrada es durante el mantenimiento de los FAFA. Al detener la operación de uno de ellos para limpiarlo, el segundo filtro podría tratar el total del caudal de aguas negras. Al tratar el doble del caudal en un filtro el tiempo de retención hidráulica se reduciría a la mitad (8.75 horas), valor que se encuentra dentro del rango teórico recomendado. Sin embargo, las cargas orgánicas volumétricas del lecho filtrante y del FAFA se duplicarían, lo que podría ocasionar una reducción en la eficiencia del sistema.

Para el dimensionamiento de los equipos se consideran importantes las variaciones en las condiciones de operación, principalmente la temperatura. La temperatura de diseño utilizada para la PTAR fue de 25 °C, la cual es igual al promedio anual de la estación de Concepción, Escuintla (Tabla 172). Se recomienda comprobar que la temperatura del sitio de construcción coincida con la temperatura de diseño, pues valores menores podrían causar una menor eficiencia de remoción de materia y una menor producción de biogás. Por otra parte, temperaturas más altas podrían mejorar la eficiencia de remoción y aumentar la producción de biogás. Esto debido a que temperaturas cercanas a los 35 °C son más efectivas para la reducción de materia orgánica por acción de microorganismos

anaeróbicos. Sin embargo, temperaturas demasiado altas podrían ser perjudiciales al causar la muerte de estos. Las condiciones de temperatura y presión son también importantes en el volumen de biogás producido. Esto debido a que el volumen ocupado por el biogás producido aumenta con la temperatura y al reducir la presión. Por ello, el volumen de biogás presentado en la Tabla 44 y Tabla 47, el cual se calculó a 25 °C y 99,597 Pa, variará de acuerdo con las condiciones de operación reales.

La Figura 56 y la Figura 59 muestran los diagramas de bloques para ambas propuestas del tratamiento secundario. Estos permiten comunicar el balance de masa de las propuestas, incluyendo la generación de biogás y lodos estimada. Los diagramas de flujo mostrados en la Figura 57 y Figura 60 permiten entender la secuencia lógica a seguir en el tratamiento secundario y su relación con otras etapas de la planta de tratamiento de aguas residuales. Por último, la Figura 58, Figura 61 y Figura 62 muestran los diagramas de equipo de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente y de la laguna anaerobia de estabilización. Estos permiten comunicar las dimensiones determinadas para los equipos, así como los diámetros necesarios de tubería para su alimentación y descarga.

### C. Módulo 3: Diseño del sistema terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario

El método seleccionado para la remoción de nitrógeno en aguas residuales fue el de lodos activados, utilizando el arreglo de Ludzack - Ettinger modificado (MLE)<sup>98</sup> porque es un proceso que ahorra energía en la aireación pues al usar el nitrato para oxidar la demanda bioquímica de oxígeno de la entrada se reduce el requerimiento de oxígeno en la zona aerobia, reduciendo costos de operación.

Debido a que entre las propuestas del tratamiento secundario se encontraba ver el proceso más eficiente entre una laguna anaeróbica o un filtro anaeróbico de flujo ascendente; Se realizaron dos propuestas de sistema de remoción de nitrógeno adaptándose a los parámetros de salida de cada una de las opciones, y se compararon entre sí los sistemas, para determinar las razones de aumento o decremento en la eficiencia de la desnitrificación en los sistemas propuestos.

Durante el diseño del sistema posterior al filtro anaeróbico de flujo ascendente se observó que la tasa de desnitrificación no era la deseada, pues las cargas iniciales de DBO, DQO y sólidos suspendidos totales eran de 75, 119 y 42 g/m<sup>3</sup> respectivamente en comparación a la concentración de nitrógeno que se desea reducir de 94.16 gN/m<sup>3</sup>. La carga orgánica de la entrada no favorecía representativamente a la desnitrificación, ya que como se mencionó en el párrafo anterior el propósito de colocar la zona anóxica antes de la aireada es que la demanda química de oxígeno favorezca el ambiente de oxígeno controlado.

---

<sup>98</sup> Ver marco teórico sección proceso de lodos activados.

Otro factor relevante es la tasa de nitrificación obtenida, pues se tuvo una conversión del 99.46% de todo el amonio ingresado a nitratos lo que se considera altamente eficiente. Mientras que para el proceso de desnitrificación se logró una tasa de conversión del 54% durante las 3 horas de tratamiento, que es el tiempo máximo de retención en esta zona según la literatura. Teniendo como resultado un efluente teórico de 43.88 g/m<sup>3</sup> de nitrógeno total. Con un tamaño de 6.6 m x 6.6 m x 4.7 m y un tiempo de retención de 3h en la zona aireada, 6.6 m x 6.38 m x 4.7 m en la zona anóxica y un clarificador secundario de 10 m de diámetro y 5.30 m de profundidad.

Para hacer más eficiente el sistema se propuso realizar una mezcla desviando el 15% de aguas residuales de la salida del sedimentador primario hacia la entrada del tratamiento terciario, para aumentar la cantidad de carga contaminante y el porcentaje de remoción. Se tuvo un resultado de 63% de reducción de nitrógeno. Teniendo una concentración de nitrógeno en la salida de 35.08 g/m<sup>3</sup> (como se observa en la Tabla 56). Sin embargo, con esta opción tampoco se llegaba al parámetro requerido por el Acuerdo Gubernativo<sup>99</sup> que requiere que para el 2024 el caudal de salida de nitrógeno total en aguas residuales tenga una concentración de 20 g/m<sup>3</sup>. Debido a esto se optó por colocar el tratamiento sin la desviación de caudal ya que, a pesar de ser el mejor, por tener una concentración de salida menor, tiene varias desventajas como: el incurrir en un dimensionamiento de mayor cantidad de equipo y tubería al igual que un caudal de lodos a tratar mayor que con el volumen actual de diseño. Teniendo como consecuencia una producción de biogás menor al tener un caudal menor de entrada al tratamiento secundario, siendo una de las únicas posibles fuentes de ingresos o recuperación de inversión de la planta de tratamiento.

Se realizó una tercera comparación entre el diseño básico MLE y un sistema compuesto por una combinación de lodos activados y un producto probado a escala laboratorio. Tomando como base el porcentaje de remoción del 42 ± 9%, (del experimento realizado con el producto de marca comercial). Con un comportamiento de decremento de nitrógeno que tiende a ser lineal, se extendió la misma tasa de remoción a la del tiempo de retención del sistema que es de 210 h en los cuales teóricamente logran remover el 55 ± 9% del nitrógeno total del sistema. Llegando a la conclusión que, con este arreglo se lograría llegar al parámetro requerido de 20 gN/m<sup>3</sup>. Sin embargo, se sabe que al ser microorganismos su comportamiento global no posee una tendencia lineal pues eventualmente llegan al equilibrio y luego mueren. Por lo que se recomienda realizar un análisis de 210 h para determinar si efectivamente continúan la remoción de nitrógeno a la misma velocidad.

---

<sup>99</sup> Acuerdo Gubernativo 230-2006 “Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” capítulo V, artículo 20 consultar bibliografía.

Las mismas comparaciones se realizaron para el sistema de tratamiento terciario posterior a la laguna anaeróbica propuesta. En este sistema se observaron tasas de desnitrificación mayores, debido a que las cargas contaminantes del agua de salida de la laguna eran ligeramente mayores a las del filtro anaeróbico. En este caso las cargas de entrada al tratamiento terciario de DBO, DQO y SST eran de  $109 \text{ g/m}^3$ ,  $344 \text{ g/m}^3$  y  $37 \text{ g/m}^3$  respectivamente logrando un porcentaje de desnitrificación del 59% para tener una concentración final de  $38.81 \text{ g/m}^3$  de nitrógeno total en la salida. Cabe resaltar que las dimensiones de la zona aireada colocada después de la laguna anaeróbica son mayores a las de la zona aireada después del filtro como se puede observar en las tablas 7 y 8. El aumento en el área se debe a que tiene un tiempo de retención en la zona de aireación de 5 h, para poder lograr la conversión del 99.46% de nitrógeno a nitrato. Lo que demuestra que un pequeño aumento en la concentración de DBO y DQO inicial tiene un efecto en la eficiencia de desnitrificación. Pues esta tuvo un aumento del 5% en comparación con los parámetros de entrada y eficiencia del sistema después de FAFA<sup>100</sup>.

Los clarificadores secundarios poseen las mismas dimensiones tanto para el sistema aireado a las condiciones del filtro como para las de la laguna pues el dimensionamiento del sistema no depende de las concentraciones de entrada, solo del caudal y tiempo de sedimentación de sólidos. Como se observa en la memoria de cálculo en la sección 3 de anexos y en las tablas 53 y 54 de resultados. Para ejemplificar visualmente el diseño de los sistemas se realizaron planos en vistas de elevación y planta de todos los equipos del arreglo de lodos activados como se puede observar en el apartado 6 de resultados tanto para los equipos después de la laguna como para los equipos después del filtro, con el fin de demostrar la distribución de los aireadores en el sistema.

Al realizar la desviación del 15% del caudal del tratamiento primario para el diseño de lodos activados después de la laguna cubierta anaeróbica se obtuvo un porcentaje de remoción de nitrógeno del 69% y una concentración final de salida de  $29.62 \text{ gNt/m}^3$  (como se observa en la Tabla 57 Medidas y parámetros del sistema de lodos activados colocado después de la laguna de estabilización anaeróbica, con la propuesta de derivación del 15% del caudal del tratamiento primario). El volumen del tanque aumentó a pesar de seguir siendo el mismo caudal de entrada pues este requiere de 7 h de tiempo de retención para lograr el 99.46% de nitrificación. Finalmente, al tomar el sistema sin adición de caudal primario y agregarle la dosis calculada de 2.1 kg cada 8 días del producto Biozyme FS/AC, se obtiene una concentración teórica del efluente de  $17 \text{ gNt/m}^3$ . Empleando la misma tasa de remoción del 55% en el tiempo de retención global que para este sistema es de 212 h como se observa en la Tabla 59 de resultados.

---

<sup>100</sup> Filtro anaeróbico de flujo ascendente.

Luego de realizar todas las comparaciones descritas anteriormente se seleccionó el tratamiento recomendado para su implementación en la planta; el cual consiste en el tanque diseñado con el arreglo MLE sencillo. Se deben de verificar los costos de operación y mantenimiento de las opciones analizadas y decidir cuál es la que tiene mejor relación de costo beneficio para el proyecto. Al igual que realizar un análisis de aguas completo para determinar los parámetros del agua a tratar reales y así tener un diseño acertado para tomar la decisión correcta, ya que la desnitrificación se ve afectada por la concentración de DBO, DQO y SST de entrada al tratamiento.

Se redactó la memoria de cálculo del diseño de todos los sistemas, bombas, tubería, sistema de aire comprimido, dimensionamiento del soplador con el fin de poder replicar y afinar el diseño al tener los parámetros reales del agua residual. En base a esto y los análisis económicos de costo y beneficio determinar cuál de las propuestas es la más acorde.

Entre los objetivos de este trabajo se encontraba realizar una comparación entre la remoción del producto Biozyme FS/AC y la remoción teórica de nitrógeno total con un sistema de lodos activados con arreglo MLE. Para realizarlo se montó un experimento que consistió en medir cada 24 h la concentración de nitrógeno total en la muestra analizada. En este caso se observó un aumento en la concentración durante los primeros 3 días de análisis como se observa en la Figura 143. Luego un decremento durante los siguientes 2 días de análisis. Durante este ensayo no se pudo realizar la medición del último día debido a un aumento de temperatura a 80°C en la estufa en donde se encontraba el reactor (Figura 137). Por lo que se montó un nuevo análisis con otra muestra de la misma fosa séptica y las mismas características que la anterior, agregando  $0.0751 \text{ g} \pm 0.0001 \text{ g}$  del producto de marca comercial con una duración de 166 h como se observa en la Figura 140. Durante este nuevo ensayo se amplió el tiempo de análisis y se determinó que conforme va avanzando el tiempo, la remoción adquiere un comportamiento lineal llegando a un porcentaje global de remoción del  $42 \pm 9\%$ .

Entre las especificaciones del fabricante estaba que por cada día de análisis debía de agregarse una alícuota nueva de agua residual para mantener una cantidad considerable de alimento y evitar que las bacterias murieran. Sin embargo, el último día de análisis no se agregó agua adicional para evaluar el comportamiento del sistema y se observó una disminución en el decremento en la concentración de nitrógeno removido. Se recomienda realizar este análisis nuevamente, para determinar si la disminución del decremento de concentración de nitrógeno se dio por falta de agua residual nueva o fue debido al tiempo que tenían las bacterias en el sistema. Durante ambos análisis se observaron cambios físicos en el agua tales como: ligera formación de espuma, un cambio en la coloración del agua y crecimiento de algas en la parte superior y paredes del reactor, acompañados de un cambio en el olor.

Según lo discutido anteriormente se determinó que el tratamiento más eficiente es el de remoción natural de nitrógeno a base de aireación del agua utilizando el sistema de lodos activados con arreglo MLE. debido a que durante la prueba realizada se observaron cambios físicos en el agua no deseados, por lo que no se considera un buen único tratamiento de aguas en una planta, ya que si la agitación no

es la adecuada se puede incurrir en crecimiento de espuma y algas (Figura 139). Este producto es específico para reducción de concentración de nitrógeno no remueve otros contaminantes del agua, más que materia flotante (Figura 142).

#### D. Módulo 4: Diseño del sistema cuaternario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario

El presente trabajo tiene por objetivo realizar el diseño del tratamiento cuaternario para una planta de tratamiento anaeróbico para reducir la concentración de coliformes fecales presente en las aguas residuales de tipo ordinario de un ingenio azucarero, y cumplir con el parámetro establecido en el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236 -2006 “Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”. El objetivo se alcanzó al seleccionar un método desinfectante y al dimensionar los equipos necesarios para llevar a cabo la operación, tomando en cuenta que es necesaria una reducción del 97.4% de la concentración de coliformes fecales presentes. El reglamento indica que debe alcanzarse un valor de NMP/100 mL menor a 10000. Sin embargo, para el proyecto se planteó un valor objetivo de 9000, para tener un margen de seguridad, y no superar el límite establecido ante una mínima variación en las características de las aguas residuales. Esto corresponde a una reducción del 97.7 % de la concentración de coliformes fecales presentes. La concentración inicial de coliformes se estableció a partir de los datos proporcionados por la Tabla 211, página 453. Se realizó un promedio ponderado entre los valores medidos para tres fosas sépticas y se asumió que las 24 fosas restantes tendrían el mismo comportamiento. Las tres fosas seleccionadas contribuyen en un 29.4 % al caudal total.

Las alternativas que se evaluaron para realizar la inactivación de microorganismos fueron cloro gaseoso, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, dióxido de cloro, ozono, radiación UV y ácido peracético. Solo se tomaron en cuenta aspectos técnicos y operacionales para realizar la comparación, y se dejaron fuera los aspectos económicos, como inversión y el costo de operación. Los factores que se consideraron para poder comparar las alternativas fueron: mantenimiento, toxicidad al ser humano, complejidad del sistema, la formación de subproductos durante el proceso de desinfección, y la presencia de residuos en los efluentes del sistema. Se ponderaron con mayor valor los factores de toxicidad al ser humano y complejidad del sistema, ya que ambos se relacionan con la competencia que deben tener los operadores. Una de las prioridades establecidas fue diseñar un proceso simple que requiera el menor involucramiento de ingenieros y/u operadores, tomando en cuenta que la prioridad de un ingenio azucarero es la planta de producción y desean invertir la menor cantidad de recursos en un proceso dedicado al tratamiento de desechos. Manteniendo este criterio, el siguiente factor que se consideró fue el mantenimiento, seguido de la formación de subproductos y la presencia de residuos en el efluente (Ver Anexos, página 463). Si el contexto del diseño cambia, y se desea darle mayor importancia a la formación de subproductos por nuevas regulaciones, será necesario reevaluar la decisión.

De acuerdo al resultado proporcionado por la matriz se puede concluir que el ozono y el dióxido de cloro se vieron descartados por la complejidad que requiere su sistema. Ambos son químicos inestables que requieren de su producción en la misma planta de tratamiento para poder ser utilizados como desinfectantes. El cloro y el ácido peracético fueron descartados por los riesgos que presenta su uso. En la Tabla 18, página 60, observamos que el cloro posee un 4 en riesgos para la salud (rombo azul), lo que quiere decir que una exposición al químico puede ocasionar la muerte. El ácido peracético posee un 4 en el área de reactividad (rombo amarillo), lo que indica que puede explotar súbitamente debido al poder oxidante que posee. Esto implicaría una capacitación constante a los operadores para el manejo adecuado de estos químicos.

El hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio presentan un mayor número de ventajas técnicas y operacionales al comparar el valor obtenido en la matriz construida (ver Anexos, página 464) frente al resto de las alternativas, seguida por la radiación UV. La presencia de una concentración residual en el desinfectante se evaluó como una desventaja en la matriz, lo que ocasionó que la radiación UV sea vista como una mejor opción frente al hipoclorito. Sin embargo, esta concentración residual permite que la concentración de coliformes fecales alcanzada en los efluentes se mantenga, por lo que dicha ausencia en los sistemas de luz ultravioleta no puede asegurar que no exista una reparación por parte de los microorganismos y se dé un aumento en el número de coliformes. Es importante mencionar que al momento de evaluar factores económicos el uso de lámparas UV podría dejar de ser una opción viable. Se recomienda realizar una evaluación económica para los sistemas con mejor resultado en la matriz para poder tomar una mejor decisión.

El  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  se encuentra en estado sólido, mientras el  $\text{NaOCl}$  se encuentra en solución. Si se seleccionara el primero como el químico desinfectante, debería existir una sección en la PTAR que se dedique a preparar la solución, lo que añade un paso adicional en comparación a un sistema de  $\text{NaOCl}$ . Para evitar esto, se puede añadir directamente al agua en forma de pastilla; sin embargo, al momento de que exista una inconformidad con los parámetros de los efluentes, resulta más fácil variar el flujo proporcionado por una bomba dosificadora de líquidos, que determinar cuál sería el cambio adecuado en la dosis de pastillas. Otra desventaja que presenta el hipoclorito de calcio es en el tema de mantenimiento. Uno de los productos que se forman al reaccionar con el agua es hidróxido de calcio, el cuál es poco soluble, lo que formaría un sedimento en el tanque de desinfección.

Al comparar el recuento de coliformes fecales luego de un proceso de desinfección con hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio (Tabla 219 y Tabla 220, página 465 y 466) se observó que en las tres muestras, cada una con distinto tiempo de contacto, el hipoclorito de sodio presenta menor número de coliformes fecales frente a su similar tratada con hipoclorito de calcio. Esto se utilizó como un complemento para tomar la decisión final. La reducción porcentual determinada en la prueba a nivel laboratorio no se utilizó como un valor teórico en los cálculos para el diseño del reactor porque la cinética de reacción depende de factores como pH, concentración de nitrógeno y sólidos disueltos, los

cuales difieren con aquellos que tendría el agua al ingresar al sistema de desinfección luego del tratamiento diseñado en el módulo “Diseño del sistema terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario”.

Para el diseño del tanque de desinfección fue necesario establecer la ecuación cinética para las reacciones que suceden al añadir la solución de NaOCl al agua residual. No era posible determinarla a partir de datos experimentales porque no se contaba con agua que tuviera las características que tendría luego de haber pasado por un proceso para la reducción de nitrógeno. Por esta razón se tomó la expresión planteada y el valor de los parámetros cinéticos encontrados en el estudio de Haas & Karra (1984) para efluentes secundarios en tres PTAR de ciudades distintas. Los parámetros de pH y nitrógeno total que tendrá el sistema que se está diseñando (Tabla 212, página 453) se encuentran dentro del mismo rango de valores que los observados en las tres plantas del estudio (Tabla 24, página 108), mientras el valor del nitrógeno en forma de amonio se acerca a los valores presentados por una de las plantas del estudio. El valor Ct obtenido de 15.14 mg min/L se encuentra entre los valores mostrados en la Tabla 19, página 65, tomando en cuenta que habrá cloraminas en el proceso de desinfección, aunque su concentración sea reducida en comparación a la de cloro libre. Cada planta debe evaluar la cinética de reacción de sus aguas para establecer la ecuación y/o el valor de los parámetros cinéticos, por lo que se recomienda realizar pruebas con las aguas residuales que provienen del clarificador al momento de implementar el diseño.

Se determinó la concentración de cloro inicial necesaria a partir de distintos tiempos de contacto y los resultados se muestran en la Tabla 213, página 453. Entre menor es el tiempo de contacto, el volumen que deberá tener el tanque de desinfección disminuye, pero la concentración inicial de cloro requerida aumenta. Entre un tiempo de 15 min a 30 min, se logra reducir la concentración inicial de cloro en 0.719 mg/L y el volumen aumenta en 8.75 m<sup>3</sup>, pero de 30 min a 45 min únicamente se reduce en 0.239 mg/L con un aumento de volumen idéntico. Se optó por un tiempo de contacto de 30 minutos, considerando que era mejor reducir el consumo de cloro mensual que disminuir el material necesario para la construcción de un tanque más grande, y que la reducción en el consumo de cloro deja de parecer atractiva al aumentar el tiempo a 45 min. Para el dimensionamiento del tanque se utilizaron los factores que proporcionan Davis (2010) y Taylor, Carlston, & Karan, (2015) con el fin de reducir las ineficiencias hidrodinámicas del tanque. Se verificó que el número de dispersión fuera menor a 0.015 para evitar que este fenómeno afecte el desempeño de la desinfección.

El instalar una bomba peristáltica en lugar de una bomba de diafragma para la dosificación del químico desinfectante evita la instalación de un sistema de tubería más complejo. Se seleccionó el modelo E10VXA, de la marca Stenner®, que tiene la capacidad de bombear entre  $3.47 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/s (3.0 L/d) a  $3.24 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s (28 L/d) y cuenta con un potenciómetro que permite la variación manual de la dosis que se le añade al agua residual. Se verificó que los materiales con los que está fabricada la bomba

peristáltica sean compatibles con el hipoclorito de sodio y esto no afecte con la operación de los equipos (Ver Anexos, página 470).

Se determinó que la capacidad del tanque de almacenamiento debe ser de  $0.189 \text{ m}^3$  (50 galones). El material seleccionado para su fabricación es el HDPE porque, según White (2010), por debajo de los 3000 galones es el material compatible adecuado tomando en cuenta aspectos económicos. La compatibilidad del hipoclorito de sodio con el polímero seleccionado se verificó al consultar una tabla que muestra si el uso del HDPE es satisfactorio o no con distintos químicos (Ver Anexos, página 471). Se consultó la ASTM D 1998-2006, que contiene los estándares para tanques de almacenamiento construidos con polietileno. Sin embargo, el alcance del estándar es para tanques con una capacidad por arriba de los 500 galones, por lo que no fue posible utilizar una referencia para determinar las dimensiones adecuadas.

Partiendo de una solución de NaOCl comercial al 10%, la concentración inicial es 8.76 % de cloro activo, y alcanza un valor de 6.83% luego de 30 días de almacenamiento. Para el cálculo de la dosis de dosificación se utilizó un valor promedio para lograr una mejor estimación en cada uno de los días. Uno de los principales factores que aceleran la descomposición del hipoclorito es la radiación proveniente del sol, por lo que se decidió construir una pequeña caseta para su almacenamiento cerca del punto de mezcla con las aguas residuales. Dentro contará con una zona de contención, para evitar el esparcimiento del químico y correr el riesgo de que corroa algún material al momento de que exista alguna fuga. La descomposición del hipoclorito de sodio produce oxígeno molecular, lo que se traduce a un aumento en la cantidad de gas contenida en el tanque durante el tiempo de almacenamiento. Se decidió colocar un tubo abierto a la atmósfera para el venteo del tanque y evitar el aumento de la presión dentro de este.

El proceso de desinfección necesita una mezcla inicial rápida para mejorar la eficiencia del proceso, razón por la cual se seleccionó un mezclador estático. El agua residual será bombeada desde el tratamiento anterior, lo que le brinda turbulencia al flujo. Si no se tuviera un flujo turbulento sería necesario colocar un agitador mecánico a la entrada del tanque de contacto, pero no es el caso al tener un  $Re$  de  $1.24 \cdot 10^5$  en la tubería. A partir de la Figura 18, página 73, se seleccionó el mezclador tipo SMV ya que se desea realizar la mezcla de dos fluidos de baja viscosidad que son miscibles entre ellos. Se seleccionó el SMV por sobre las otras opciones que presenta la figura, porque es el mezclador que posee un menor valor de  $K_i T$ , lo que se traduce a una menor longitud para conseguir un mismo nivel de mezcla. Para los cálculos se buscó alcanzar un coeficiente de variación del 5%. Esto quiere decir que la razón entre la desviación estándar y el promedio de la concentración de hipoclorito a lo largo de la sección transversal de la tubería es igual a 0.05.

El transporte del fluido del tratamiento terciario al tanque de contacto se realizará con una bomba centrífuga. Para establecer la cabeza necesaria se realizó un balance de energía mecánica desde un punto A, que se tomó como la superficie del clarificador, hasta un punto B, que se consideró como la

salida del tanque de desinfección. La caída de presión se da por el cambio de altura entre los puntos seleccionados, la fricción por superficie que existe en la tubería y en el tanque de contacto, por expansión, por compresión y por los accesorios utilizados. En la curva característica el punto que corresponde a la operación según la cabeza necesaria y el caudal es menor a 1 hp, pero esta es la potencia mínima disponible para la bomba seleccionada. En el cálculo de la cabeza no se tomó en cuenta la caída de presión ocasionada por el cambio de dirección entre cada uno de los canales del tanque de desinfección, en donde ocurre una separación de la capa límite, lo que reduciría el sobredimensionamiento.

Debido a la poca complejidad que se le quiere dar al sistema no se consideró utilizar un medidor de cloro residual en línea y realizar un lazo de control para poder variar el flujo en respuesta a este. En su lugar se realizará el control de forma manual con una prueba colorimétrica y se regulará el flujo de entrada de la solución de hipoclorito de sodio en función de la concentración de cloro residual en los efluentes. En la Tabla 214, página 454, se observa el flujo que debe tener la bomba en respuesta a la medición realizada.

Si se desea alcanzar una concentración menor de coliformes fecales en el futuro, o cumplir con un reglamento más estricto, únicamente debe variarse la cantidad de cloro que debe alimentarse. Por ejemplo, en Italia se tiene el Decreto Legislativo 152-2006 “Norme in materia ambientale” que tiene como límite permisible de coliformes fecales en aguas residuales que se descargan hacia cuerpos receptores superficiales un valor de 5000 NMP/100 mL. Para cumplir con este valor sería necesaria una dosis de  $7.84 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$  (6.77L/d). En la Tabla 215, página 454, se resumen otros caudales de alimentación para otros valores de coliformes fecales.

## E. Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales.

Los procesos diseñados son una propuesta para dar tratamiento a los subproductos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales del ingenio y al mismo tiempo buscar su aprovechamiento a manera de generar utilidad.

En el caso del biogás, se analizó su viabilidad para generación de energía eléctrica o bien para usarlo en la cocina industrial como sustituto de GLP; para lo cual se caracterizó de acuerdo a los parámetros teóricos presentados en la Tabla 221 (pág. 476). Sabiendo que se producen 463.84 m<sup>3</sup>/día, se estableció que el contenido energético posible a utilizar es proveniente de la fracción de metano que posee y su respectiva capacidad calorífica, obteniendo así 412.80 MJ/h. Este flujo energético resultó ser bajo respecto al requerimiento de una microturbina marca Capstone, modelo CR30, la cual necesita un flujo de 457 MJ/h y opera con una eficiencia del 26% para obtener 30 kW de potencia, que fue considerada no suficiente para optar por esta alternativa ya que se estipula un mínimo de 0.5 MW para

compensar la inversión que se requiere para transportar esta energía a la red de distribución del ingenio. Se encontró otras turbinas con mayor salida de potencia; sin embargo, estas requieren mayor contenido energético del biogás, que es proporcional al flujo volumétrico del mismo; por lo que este proceso tendría posibilidad de implementación si aumentara la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, o bien, si se tuviera mayor carga orgánica en el agua residual tratada.

Se evaluó el requerimiento energético actual de la cocina industrial del ingenio, resultando en 0.32 kW al día, que se suple con el consumo de GLP (pág. 480). Este dato se considera muy bajo, al hacer la comparación con el consumo teórico por hogar, descrito por la literatura. Para el cálculo se utilizaron datos proporcionados por personal del ingenio, considerando que la mayoría de los operarios lleva comida preparada desde su casa por lo que la preparación de alimentos en la cocina industrial es baja. Aun así, conviene evaluar de forma exacta el consumo de este gas realizando mediciones experimentales en los equipos que lo utilizan.

Se realizó la propuesta de un proceso que permita usar el biogás como nuevo combustible (ver Figura 68, pág. 187), sin embargo es necesario que sea tratado previamente ya que la fracción de sulfuro de hidrógeno, aunque es mínima, representa un riesgo elevado debido a su toxicidad y es corrosivo para muchos de los equipos; por lo que se escogió el tratamiento químico con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  usando filtros desulfuradores y deshidratadores marca PUXIN, modelo 250L, los cuales tienen una eficiencia de remoción de  $\text{H}_2\text{S}$  por encima del 90% y además, eliminan el agua condensada para evitar que reaccione con otros compuestos de azufre que lleva el biogás y que no se formen compuestos ácidos. Otro aspecto ventajoso para la selección de estos equipos es que la regeneración del medio filtrante se da por una reacción con oxígeno que se puede lograr con la inyección de aire del ambiente y evitar gastos de operación por consumo de reactivos que brinden tal limpieza. Asimismo, el área requerida para su instalación es pequeña. Partiendo de la composición teórica del biogás, se encontró que posee 130.44 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  (ver pág. 481) a la salida del tratamiento secundario, sin embargo, luego de pasar por el filtro, disminuye a 13.04 ppm, convirtiéndolo así en un combustible apto para aplicaciones de cocina. Esta operación se da siguiendo una reacción química de oxidación y consume 0.090 kg de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  al día, asumiendo que todo el biogás producido se transporta hacia la cocina, en vistas de la posibilidad de aumento en el requerimiento energético actual si la cocina se equipara con más equipos. Dado que la regeneración del medio filtrante toma cierto tiempo, se decidió colocar 2 filtros en paralelo (ver Figura 68, pág. 187), a manera de operar alternamente y evitar detener el flujo de biogás hacia la cocina.

Aunado a los filtros, el proceso de manejo de biogás propuesto incluye la instalación de un gasómetro para su almacenamiento. Este sistema permite conservar la producción de biogás de 1 día, sin presurizarlo, por si en algún caso la cocina deja de requerir este combustible, evitando así su desecho inmediato. Como se visualiza en la Figura 68 (pág. 187) y Figura 69 (pág. 188), el gasómetro debe instalarse en paralelo a la línea de conducción de biogás para mantenerlo almacenado aun cuando el flujo siga dirigiéndose hacia la cocina, por lo que es necesario instalar un medidor de presión en el

gasómetro para monitorear el correcto almacenamiento y evitar riesgos por sobrepresión. Es importante resaltar que el gasómetro debe situarse antes del tratamiento químico y no con una conexión directa hacia otros procesos que requieran energía o hacia el quemador, ya que aunque el biogás excedente se quemara, debe removerse el H<sub>2</sub>S previamente para evitar la liberación de gases con contenido significativo de óxidos de azufre.

El balance de masa y energía de la Figura 68 (pág. 187) muestra que se tiene un flujo de 491.72 kg/día (462.53 m<sup>3</sup>/día) de biogás, a 3.12 kPa, que no se utiliza en la cocina industrial, lo que representa 114.34 kW potencia aprovechable en otros procesos con requerimiento energético que pueden ser aplicaciones térmicas como el secado del bagacillo de caña que se utiliza como combustible en calderas, precalentamiento del agua de calderas; o bien, aplicaciones eléctricas para equipos de bajo consumo como lo son los motores de las bombas requeridas en este proyecto. Es importante mencionar que estos procesos deben considerarse antes de pensar en quemar el biogás, ya que es energía disponible que no debe descartarse.

Ahora bien, cuando la tasa de consumo de biogás en las operaciones descritas sea menor a la tasa de producción, el exceso deberá descartarse. Para esto se ha incluido en la propuesta de diseño la instalación de un quemador, el cual deberá ser de tipo cerrado porque tiene una mayor eficiencia de combustión y libera gases sin mayor contenido de cenizas, además no se tendrá mayores riesgos de operación porque la llama no se expone. Es importante mencionar que este sistema no sirve únicamente como alivio cuando haya incremento de presión en la tubería, en el gasómetro, en los filtros desulfuradores/deshidratadores o incluso en el mismo digestor; sino también para evitar una mayor contaminación ambiental por liberación de metano, gas de efecto invernadero 23 veces más potente que el CO<sub>2</sub>.

También se requiere de la instalación de un regulador de presión, ya que este dispositivo permite asegurar el ingreso del biogás en los quemadores de los equipos de la cocina, a una presión entre 2.5 y 3.5 kPa, adecuada para el funcionamiento de estos. Respecto a la conducción, se plantea el uso de tubería PVC por ser un material resistente a la corrosión que pudiera darse por efecto del sulfuro de hidrógeno. Las distancias que deben cubrirse se detallan en la Figura 69 (pág. 188).

Se realizó el cálculo teórico del requerimiento energético en la cocina industrial, basado en el consumo mensual de GLP que tiene un hogar en Guatemala, descrito por (Kojima, 2011), a manera de obtener el consumo diario por persona y de acuerdo a la cantidad de operarios reportada por el ingenio para la zafra de 2017 (ver pág. 480) se obtuvo un valor de 97.53 kW que ya se considera más acertado al contrastar con el valor proveído por el ingenio. Esta energía puede suplirse con 394.52 m<sup>3</sup>/día de biogás (ver pág. 480), dejando así 69.32 m<sup>3</sup>/día aprovechable en otros procesos.

Referente a los lodos, las fuentes generadoras son constituidas por los tratamientos primario, secundario y terciario, con la caracterización teórica descrita en la Tabla 223 (pág. 478). Como se puede

ver en tal descripción, el contenido porcentual másico de sólidos secos totales es bastante bajo en contraste con el alto contenido de agua, por lo que se ha propuesto el diseño de patios de secado convencional con cama de arena y grava; contruidos de concreto, con un espesor de pared de 0.20 m. El mecanismo de secado se da por evaporación de agua y por lixiviación a través de las camas de arena y grava, sin embargo, para obtener una fracción másica de sólidos secos entre 30 y 40 % se debe permitir un tiempo de secado de por lo menos 15 días (Metcalf & Eddy Inc., 2003), en este caso, se establecieron 20 días de secado y 2 días de limpieza para remover los sólidos y lixiviados obtenidos, porque de esta forma se asegura llegar a la composición esperada.

Dado que el período de descarga de lodos de cada tratamiento varía, se optó por diseñar dos patios de secado, a manera de reducir el área requerida por los mismos. Teniendo entonces un patio mayor, en el que se pretende secar los lodos del tratamiento primario y del terciario, ya que estos tienen descargas cada 3 días y a diario, respectivamente, sumando un caudal máximo de 912.76 m<sup>3</sup>/día. A manera de tener un proceso continuo, se determinó que el patio debe estar seccionado en 22 celdas para cargar cada una de ellas en un día y que pueda transcurrir el tiempo de secado y de limpieza completamente sin añadirle mayor carga, hasta que el ciclo vuelva a iniciar cuando la celda esté vacía.

Según las dimensiones de cada celda del patio mayor, se tendrá un sobre diseño de 0.15 m de altura que solventa la sobre carga que pudiera darse por precipitación pluvial; ya que aunque el espesor del lecho de lodo se consideró de 1.00 m para el cálculo, bien es sabido que desde que se carga en la celda empezará el proceso de lixiviación y tal espesor sobre la cama de arena irá disminuyendo, dejando así mayor cantidad de espacio libre cada día.

De acuerdo al diagrama de la Figura 70 (pág. 189), el flujo de agua evaporada es 4.75 m<sup>3</sup>/día por cada celda, siendo proporcional a la energía recibida por exposición solar durante 12 horas al día (INCYT, 2016) (Meteocast, 2018). Estos datos teóricos de radiación solar han sido registrados como un promedio durante algunos años; sin embargo, habrá días en que se evapore mayor cantidad de agua que otros, resultando en una variable dependiente de las condiciones climáticas que se tengan, lo que podría implicar que para las épocas lluviosas o frías, la composición de sólidos secos disminuya y tenga que darse un mayor tiempo de secado o inducirlo con otras fuentes de calor.

Asimismo, se calculó que el porcentaje de lixiviados diarios es de 4.40% del total del agua que ingresa en los lodos, alcanzando así una composición de sólidos secos de 38.46% (m/m) en los 20.97 m<sup>3</sup> de lodo tratado al final de cada ciclo de secado por celda, que se encuentra dentro del rango teórico (Metcalf & Eddy Inc., 2003), lo que permite que los lodos sean fácilmente manejables como un sólido, por lo que su extracción de la celda es viable usando palas o maquinaria de similar mecanismo. El flujo de lixiviados es una aproximación tomada como constante para obtener la composición de sólidos secos teórica. Para obtener un dato real se requiere hacer mediciones experimentales de infiltración siguiendo metodologías de la mecánica de suelos, como la prueba de carga constante o la prueba de caída de carga; que se analizan de acuerdo a las propiedades de la arena y la grava utilizadas.

Debido a que los lodos del tratamiento secundario son descargados cada 30 días, incluirlos en el sistema anterior habría representado la expansión de este y la composición de sólidos secos al final del ciclo de secado habría aumentado. Se decidió diseñar un patio menor, a manera de reducir el área superficial requerida y tener un mejor control sobre los flujos. En este caso, se tiene un sobre diseño de 0.135 m para solventar sobrecarga por precipitación pluvial. Con la misma influencia de la radiación solar y porcentaje de lixiviación, en este patio se obtiene 3.36 m<sup>3</sup> de lodo con composición de sólidos secos de 57.52% (m/m). Este aumento se da porque la composición de entrada es más grande en relación a la composición de entrada de sólidos en el lodo del patio mayor; lo que facilita aún más la extracción de estos lodos usando palas o similares.

El diseño del patio mayor, como se observa en la Figura 73 (pág. 192), establece que en el fondo de cada celda debe estar ubicada longitudinalmente una tubería perforada de PVC, de 0.15 m de diámetro nominal, inclinada con una pendiente del 1% hacia el centro del patio y recubierta con geotextil permeable porque de esta forma se permite únicamente el paso de los lixiviados hacia una tubería central del mismo diámetro y misma inclinación con dirección hacia la parte posterior del patio, a manera de drenaje tipo francés, para luego extraer los lixiviados usando una bomba de vacío ya que la succión de los mismos es por lo menos de 1.50 m por debajo del nivel del suelo. En cuanto al patio menor, el principio del drenaje tipo francés se mantiene, pero con una sola tubería al estar conformado de una única celda.

Para el transporte de lodos de todos los tratamientos hacia su respectivo patio se seleccionó tubería de PVC, con las especificaciones detalladas en la Tabla 68 (pág. 193), y bombas de desplazamiento positivo de cavidad progresiva, con las especificaciones descritas en la Tabla 69 (pág. 193), puesto que el contenido de sólidos presente en los lodos podría generar abrasión y desgaste en el impulsor de una bomba centrífuga, si se utilizara esta; además, las bombas de cavidad progresiva permiten flujo controlado con pulsación mínima y operación sencilla.

Los lodos tratados y lixiviados obtenidos podrían emplearse como abono o acondicionadores de suelo y para fertirriego, porque teóricamente cumplen con los límites permisibles por la legislación guatemalteca en cuanto a composición de nutrientes para el suelo, lo que representaría un ahorro en costos por adquisición de fertilizantes, o bien, un ingreso por venta de abono. Sin embargo, deben analizarse las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas reales antes de destinarlos para este fin, puesto que, si poseen agentes contaminantes, se requiere de otros procesos físicos o químicos para continuar la reducción de los mismos, como el compostaje.

Si bien es cierto, el área requerida y el dimensionamiento de equipos para dar tratamiento al biogás (ver Figura 69, pág. 188) y a los lodos (ver Figura 72, pág. 191), es amplio, resulta necesario el diseño de estos sistemas para dar un manejo adecuado al mismo tiempo en que se tiene aprovechamiento de los subproductos que genera la digestión anaerobia.

## F. Módulo 6: Manual de operación y mantenimiento preventivo

El manual de operaciones y mantenimiento se realizó de acuerdo a la propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales en el ingenio azucarero. El objetivo principal es brindar un guía de cómo opera la planta de tratamiento, los equipos y estructuras propuestas en cada operación, acciones a tomar para el buen funcionamiento, mantenimiento necesario y medidas de seguridad.

El manual de operaciones posee una estructura cronológica de las operaciones y describe de forma concreta los tratamientos de la planta de aguas residuales con el fin de ser una guía para el operario encargado de la planta. Se dividió por los tratamientos principales y se realizó un diagrama de flujo para detallar el proceso. De igual forma se adjuntó una imagen para representación visual de los equipos a utilizar con el fin de que el operario tenga un concepto claro de la operación. Por último, se detalló las especificaciones técnicas más importantes de cada equipo o estructura.

Para el manual de mantenimiento se realizó un análisis de riesgo por cada operación, con el fin de proponer medidas de seguridad de ingeniería o equipo de protección personal para realizar el mantenimiento de forma segura. Los riesgos se definieron en base al diseño, ubicación de los equipos y el mantenimiento necesario.

El riesgo detectado en el diseño propuesto de tanques fue el de caída de personas a distinto nivel. Esto se debe a que los tanques fueron diseñados subterráneos y sin tapaderas. Para ellos se propuso implementar barandas de un metro de altura en el perímetro de los tanques del tratamiento primario, terciario y cuaternario. De igual forma, en la mayoría de las operaciones, el riesgo es el de caída o vuelco de la escalera portátil por puntos de apoyo inapropiados, esto se debe a que el mantenimiento propuesto consiste en ingresar al tanque y lavarlo por dentro, para ello el operario deberían de utilizar una escalera portátil, pero se corre el riesgo de que la escalera se resbale debido a los sedimentos en el fondo de los tanques. Por lo que se propone implementar escaleras fijas de servicio en cada tanque.

Para los riesgos evaluados se determinó el equipo de protección personal y se propuso la señalización adecuada para que el operador tome las medidas de seguridad necesarias o esté al tanto de las posibles consecuencias.

El riesgo valorizado como “alto” según la matriz de riesgo de William Fine, se debe a la probabilidad de ahogamiento en el tanque de reducción de nutrientes, por ser un tanque aireado de 4.7 m de profundidad. Se propone implementar un puente que atraviese el tanque y queda prohibido el paso de personal a menos que se deba realizar el mantenimiento. Dicho mantenimiento se debe realizar con una línea de vida para la seguridad del operario. Por otro lado, el riesgo valorizado como inaceptable es el de explosiones por posible creación de atmosfera explosiva dentro del gasómetro. Esto se debe a que

una explosión puede causar serios daños a las instalaciones y muerte de operarios. Para ello, se debe controlar la presión en la membrana y, de ser necesario, se debe aliviar presión por medio del quemador de gas.

Debido a que el material de construcción de los tanques es de concreto, estos tienen una vida útil prolongada y no requieren de mayor mantenimiento, a menos que ocurran temblores, por lo que se propuso realizar inspecciones mensuales y reparar tanques en caso de que haya grietas. De igual forma se propuso limpieza de los tanques cada 6 meses con el fin de prepararlos antes que inicie la zafra y limpiarlos después de que esta haya terminado.

A pesar de que el material de construcción de la trampa de grasa sea de obra gris y que la remoción de aceites y grasas sea diaria, esta debe limpiarse con agua a presión cada 3 meses. Esto se debe a que la acumulación de grasa en las paredes del tanque puede provocar malos olores.

Para la limpieza de los tanques se utilizará una pistola de agua a presión y se propuso que el agua utilizada sea tratada, porque lo será recirculada al tratamiento primario de la PTAR. De igual forma, para el retro-lavado del filtro anaerobio de flujo ascendente se utilizará el agua tratada por la PTAR con el fin de no utilizar agua limpia para dicha limpieza. De igual forma se propuso recircular el agua utilizada al tratamiento primario para no descargarla al drenaje y darle el tratamiento necesario.

En la segunda propuesta del tratamiento secundario, la limpieza de la laguna anaerobia se realizará una vez cada 12 años, por lo que se tercerizará. Dicha limpieza consiste en extraer los lodos mediante un camión cisterna. Se realizará esta tercerización debido a que no es recomendable adquirir una bomba que solo sería utilizada una vez cada 12 años y tampoco es recomendable que los operarios limpien manualmente la laguna por el riesgo de trabajo en espacios confinados.

Para la dosificación de hipoclorito de sodio al tanque de contacto, se realizará análisis de cloro residual libre como se menciona en el manual de mantenimiento y para regular la bomba se deberá realizar un cálculo matemático indicado en la ficha de dosificación de hipoclorito de sodio para asegurar una operación correcta.

Se realizó un plan de mantenimiento en donde se detalla las actividades a realizar, la frecuencia y la cantidad de operarios necesaria. Se observó que en donde se requiere una mayor cantidad de operarios es en la limpieza del patio de secado de lodos. Esto se debe a que las dimensiones de las celdas a limpiar son de 90 m de largo por 12 m de ancho, extrayendo de 20 a 21 m<sup>3</sup> al día. Se propuso tres operarios con el fin de reducir la exposición a movimientos repetitivos al utilizar una pala para remover los lodos. Debido a que esta operación se realiza a diario, es necesario dos operarios con jornadas laborales de 8 horas diarias y adicional, un operario que apoye únicamente en la extracción de lodos. Como se mencionó anteriormente, los operarios gozarán del sueldo mínimo y bono incentivo y quedará a

discreción del ingenio bonos adicionales, pago de las horas de labor del tercer operario en la extracción de lodos y la distribución de actividades dentro del ingenio que este último posea.

## G. Módulo 7: Análisis económico

El objetivo general del módulo consistió en analizar económicamente y financieramente la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales, para la producción de biogás y compost como elemento secundario, en un ingenio azucarero. Siendo así el primer objetivo específico estimar la inversión inicial de la implementación de la planta de tratamiento de aguas residuales, usando cotizaciones de diferentes proveedores de equipos requeridos en las diferentes fases de dicho tratamiento. Por lo que, por medio de la solicitud de requerimientos de todos los equipos, materiales, tubería y obra gris para cada tratamiento, se consolidó de la información desde la Tabla 239<sup>101</sup> a la Tabla 246. En estas tablas también se encuentra el precio por unidad de cada uno de estos y su proveedor. Por ejemplo, las bombas centrífugas de la Tabla 244<sup>102</sup> mencionan para qué tratamiento de la PTAR serán utilizadas, por lo tanto, podrán consultar a los diferentes módulos de tratamientos para complementar la información.

Luego de considerar todos los requerimientos, el segundo objetivo específico fue estimar los costos de funcionamiento y mantenimiento de la PTAR, analizando cada fase del tratamiento, haciendo énfasis en los gastos de energía, instalación, operación y mantenimiento. Los resultados obtenidos se encuentran en las Tabla 244,

Tabla 245, Tabla 246; en dónde se resumen los equipos que consumen energía a lo largo del proceso de una PTAR. Se observa que 15 equipos requieren una potencia de 29.20 kW, considerando que las bombas centrífugas funcionan 24 horas al día, y las bombas de desplazamiento positivo funcionan por intervalos dejando un total de utilización al día de 12.5 horas y, en el caso de los equipos de la tabla 3, estos tienen una utilización de 8 horas al día. El costo de energía en el ingenio azucarero es de Q0.31 por cada kWh. Sin embargo, este precio es variable, debido a que ellos son productores de energía en época de zafra, generando así un gasto en energía por la implementación de la PTAR de Q452,439.43<sup>103</sup>. En el caso de la mano de obra se requerirá un total de dos personas fijas para el cuidado

---

<sup>101</sup> Ver anexos págs. 339-342

<sup>102</sup> Ver anexos pág 341

<sup>103</sup> Ver detalle en pág 159

y operación de la PTAR. Estas dos personas estarán recibiendo un sueldo de Q12.00 la hora generando así un costo indirecto de Q104,952.19 anuales<sup>104</sup>. Se debe mencionar que para los costos de operación se utilizó el 6% <sup>105</sup> del total de la inversión por cada tratamiento.

Se obtuvieron los resultados de los componentes de inversión inicial por tratamiento. Para el caso del tratamiento secundario y terciario se plantearon dos opciones. El costo de la opción que consideraba el uso de lagunas era de Q13,000,000.00, mientras la opción que consideraba el uso de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) requería una inversión de Q11,000,000.00, aproximadamente, y con una alta eficiencia en remoción de materia orgánica. Tomando esto en cuenta, se obtuvieron los siguientes resultados de todos los tratamientos. El tratamiento preliminar y primario representa un 4% de la inversión total, teniendo este un total de Q516,340.34 distribuido en un 16% para materiales y tuberías, así como un 84% para la obra gris que este necesita. Se debe mencionar que el costo de obra gris se obtuvo por medio de una cotización en la pág 504, siendo este material concreto. Se escogió concreto debido a los fluidos que este tratamiento estaría utilizando diariamente. Luego, el tratamiento secundario representa un 15% de la inversión total. La mayor parte del costo se debe a que se estará utilizando como medio filtrante en el FAFA 75,987 tubos de 0.0254 m de diámetro nominal y 6 m largo, siendo esto 455,931 metros<sup>106</sup> de tubería, elevando así el costo de materiales y tubería.

El tratamiento terciario representa un 3% en los costos de la PTAR. Este utiliza los siguientes equipos: sopladores, difusores, agitadores y bombas centrífugas. El tratamiento cuaternario representa un 0.47% de toda la inversión inicial, esto se debe a que este tratamiento únicamente se dedica a tratar las aguas residuales por medio de hipoclorito de sodio al 10%<sup>107</sup> y kits de cloro<sup>108</sup> entre otros elementos, que pueden encontrar a detalle en el módulo del tratamiento cuaternario. Finalmente, el tratamiento de lodos y biogás representa un 78% de la inversión inicial que deriva en un costo en obra gris de Q6,763,136.64. Esto se debe al tamaño de construcción que requiere (23,920 m<sup>2</sup> de extensión). Consultar el módulo tratamiento de lodos y biogás para mayor detalle en tamaño de operaciones unitarias y equipos.

Además, para el tratamiento cuaternario las bombas solicitadas son marca *Netzsch*, sin embargo, por ser una marca estadounidense sin proveedores que vendan esa marca a nivel Guatemala, no fue posible conseguir la cotización. Por lo tanto, el precio de estas fue estimado con una bomba similar por

---

<sup>104</sup> Ver detalle en pág 159

<sup>105</sup> (Perry R. H., 1997)

<sup>106</sup> Consultar módulo tratamiento secundario.

<sup>107</sup> Ver anexo pág 350

<sup>108</sup> Ver anexo pág 346

medio de una cotización de una bomba utilizada en el ingenio azucarero. Sin embargo, se recomienda conseguir dicha cotización por la calidad de la marca y las propiedades de esta.

En la Tabla 98 se muestra la cantidad de m<sup>3</sup> que representa cada operación unitaria de la PTAR, también se muestra el monto de obra gris de toda la inversión en el proyecto. Se toma en cuenta toda la obra gris que necesitan las bombas, así como las tapaderas de los tanques, y las estructuras que llevan las tuberías de biogás desde la planta de tratamiento hasta la cocina industrial del ingenio azucarero, dando así un costo total de obra gris Q17,689,999.88. Se asume que el material a utilizar para la construcción es concreto y tiene un precio de Q940.89/m<sup>3</sup>, se debe mencionar que el costo de construcción en torno a los operarios se está asumiendo en el 6%<sup>109</sup>.

Luego de tener los costos consolidados de la inversión de toda la PTAR se procedió a analizar los tres escenarios de flujo de efectivo. Se tomo como supuesto lo siguiente: la inversión inicial es la misma en todos los escenarios, los trámites legales como permisos y licencias son el 0.5% de la inversión inicial, el movimiento de tierras es considerado como un 0.3% de la inversión inicial, el costo de operación (COP) es considerado como un 6% según lo menciona (Perry R. H., 1997) como costos misceláneos estimando que estos son el costo de mantener la planta, reparaciones, material de mantenimiento; se asumieron dos operarios fijos para la planta debido al mantenimiento y control de la planta; sin embargo, se debe mencionar que el rubro de mantenimiento especial representa un 0.25%, que incluye mantenimientos grandes que se deben hacer según la operación unitaria. Los imprevistos son considerados como un 5% en el primer año de tener montada la planta, luego al pasar de los años este porcentaje va disminuyendo en 1% debido a que los imprevistos suceden más al principio y después terminan siendo considerados como un COP. La energía considerada anualmente, fue definida en la Tabla 89, se explicará en cada escenario como fue obtenido el ingreso para recuperación de la inversión inicial.

El primer escenario consta de un flujo de efectivo de inversión teniendo como único ingreso el ahorro de la sanción del incumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006. Esta sanción se encuentra entre Q5,000.00 a Q100,000.00 dependiendo de la sentencia de un juez. Por lo tanto, se asumió un valor intermedio de Q50,000.00.

Luego del análisis, se observó que no existe una TIR, debido a que esta inversión es considerada un costo sepultado. Se denominan sepultados cuando la inversión corresponde a una obligación de pago que se debe pagar a futuro (Chain, 2008). Por lo tanto se puede concluir que en el escenario 1, llamado “pesimista”, cuando el ingreso o beneficio es únicamente el ahorro en la sanción por incumplimiento

---

<sup>109</sup> (Perry R. H., 1997)

del Acuerdo Gubernativo 236-2006, se consideraría como un gasto para el ingenio. Sin embargo, este es necesario para evitar problemas a futuro.

Para el escenario 2, llamado “más probable”, se analizó la cantidad de gas propano<sup>110</sup> que utiliza la cocina industrial del ingenio azucarero, comparando con la producción de biogás diaria. El biogás tiene un poder calorífico de 6 kWh/kg<sup>111</sup>, y la producción diaria es de 463.8 m<sup>3</sup>/día, considerando una densidad del biogás de 1.2 kg/m<sup>3</sup><sup>112</sup> se obtiene una producción de poder energético 7.2 kWh/m<sup>3</sup> de biogás. Luego de multiplicar la cantidad de producción diaria y su poder energético, se obtiene 3,339.36 kWh/día, generando así 100,180.8 kWh/mes. Por lo tanto, se comparó el consumo de gas propano, que posee un poder calorífico de 12 kWh/kg, en la cocina industrial del ingenio, considerando que consumen 9085 litros (2,400 gal) al mes y se obtuvo un resultado de consumo energético de 217.08 kWh/mes. En conclusión, se cumple con la demanda del mes de gas propano consumido, con un exceso de 99,962 kWh/mes. Sin embargo, la potencia generada de 138 kW al mes no es la suficiente para poder montar una planta generadora de energía bioenergética, pero se ahorraría el consumo de gas propano anual (Q347,040.00).

Se planteó otro escenario “más probable”, pero considerando como ingreso la producción de compost como producto secundario. La producción diaria de compost se encuentra en un rango de 20 a 21 m<sup>3</sup> considerando una densidad del compost de 700 kg/m<sup>3</sup> (Gordillo) produciendo al día 147,000 kg de compost. Según (autor, Anacafe, s.f.) el precio de producir un quintal de compost es de Q17.00 y la venta de un costal de 100 libras tiene un precio de mercado de Q55.00 (autor, Fertilizantes Orgánicos, Bio - Cofya, s.f.). Se calculó que en la producción de compost mencionado anteriormente se producen 529,200 quintales anuales, generando así 1,166,686.29 empaques de 100 lbs, que equivale a Q6,416,774.60 en ventas de compost anuales, suponiendo el precio de venta de Q55.00 por bolsa. El compost que se estará creando cumple con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236-2006, por lo tanto, se afirma que se puede vender dicho producto.

Se debe mencionar que la producción de compost implica un aumento en costos de producción, trámites (licencia sanitaria para la producción de compost) y el porcentaje de imprevistos se va reduciendo año con año un 5% debido a la eficiencia operativa que este proceso productivo pueda llegar a tener.

Para los flujos de efectivo, se utilizó como tasa de interés el 13.16%<sup>113</sup> debido a que se asumió que la inversión será realizada por medio de un préstamo bancario. Se consultó al ingenio azucarero el valor

---

<sup>110</sup> Ver anexos 349

<sup>111</sup> Dato teórico, cálculos tratamiento de lodos.

<sup>112</sup> (Varnero, 2011)

<sup>113</sup> Tasa activa de interés de préstamos (BanGuat, 2015)

de la TMAR (Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento); sin embargo, no supieron contestar, ya que todos desconocían dicho valor. Luego de realizar los tres escenarios con los diferentes ingresos, se observó que los escenarios que incluyen la producción y venta de compost pueden llegar a ser rentables si se llegan a colocar como una marca excelente en la producción de compost. La TIR de los escenarios que incluyen compost se encuentra en 6% y 4%. Se puede observar en las páginas 515, 516 que los flujos de efectivo muestran una tendencia positiva; por lo tanto, se debería de revisar el proyecto a más años de proyección.

Finalmente, luego de determinar todos los costos de inversión, mantenimiento, imprevistos, mano de obra, materiales y obra gris; y encontrar la relación de ingresos de los productos secundarios de la PTAR, se llega al análisis de prefactibilidad. Se debe mencionar que toda la planta fue considerada con un crecimiento de 1% a nivel población del ingenio azucarero, por lo que el FODA y PESTEL mostrados en el apartado de resultados están adaptados a dicho crecimiento, así como los dimensionamientos de las operaciones unitarias y el caudal que estará entrando a la PTAR. Los análisis realizados nos muestran todas las posibles estrategias que se deberían de tomar dependiendo la situación que esté ocurriendo al momento de optar por la producción de compost.



## IX. CONCLUSIONES

- Se calculó el caudal promedio actual de aguas residuales generadas por las 27 baterías de baños por el Método por Dotación y de Hunter, como 0.0167 y 0.0158 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.
- Se determinó un caudal futuro promedio de aguas residuales en tiempo de zafra para el diseño de la PTAR por el Método por Dotación, tomando en cuenta el crecimiento del personal laborando dentro de la planta de producción (1%) para los siguientes 15 años, siendo este 0.01942 m<sup>3</sup>/s.
- La propuesta de los tratamientos preliminar y primario consiste en la remoción del 92% de aceites y grasas en un tanque de separación de aceites y grasas, la totalidad de sólidos flotantes en un canal de cribado, la medición del caudal instantáneo en un canal Parshall, la homogeneización del caudal en tanques cilíndricos en paralelo y una sedimentación primaria en tanques rectangulares en paralelo con descarga de lodos.
- La remoción neta de los tratamientos preliminar y primario propuesto para la PTAR del ingenio azucarero es del 49% de SST, 42% de la DBO y 36% de la DQO.
- En el estudio topográfico realizado, se corroboró la ubicación para la PTAR propuesta como el área al sur de la planta de producción, cuyas curvas de nivel son mínimas y facilitan el transporte por gravedad hacia la PTAR.
- Los diagramas realizados permiten un análisis cualitativo y cuantitativo gracias a la visualización de la distribución y equipos de los tratamientos preliminar y primario.
- Se dimensionó dos filtros anaeróbicos de flujo ascendente para la reducción de materia prima en las aguas residuales, con dimensiones de 11.7 m x 11.7 m x 5.4 m, tiempo de retención de 17.5 horas y eficiencia de 79.2% en la remoción de DBO.
- Se dimensionó una laguna anaerobia rectangular de estabilización para la reducción de materia orgánica en las aguas residuales, con un área de 756 m<sup>2</sup>, profundidad de 5.5 m, tiempo de retención de 1.04 días y eficiencia del 70% en la remoción de DBO.

- De acuerdo con los cálculos, el tratamiento de aguas residuales con Filtros Anaeróbicos de Flujo Ascendente tiene como ventajas una menor área de superficie ( $274 \text{ m}^2$ ), una mayor reducción de materia orgánica (eficiencia del 79.2%) y una mayor producción de biogás ( $464 \text{ m}^3/\text{d}$ ), respecto a la laguna anaerobia de estabilización.
- De acuerdo con los cálculos, el tratamiento de aguas residuales con una laguna anaerobia de estabilización tiene como ventaja una menor producción de lodos ( $58.4 \text{ m}^3/\text{a}$ ) y una menor frecuencia de descarga de estos (12 años), respecto a los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.
- La propuesta para el tratamiento secundario es el sistema de filtros anaeróbicos de flujo ascendente, por tener una mayor producción de biogás ( $464 \text{ m}^3/\text{d}$ ) y un menor requerimiento de área ( $274 \text{ m}^2$ ) en comparación con la laguna anaerobia de estabilización ( $209 \text{ m}^3/\text{d}$  de biogás y  $756 \text{ m}^2$  de área), las cuales son las características de mayor valor para el ingenio.
- Se realizó diagramas de bloques, de flujo y de equipo que permiten comunicar el balance de masa, la secuencia lógica del proceso y las dimensiones necesarias para la construcción de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente y de la laguna anaerobia de estabilización, utilizando datos de los balances de masa.
- La concentración de entrada de DBO ( $75\text{g}/\text{m}^3$ ), DQO ( $119\text{g}/\text{m}^3$ ), así como la relación entre ellas, afecta la tasa de desnitrificación en el sistema (54%). A mayores concentraciones de DBO ( $109 \text{ g}/\text{m}^3$ ) y DQO ( $344 \text{ g}/\text{m}^3$ ) mayor tasa de remoción de nitratos en la zona anóxica del sistema (59%). Lo que incide en mayores tiempos de retención en la zona aireada para alcanzar el mismo porcentaje de conversión de amonio a nitratos.
- El tratamiento de lodos activados en arreglo MLE, tiene una eficiencia mayor<sup>114</sup> de remoción mientras que el tratamiento agregando  $0.0751\text{g}\pm 0.0001\text{g}$  bacterias/enzimas tiene una eficiencia del  $42\pm 9\%$  por lo que el sistema de lodos activados es un 5% más eficiente, que el tratamiento realizado agregando el producto de marca comercial.

---

<sup>114</sup> 54% para el sistema colocado después del filtro anaeróbico de flujo ascendente y de 59% para el sistema colocado después de la laguna anaeróbica de estabilización.

- Debido a que no se conocen los parámetros reales de las concentraciones en el agua residual se realizó la memoria de cálculo para poder replicar los cálculos y ajustarlos a las condiciones reales del sistema.
- Se realizaron 3 esquemas con vista en planta y elevación de los equipos de los sistemas de lodos activados colocados después de FAFA, y laguna anaeróbica de estabilización y clarificador secundario, para complementar la explicación de la distribución del sistema, ya que incluye la ubicación de las zonas aeróbica, anaeróbica y flechas de dirección de flujo.
- Se realizó el balance de masa de los sistemas de lodos activados propuestos teniendo como resultado un efluente de salida de 612.04 m<sup>3</sup>/d hacia desinfección, con una concentración final de nitrógeno total de 43.88 g/m<sup>3</sup>, para el sistema colocado después de un filtro anaeróbico de flujo ascendente; y un caudal de salida de 616.83 m<sup>3</sup>/d hacia desinfección para el sistema colocado después de una laguna anaeróbica de estabilización con una concentración de salida de 38.81g/m<sup>3</sup>.
- Se seleccionó el hipoclorito de sodio (NaOCl) como el químico desinfectante para la reducción de coliformes fecales presentes en las aguas residuales de tipo ordinario al tener el mayor número de ventajas técnicas y operacionales, según el resultado obtenido por la matriz construida.
- Se desarrolló una memoria de cálculo en la que se detallan los cálculos realizados para el dimensionamiento de los equipos que conforman el sistema de desinfección propuesto.
- El tanque de desinfección diseñado es de 2.20 m de alto, 3.35 m de largo, y 5.65 m de ancho, y posee un tiempo de contacto de 41.41 min.
- Se requiere de una bomba peristáltica capaz de dosificar 6.36\*10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/s de la solución de hipoclorito de sodio para lograr la concentración inicial de cloro libre requerida.
- Es necesario instalar un mezclador estático tipo SMV de 0.80 m de largo y 0.1016 m (4") de diámetro para alcanzar el nivel de homogeneidad necesario para la inactivación de coliformes deseada.
- Para el almacenamiento del hipoclorito de sodio se utilizará un tanque de HDPE con capacidad de 0.189 m<sup>3</sup>.

- El transporte del fluido desde el tratamiento anterior al tanque de contacto se logrará con una bomba centrífuga con la capacidad de operar con un caudal de 25.5 m<sup>3</sup>/h y superar una cabeza de 4.04 m.
- El flujo de biogás de 463.84 m<sup>3</sup>/día, obtenido por digestión anaerobia, se considera escaso para la generación de energía eléctrica que pueda conectarse a la red de distribución del ingenio, puesto que tiene la capacidad de producir 30 kW únicamente, lo cual se mantiene muy por debajo del mínimo aceptable de 0.5 MW.
- Según el balance de masa y energía del proceso propuesto para manejo de biogás, con un flujo de 1.39 kg/día (1.31 m<sup>3</sup>/día), se puede suplir los 0.32 kW que requiere la cocina industrial actualmente, dato proveído por el ingenio; sustituyendo de esta manera el uso de GLP y dejando un flujo de 490.33 kg/día (462.53 m<sup>3</sup>/día) disponible para aprovechar en otros procesos con requerimiento energético.
- Los equipos y sistemas auxiliares para el manejo de biogás son un gasómetro de doble membrana de 500 m<sup>3</sup> de capacidad, filtros desulfuradores y deshidratadores con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como medio filtrante, un quemador de tipo cerrado y tubería de PVC; para un flujo de 463.84 m<sup>3</sup>/día.
- Según el balance de masa y energía para el tratamiento de lodos primarios y terciarios, se obtiene un flujo de 24,065.31 kg/día de lodos tratados, con una composición de 38.46% (m/m) de sólidos secos totales; 94,744.40 kg/día de agua evaporada y 794,101.42 kg/día de agua lixiviada.
- Según el balance de masa y energía para el tratamiento de lodos secundarios, se obtiene un flujo de 184.97 kg/día de lodos tratados, con una composición de 57.52% (m/m) de sólidos secos totales; 263.18 kg/día de agua evaporada y 2211.62 kg/día de agua lixiviada.
- La extracción y transporte de lodos desde los distintos tratamientos hacia el patio de secado, se realiza con 4 bombas de desplazamiento positivo de cavidad progresiva, de 0.88 a 1.76 kW de potencia requerida por el motor, y su conducción por 533 m totales de tubería de PVC.
- La extracción de lodos tratados debe ser usando palas, mientras la extracción de lixiviados es con un sistema de drenaje tipo francés y succión con bombas de vacío de 0.46 y 1.05 kW de potencia requerida por el motor, y su conducción por 161 m totales de tubería de PVC.
- El manual de operaciones muestra una representación gráfica de la planta de tratamiento de aguas residuales. Se muestran las principales operaciones de forma cronológica y se detalla el tiempo de funcionamiento por operación y global de planta de tratamiento de aguas residuales

- El manual de operaciones contiene un diagrama de flujo por cada tratamiento para representación visual de los equipos utilizados. De igual forma, contiene las operaciones descritas a detalle, estructuras y dimensionamientos necesarios, estos se presentan con lenguaje simple para lograr transmitir la información y que sea una herramienta funcional para el operario.
- Se realizó un análisis de riesgos para cada operación y se propuso el equipo de protección personal indicado en el Acuerdo Gubernativo 229 – 2014 “Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional”.
- El operario responsable del mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales debe presentar una condición física saludable debido a las actividades de limpieza que debe realizar a diario. De igual forma las competencias con mayor importancia son responsabilidad, trabajo en equipo, organización y disciplina.
- Se realizó un manual de operaciones y mantenimiento preventivo con diagrama de operaciones y de flujo en cada etapa de la planta de tratamiento de aguas residuales. De igual forma, se describió las operaciones y el mantenimiento necesario que será una guía para la persona encargada del mantenimiento de la planta, tomando en cuenta la seguridad laboral para el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 229 – 2014 “Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional”.
- El tratamiento de manejo de lodos y biogás representa un 78% de la inversión total, eso se debe al alto costo de obra gris implicada en dicho tratamiento (el componente de inversión de obra gris representa un 69% de todos los costos de la PTAR), siendo así las operaciones unitarias que representan un 80% del componente de inversión de obra gris son los siguientes: celdas para secado de lodos, sedimentador primario y el filtro anaerobio de flujo ascendente.
- Los costos de energía de la PTAR son aproximados por la utilización de los equipos que requieren energía durante el día, con un costo de energía Q0.31 kWh en el ingenio azucarero, se obtuvo un total de Q432,439.43 anuales.
- Para el escenario optimista con una TIR del 7%, comparando con la TMAR del 13%, el proyecto no es rentable, sin embargo, se observó que la tendencia en el flujo de efectivo es positiva desde el año dos. Si el proyecto se analiza a 25 años se podrá determinar de manera certera la rentabilidad del proyecto, incluyendo la nueva fuente de ingreso que es la comercialización del compost y la utilización de biogás para la cocina industrial del ingenio azucarero.

- El porcentaje de imprevistos del escenario 1 “pesimista”, fue definido como un 5% de los costos de operación, reduciéndose en un 1% anual hasta que en el año 5 este será considerado un costo de operación, dejando así un gasto fijo en la operación de la planta. Sin embargo, el VAN sigue siendo negativo lo cual nos indica que el proyecto no es rentable en 15 años.
- El porcentaje de imprevistos de los escenarios “más probable” y “optimista” fue considerado un 5% de los costos de operación, sin embargo, en estos escenarios se redujo en un 5% el valor de este imprevisto año con año debido a lo que implica cada escenario, producción de biogás o la comercialización del compost.
- Los análisis FODA, PESTEL y 5 fuerzas de Porter muestran de manera global, el proyecto de la implementación de una PTAR en un ingenio azucarero, analizando como este proyecto afectaría o beneficiaría en todos los ámbitos, así como el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006 y la producción de productos secundarios como biogás y la venta, producción del compost.
- La producción de biogás de 3,339 kWh al día no llega a ser la suficiente como para crear una planta generadora de energía la cual debería tener una producción de 0.5 MW, pero si para cubrir la demanda mensual de gas propano en la cocina industrial del ingenio azucarero.

## X. RECOMENDACIONES

- Se requiere de un análisis de caudal de 24 horas para confirmar que los métodos brindan resultados consistentes. De esta forma, se puede aplicar el método de cálculo con seguridad a las 27 baterías y dimensionar los tratamientos a partir de ese flujo.
- Se recomienda realizar mediciones de caudal para los aparatos sanitarios como las duchas, lavamanos y mingitorios en diferentes días y por diferentes encargados, así también se debería de llevar un registro del tiempo de uso de por visita, para obtener información representativa acerca del consumo de agua.
- Se debe hacer un análisis de la composición de aceites y grasas en los efluentes que provienen de lavatrastos y pilas para determinar las propiedades de los glóbulos de aceite. Estos valores permiten realizar una mejor propuesta del tanque de separación por flotación.
- Se recomienda colocar una malla, como la descrita en la Tabla 13 página 46 en los resultados, en la descarga de los servicios sanitarios hacia la fosa para establecer qué fracción másica del efluente está compuesto por sólidos flotantes.
- Para mejorar la propuesta de los tanques de homogeneización, se recomienda realizar un conteo de visitas a los accesorios sanitarios detallado por 24 horas durante 8 días para las fosas sépticas con mayor aporte de caudal. De esta forma se toma en consideración los volúmenes máximos de agua residuales generada por estas fosas y se calcula un tanque con una capacidad para manejar las fluctuaciones ocasionadas por el cambio de turno laboral.
- Como parte de la construcción de cada etapa, se recomienda colocar techo en el sedimentador primario abierto a la atmósfera con el propósito de que el agua pluvial no se filtre en el proceso. El funcionamiento y la capacidad únicamente considera las propiedades y caudal promedio del agua residual tipo ordinario.
- Hacer una caracterización de las aguas residuales a la salida de los servicios sanitarios, para comprobar que los parámetros de DBO y DQO coincidan con los supuestos en el diseño del tratamiento secundario.
- Hacer una medición de los caudales de salida de los sanitarios y, en el caso de encontrar una variación significativa con el caudal de entrada estimado, volver a realizar el

dimensionamiento de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente y de la Laguna anaerobia de estabilización.

- Utilizar anillos Raschig de PVC con un diámetro nominal de 33.4 mm (1") como medio filtrante en los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente, pues otros materiales podrían ser muy pesados y causar taponamientos.
- Hacer una evaluación estructural de la losa perforada utilizada para separar el fondo del tanque y soportar el material empacado en los filtros anaeróbicos de flujo ascendente.
- Dada la baja frecuencia de descarga de lodos para la laguna anaerobia de estabilización, se recomienda hacer la descarga de los estos utilizando las pipas que se utilizan actualmente para el vaciado de las fosas sépticas, para así evitar el costo de una bomba de desplazamiento positivo.
- Para requerir de una excavación de menor profundidad para la laguna anaerobia de estabilización, se recomienda su construcción a un nivel de 1.5 m sobre el suelo, utilizando para ello bancos formados con la tierra obtenida durante la excavación.
- Se recomienda determinar la DQO y DBO de las aguas negras para poder tener una mejor estimación de la producción diaria de biogás esperada con cada uno de los sistemas de tratamiento secundario.
- Evaluar la posibilidad de colocar el tanque de aireación previo al biodigestor para tener una mayor carga orgánica de entrada y lograr la remoción de nitrógeno hasta 20 g/m<sup>3</sup>.
- Realizar mediciones de la concentración de nitrógeno de efluente real y aplicar las bacterias facultativas en el sistema de lodos activados.
- Realizar una caracterización detallada del agua residual de entrada a la planta para corregir todos los parámetros de diseño a las características reales de la misma. Para tener un diseño y una aproximación real de la concentración de nitrógeno de salida del agua, los lodos y su tiempo real de sedimentación. Especialmente un análisis de nitrógeno total de Kjeldahl.
- Determinar la elevación real del terreno donde se colocará el equipo y corregir los cálculos según la elevación obtenida.

- Evaluar la posibilidad de automatizar el sistema de extracción y recirculación de lodos empleando una válvula automática de tres vías y un sensor de interfase para que la extracción y separación de la recirculación no incurra en un aumento de personal en la planta de tratamiento de aguas.
- Evaluar la opción de utilizar las pendientes del terreno para prescindir de las bombas en los diferentes tramos de conducción de agua de un equipo al otro.
- Verificar todos los cálculos realizados previo a su instalación, pues los parámetros de diseño empleados son valores teóricos y deben ser sustituidos por los valores experimentales obtenidos en la memoria de cálculo.
- Realizar nuevamente análisis de riesgos cuando la planta de tratamiento de aguas se ponga en marcha, con el fin de definir mantenimiento correctivo y detallar a profundidad los riesgos por cada operación.
- Cuando la planta de tratamiento de aguas residuales ya esté instalada, capturar imágenes de los tanques y equipos utilizados en cada operación para actualizar las imágenes del manual de operaciones.
- Realizar estudio de tiempos para las operaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales al igual que en las operaciones de mantenimiento, cuando la planta se ponga en marcha.
- Evaluar económicamente las alternativas con mayor número de ventajas técnicas y operacionales para tener un mejor criterio de selección y aumentar la posibilidad de implementación.
- Tener acceso y control para medir periódicamente la concentración de coliformes fecales en todas las fosas sépticas para obtener la fracción de inactivación real del proceso propuesto y evitar este problema en un futuro.
- Realizar pruebas experimentales para medir el cambio de la concentración de cloro residual a lo largo del tiempo en el tanque de contacto, para obtener una ecuación cinética real y propia del sistema, cuando este ya esté en operación.

- Determinar el rango de remoción de coliformes en los equipos que forman parte del sistema propuesto usando los valores reales de concentración de coliformes fecales.
- Utilizar el biogás en exceso que no se destina hacia la cocina industrial, para aplicaciones térmicas como secado de bagacillo usado en calderas, precalentamiento de agua de calderas, o aplicaciones eléctricas como accionamiento de los motores de las bombas requeridas en este proyecto.
- Evaluar la viabilidad de un aumento de eficiencia en el tratamiento secundario, o bien, la posibilidad de mezclar las aguas residuales con excremento de ganado para aumentar la carga orgánica a tratar y a la vez incrementar el flujo de biogás producido a manera de destinarlo para la generación de energía eléctrica que se conecte a la red de distribución del ingenio.
- Realizar mediciones periódicas del nivel de la cama de arena en cada celda luego de extraer los lodos tratados, para reponer lo que se ha removido durante esta operación.
- Calcular experimentalmente usando métodos de la mecánica de suelos, como la prueba de carga constante o la prueba de caída de carga, la infiltración real que tiene la arena y la grava utilizadas en los patios de secado.
- Caracterizar los lodos tratados y los lixiviados obtenidos, para asegurar que cumplan los parámetros establecidos en el artículo 42 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, y usarlos como abono, acondicionadores de suelo o para fertirriego.
- Realizar un análisis de aguas residuales para determinar los límites permisibles de contaminación en las aguas residuales para poder determinar la gravedad económica de la sanción por incumplimiento del Acuerdo Gubernativo no. 236-2006.
- Realizar un análisis de prefactibilidad para determinar si se puede iniciar con la PTAR en el ingenio azucarero.
- Realizar un análisis del tipo de compost producido en la PTAR para implementar un modelo de negocio que implique la venta de este.
- Realizar un análisis de flujo de efectivo proyectado a 25 años para analizar la rentabilidad del proyecto y si esta conserva la tendencia de seguir aumentando positivamente el valor presente neto.

- Realizar un análisis del mercado potencial para la venta de compost y determinar así con mayor precisión la demanda en los primeros 15 años.
- Se sugiere buscar ahorros, a través de un análisis más detallado de un ingeniero civil, en las secciones de obra gris del proyecto que podrían hacerse con block u otro material más económico, ya que se asumió que todo debía de hacerse con concreto. Esto, por los equipos y fluidos considerados.



## XI. Bibliografía

- 3M. (2006). *Placas Petrifilm para el Recuento de E. Coli/Coliformes*. México .
- Abdolkarimi, V., & Ganji, H. (2013). *CFD modeling of two immiscible fluids mixing in a comercial scale static mixer*. Brazilian Journal of Chemical Engineering.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Colombia: McGraw Hill Interamericana S.A.
- Arrazola, R. (2007). *Políticas óptimas de operación de una planta de tratamiento biológico de aguas residuales por desnitrificación*. Ciudad de México, México: Universidad Iberoamericana.
- ASAZGUA. (2017). *Asociación de Azucareros de Guatemala ASAZGUA*. Obtenido de [http://www.azucar.com.gt/#iniciativas\\_ambientales](http://www.azucar.com.gt/#iniciativas_ambientales)
- autor, S. (s.f.). *Anacafe*. Obtenido de Abonos orgánicos: [https://www.anacafe.org/glifos/index.php/CaficulturaOrganica\\_Abonos](https://www.anacafe.org/glifos/index.php/CaficulturaOrganica_Abonos)
- autor, S. (s.f.). *Fertilizantes Orgánicos, Bio - Cofya*. Obtenido de <http://biocofya.com/producto/fertilizante-organico-biocofya/>
- autor, S. (s.f.). *Propanogas*. Obtenido de <https://propanogas.com/faq/poder-calorifico-gas-propano>
- BanGuat. (2015). *Banco de Guatemala*. Obtenido de Comportamiento de las principales variables de la política monetaria, cambiaria y crediticia : <http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/vmc/vmc06.htm>
- Barrenechea, A., & de Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud y Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Blank, L. (2012). *Ingeniería económica, séptima edición*. NY, New York: Mc Graw Hill.
- C y M San Pascual S.A. (2014). *Fibra cerámica (Ficha Técnica)*. Obtenido de C y M San Pascual S.A.: <http://cymstanpascual.cl/wp-content/uploads/2014/05/Ficha-tecnica-Fibra-Ceramica.pdf>
- Camero, J. A. (2004). *Estudio de prefactibilidad de un proyecto para la prestación de servicios de acabados para vivienda de interés social en Bogotá*. . Bogotá, Colombia.
- Carrizales Martínez, R. (2010). *Eumed*. Obtenido de Tlatemoani revista académica de investigación: <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/02/rcm.pdf>
- Cengel, Y. A. (2007). *Trasferencia de calor y masa*. Reno, Nevada: Mc Graw Hill.
- Cervantes, F., & Pérez, J. e. (2000). *Avances en la eliminación biológica del Nitrógeno de las aguas residuales*. Revista Latinoamericana de Microbiología, 73-82.
- Chain, N. S. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos*. Colombia: McGraw Hill.

- Collivignarelli, M., Abba, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2018). *Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. Sustainability* .
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Lagunas de Estabilización*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales - Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente*. México: Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Davis, M. (2010). *Water and wastewater engineering design principles and practice*. Nueva York: McGraw Hill.
- De Lemos, C. A. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series: Anaerobic Reactors*. Londres: IWA Publishing.
- Dumrauf, G. L. (2006). *Cálculo Financiero Aplicado*. Buenos Aires: La Ley. Obtenido de [http://fepi.web.unq.edu.ar/wp-content/uploads/sites/39/2014/12/FEP\\_Lopez\\_Dumrauf\\_Cap.-10.pdf](http://fepi.web.unq.edu.ar/wp-content/uploads/sites/39/2014/12/FEP_Lopez_Dumrauf_Cap.-10.pdf)
- EMMSA. (15 de septiembre de 2018). *Sistemas de Tubería EMMSA*. Obtenido de EMMSA: <http://www.emmsa.com/admin/img/servicio-cliente/ft-tuberia-c40.pdf>
- EMMSA. *Sistemas de tubería*. (s.f.). *Tuberías de PVC. Cédula 40*. México D.F.
- EmprendePyme. (s.f.). *Análisis FODA*. Obtenido de FODA: <https://www.emprendepyme.net/analisis-dafo>
- Environmental Protection Agency, EPA. (Septiembre de 1983). *Manual of Nitrogen Control*. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Escamilla, F., & Rodríguez, J. (2004). *Propuesta de infraestructura hidráulica para la Universidad de las Américas de acuerdo al Plan Ordenador de Espacios*. Puebla: Universidad de las Américas.
- Europea, C. (2006). *Orientación sobre la metodología para realiza costes-beneficios*. España. Obtenido de [https://www.u-cursos.cl/usuario/b8c892c6139f1d5b9af125a5c6dff4a6/mi\\_blog/r/Principios\\_de\\_Finanzas\\_Corporativas\\_9Ed\\_\\_Myers.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/b8c892c6139f1d5b9af125a5c6dff4a6/mi_blog/r/Principios_de_Finanzas_Corporativas_9Ed__Myers.pdf)
- Fayed, M., & Otten, L. (1997). *Handbook of powder science*. (W. Chen, & S. Keith, Edits.) New York: Springer US.
- Fernández, J., Ontoso, M., García, C., & González, S. (2009). *Diseño de un sistema de tratamiento no convencional de depuración en el altiplano boliviano*. Madrid: Fundación EOI.

- Ferrer, J., & Seco, A. (2008). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. México: Alfaomega.
- Fia, R., Cruz, F., Teixeira, A., & Luiz, F. C. (2012). *Influence of flow direction in the performance of anaerobic filters*. *Acta Scientiarum Technology*, 34(2), 141-147.
- Financiera, E. (2018). *Valor Presente Neto*. Obtenido de <https://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/valor-presente-neto.htm>
- Franklin Allen, S. C. (Sin año). *Principios de Finanzas Corporativas* (Novena Edición ed.). Mc Graw Hill. Obtenido de [https://www.u-cursos.cl/usuario/b8c892c6139f1d5b9af125a5c6dff4a6/mi\\_blog/r/Principios\\_de\\_Finanzas\\_Corporativas\\_9Ed\\_\\_Myers.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/b8c892c6139f1d5b9af125a5c6dff4a6/mi_blog/r/Principios_de_Finanzas_Corporativas_9Ed__Myers.pdf)
- Golato, M. A. (septiembre de 2014). *Sistema de control en cocimientos de azúcar*. Obtenido de Universidad Nacional de Tucumán: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2015/12/AP11-Control-de-Cocimientos-de-az%C3%BAcar-Ing-Golato-Sep-2014.pdf>
- Gordillo, F. (s.f.). *Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/9112/1/Evaluaci%C3%B3n%20Comparativa%20de%20la%20calidad%20del%20compost.pdf>
- Gordon, G., Adam, L., Bubnis, B., & Hoyt, B. (1993). *Controlling the Formation of Chlorate Ion in Liquid Hypochlorite Feedstock*. *Journal (American Water Work Association)*, 89-97.
- Goulds Pumps. (s.f.). *Goulds Model 3196*. New York.
- Grainger. (12 de 11 de 2018). *Grainger*. Obtenido de Centrifugal Pumps 15 hp: [https://www.grainger.com/category/centrifugal-pumps/pumps/ecatalog/N-hsq?okey=centrifugal+pump+15+hp&mkey=Centrifugal+Pumps+&refineSearchString=centrifugal+pump+15+hp&nls\\_boost\\_words=15+hp&NLSCM=5&EndecaKeyword=centrifugal+pump+15+hp&searchBar=true&search](https://www.grainger.com/category/centrifugal-pumps/pumps/ecatalog/N-hsq?okey=centrifugal+pump+15+hp&mkey=Centrifugal+Pumps+&refineSearchString=centrifugal+pump+15+hp&nls_boost_words=15+hp&NLSCM=5&EndecaKeyword=centrifugal+pump+15+hp&searchBar=true&search)
- Grupo Corporativo Santa Ana. (18 de mayo de 2015). *Conociendo mi ingenio*. Manual de Inducción, 13-15; versión: 6.
- Guatemala, C. d. (1986). *Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente*. Guatemala.
- Gutiérrez, A., & Bueno de las Heras, J. (s.f.). *Los sedimentadores lamelares en el tratamiento de aguas residuales*. Universidad de Oviedo ANQUE de Asturias, 30-39.
- Haas, C., & Karra, S. (1984). Kinetics of wastewater chlorine demand exertion. *Journal WPCF*, 170-172.
- HACH. (2009). *DR/890 Colorimeter, Procedures Manual*. USA: Hach Company.
- HACH. (2013). *DR890 Procedures Manual*. U.S.A.

- Helena García, A. C. (2013). *Análisis Costo Beneficio de Energías Renovables No Convencionales en Colombia*. Colombia.
- Henze, M., & Harremoës, P. e. (2001). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. Alemania: Springer Sciencia & Business Media.
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R., & Tchobanoglous, G. (2012). *Principles of Water Treatment*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- INEOS Olefins & Polymers USA. (2012). *HDPE Chemical Resistance Guide*. Texas.
- Instituto Privado de Investigación sobre el Cambio Climático. (1 de Agosto de 2018). *Concepción: Temperatura*. Obtenido de <https://redmet.icc.org.gt/>
- INTERNATIONAL, S. S. (s.f.). Technical Data Sheet Fine bubble diffusers. *AFD270 9" DISC*. New York, USA.
- KAESER. (27 de septiembre de 2018). *KAESER COMPRESORES*. Obtenido de <http://mx.kaeser.com/m/Images/P-650-MX-tcm325-6758.pdf>
- Leal, J. (Agosto de 2010). *Análisis Costo-Beneficio de Regulaciones Ambientales*. Obtenido de Cepal: [https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/7/40547/LEALVIERNES\\_2\\_ANALISIS\\_COSTO\\_BENEFICIO\\_REVISADO.pdf](https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/7/40547/LEALVIERNES_2_ANALISIS_COSTO_BENEFICIO_REVISADO.pdf)
- Leland Blank, A. T. (2006). *Ingeniería Económica* (Séptima edición ed.). Mexico D.F.: Mc Graw Hill.
- Lin, S. (2007). *Water and Wastewater Calculations Manual*. New York: McGraw Hill.
- Linacre, E. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 409-424.
- Lledó, P. (2003). *Análisis de Sensibilidad*. Obtenido de <http://pablolledo.com/content/articulos/03-03-06-Sensibilidad-Lledo.PDF>
- Lopez, S. M. (22 de Mayo de 2018). *Expansión*. Obtenido de <http://www.expansion.com/diccionario-economico/analisis-de-escenarios-en-valoracion-de-inversiones.html>
- Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H., & Lettinga, G. (2003). Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review. *Bioresource Technology*(90), 141-147.
- Mara, D., & Pearson, H. (1998). *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterranean Countries*. Leeds: Lagoon Technology International.
- Marroquín, C. P. (16 de Noviembre de 2017). Crece contaminación por aguas residuales ante falta de plantas de tratamiento. Obtenido de <http://www.prensalibre.com/ciudades/guatemala/crece-contaminacion-por-aguas-residuales-ante-falta-de-plantas-tratamiento>
- Martín, J. (15 de Mayo de 2017). *Cerem, International Business School*. Obtenido de Estudia tu entorno con un PESTEL: <https://www.cerem.es/blog/estudia-tu-entorno-con-un-pest-el>

- Martínez, J. A. (28 de Febrero de 2014). *Análisis de Costo Beneficio*. Obtenido de [http://gis.jp.pr.gov/Externo\\_Econ/Talleres/PresentationCB\\_JP\\_ETI.pdf](http://gis.jp.pr.gov/Externo_Econ/Talleres/PresentationCB_JP_ETI.pdf)
- Martínez, J. A. (2014). *Análisis de costo beneficio; Ejemplo de análisis sector privado*. San Juan: Estudios Técnicos Inc.
- McCabe, W., & Smith, J. e. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw Hill.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México D.F.: McGraw Hill.
- Melgar, J., Bonifaz, O., García, M., González, M., Hernández, M., Hipp, M., . . . Sánchez, M. (2017). *Rediseño de las plantas de tratamiento aeróbico y anaeróbico de aguas residuales y creación de programa de educación ambiental de un complejo comercial y residencial*. Universidad del Valle de Guatemala.
- Melgar, M. (2012). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala, Guatemala: CENGICANA.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. New York: McGraw Hill.
- Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Chicago: McGraw Hill Companies, Inc.
- Mete, M. (Marzo de 2014). *Valor Actual Neto y Tasa de Retorno: Su utilidad como herramienta para el análisis y evaluación de proyectos de inversión*. Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/pdf/rfer/v7n7/v7n7\\_a06.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/rfer/v7n7/v7n7_a06.pdf)
- Ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica. (1991). *Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Dirección general de investigación y extensión agrícola.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2006). *Acuerdo Gubernativo 236-2006 "Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos"*. Gobierno de Guatemala.
- Monteith, L. (1981). *Evaporation and surface temperature*. Royal Meteorological Society, 1-27.
- National Fire Protection Association. (2017). *Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*.
- Ollero, R. (Julio de 2015). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas para poblaciones entre 20 y 25 mil habitantes*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Orozco, C., & Cantarero, V. e. (s.f.). *Tratamiento de residuos Manual didáctico*. Nicaragua .
- Patzán, J. M. (10 de Septiembre de 2016). *Ríos son usados como basureros*. Prensa Libre. Obtenido de <http://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/lluvias-arrastran-mas-desechos>

- Paul, E., Atiemo-Obeng, V., & Kresta, S. (2004). *Handbook of industrial mixing science and practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Perry, R. H. (1997). *Chemicals Engineers Handbook*. McGraw-Hill.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Nueva York: McGraw Hill.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's Chemical Engineers handbook* (8va. ed.). USA: McGraw Hill Company Inc.
- Polo, J., & Torrecillas, A. (2008). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. México: Alfaomega.
- Porter, E., & Raynor, R. (1966). *Thickeners and Clarifiers*. Chemical Engineering , 198-202.
- Porter, M. (5 de Marzo de 2018). *Las cinco fuerzas de Porter: el análisis para que tu empresa sea competitiva*. Obtenido de <https://www.pqs.pe/capacitacion/cinco-fuerzas-porter-analisis>
- PUMPS, G. (1 de 10 de 2018). *Gould Pumps* . Obtenido de Goulds model 3196: <https://inventory.powerzone.com/invmages/55140/Goulds-3196-Pump-Curves-Performance-Curves-OEM.pdf>
- Raboni, M., & Vicenzo, T. e. (2014). *Calculating specific denitrification rates in pre-denitrification by assessing the influence of dissolved oxygen, sludge loading and mixed-liquor recycle*. Environmental Technology, 2582-2588.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Rankia. (2017). *Tasa Interna de Retorno*. Obtenido de <https://www.rankia.mx/blog/como-comenzar-invertir-bolsa/3437230-como-evaluar-proyectos-inversion>
- Rasi, S. (2009). *Biogas Composition and Upgrading to Biomethane*. Finlandia: Jyvaskyla University Printing House.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín, Alemania: Verlag Dr. Alberst Bartems KG.
- Seyfried, C., & Abeling, U. (1992). *Anaerobic-aerobic treatment og high-strength ammonium wastewater- nitrogen removal via nitrite*. IAWPRC, 1007-1015.
- Stenner Pump Company. (s.f.). *Chemical Resistance Guide*. Florida.
- Stenner Pump Company. (s.f.). *Manual de instalación y mantenimiento Serie ECON FX Serie ECON VX*. Florida.
- Taylor, Z., Carlston, J., & Karan, S. (2015). *Hydraulic design of baffles in disinfection contact tanks*. Journal of Hydraulic Research, 400-407.
- The Environmental Protection Agency. (2011). *Water Treatment Manual: Disinfection*. Office of Environmental Enforcement.
- Tortora, G. (2007). *Microbiology "An Introduction"*. Pearson Prentice Hall.

- Towler, G., & Sinnott, R. (2008). *Chemical Engineering design; principles, practice and economics of plant and process design*. USA: Butterworth-Heinemann.
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Chile.
- White, G. (2010). *Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Young, H., & Freedman, R. (2013). *Física Universitaria*. Ciudad de México: Pearson.
- Zúñiga, M. (octubre-diciembre de 2005). *Mecanismos no convencionales de transformación y remoción de nitrógeno en sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Ingeniería hidráulica en México, XX(4), 137-149.



## XII. ANEXOS

### A. Módulo 1: Propuesta del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico

#### 1. Datos originales

Tabla 106. Características y parámetros del agua residual tipo ordinario alimentada a la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia del ingenio azucarero.

Característica	Valor	Unidades
Temperatura	25	°C
Demanda Química de Oxígeno	0.903	kg/m <sup>3</sup>
Demanda Biológica de Oxígeno	0.611	kg/m <sup>3</sup>
Sólidos Suspendidos Totales	0.200	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 107. Generación de agua residual para los servicios en el ingenio azucarero

Servicio	Caudal diario por unidad	Unidades
Salón de actos	980	m <sup>3</sup> /sillas*s
Hotel	13064	m <sup>3</sup> /huésped*s
	3266	m <sup>3</sup> /empleado*s
Estación de servicio	3919	m <sup>3</sup> /vehículo*s
	4246	m <sup>3</sup> /empleado*s
Lavandería	179626	m <sup>3</sup> /lavadora*s
Tienda	3266	m <sup>3</sup> /empleado*s

Tabla 108. Cantidad de huéspedes en el hotel del ingenio azucarero en época de zafra.

Año	Mes	Huéspedes
2016	Noviembre	710
	Diciembre	662
2017	Enero	674
	Febrero	636
	Marzo	698
	Abril	556

Tabla 109. Mediciones para el cálculo del caudal de los lavamanos en el ingenio azucarero.

Lavamanos	Corrida	Volumen ( $\pm 0.0005 \text{ m}^3$ )	Tiempo ( $\pm 0.12 \text{ s}$ )
Hombres	1	0.006	38.66
	2	0.006	41.11
	3	0.006	40.81
Mujeres	1	0.006	41.43
	2	0.006	41.18
	3	0.006	43.45

Tabla 110. Mediciones para el cálculo del caudal de las duchas en el ingenio azucarero.

Duchas	Corrida	Volumen ( $\pm 0.0005 \text{ m}^3$ )	Tiempo ( $\pm 0.12 \text{ s}$ )
Hombres	1	0.015	11.58
	2	0.015	10.98
	3	0.015	11.48
Mujeres	1	0.006	39.04
	2	0.006	32.50
	3	0.006	34.96

Tabla 111. Mediciones para el cálculo del caudal del mingitorio de pared en el ingenio azucarero.

Punto de medición	Volumen ( $\pm 0.0005 m^3$ )	Tiempo ( $\pm 0.12 s$ )
1	1.3 E-03	150
2	2.5 E-03	160
3	1.2 E-03	330

Tabla 112. Características del mingitorio de pared en el ingenio azucarero.

Característica	Valor	Unidades
Puntos de descarga de agua	34	puntos
Uso	43,200	s/d
	12	h/d

Tabla 113. Personal contratado por el ingenio azucarero para la zafra a lo largo de los años.

Año	Personal que labora dentro del ingenio
2015	1246
2016	1254
2017	1266

Tabla 114. Contabilización de visitas al sanitario de la fosa séptica 1 en el ingenio azucarero durante la zafra.

Día	Visitas diarias		
	Inodoro	Mingitorio	Total
1	72	27	99
2	199	84	283
3	90	47	137
4	69	68	137
5	113	123	236
6	75	166	241
7	68	103	171
8	50	15	65
9	58	47	105
10	91	71	162
11	75	57	132
12	72	53	125
13	74	60	134
14	99	68	167
15	114	60	174
16	97	70	167
17	140	87	227
18	134	54	188
19	128	90	218
20	127	98	225
21	89	61	150
22	137	-	-
23	90	-	-
24	75	-	-
25	74	-	-

Tabla 115. Identificación de áreas y fosas sépticas que alimentarán la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia en el ingenio azucarero.

Fosa Séptica	Área que descarga aguas residuales	Fosa Séptica	Área que descarga aguas residuales
1	Baño industrial	15	Proyecto
2	Oficinas de Fábrica	16	Módulo 12
	Oficinas de Instrumentación y Metrología	17	Lab Metarhizium
3	Baño bodegas	18	Garita de Entrada
4	Báscula 5	19	Centro de Empaque
5	Hotel Lavandería		Refinería
6	Hotel modulo 1		Báscula 4
7	Hotel modulo 2	20	Planta Purificadora Ranchón
8	Hotel vestidores	21	Parqueo Buses Baño hombres
9	Báscula 1		Parqueo Buses Baño mujeres
	Báscula 2	22	Bodega de Helipuerto
10	Informática área 1	23	Baños de gasolinera
	Informática área 2	23	Baño del jefe de gasolinera
	Gestión de Calidad	24	Edificio Turbogenerador Bloque 2
	Baños Sala de Capacitación mujeres	25	División Agrícola
	Baños Sala de Capacitación hombres	26	Taller A/C, Jardinería y Limpieza
		27	Gimnasio Hotel
11	Comedor Administrativo Cocina Administrativa RR.HH. Compras		
12	Monitoreo Bomberos ASTISA		
13	Clínica Oficina Activos Fijos Auditoría		
14	Lavamanos Cocina Industrial		

Tabla 116. Contabilización de aparatos sanitarios descargados a cada fosa séptica en el ingenio azucarero.

Fosa Séptica	Cantidad								
	MPA <sup>1</sup>	MPO <sup>2</sup>	IT <sup>3</sup>	IFL <sup>4</sup>	LM <sup>5</sup>	D <sup>6</sup>	LAU <sup>7</sup>	P <sup>8</sup>	LT <sup>9</sup>
1	6	0	0	9	6	0	0	0	0
2	0	1	8	0	8	1	0	0	0
3	0	0	0	13	12	3	0	0	0
4	0	0	1	0	1	1	0	0	0
5	0	0	2	0	2	2	0	2	0
6	0	0	12	0	16	12	3	2	0
7	0	0	16	0	16	16	0	0	0
8	0	0	1	0	2	4	0	0	0
9	0	0	6	0	7	0	0	1	0
10	0	0	6	0	6	0	0	0	0
11	0	4	10	5	17	0	0	0	0
12	0	0	5	0	6	2	0	0	0
13	0	0	8	0	12	4	0	0	1
14	0	0	2	0	2	1	0	1	2
15	6	0	8	0	14	12	0	1	0
16	0	5	3	0	6	11	0	0	0
17	0	0	1	0	1	2	0	0	0
18	0	0	1	0	1	0	0	0	0
19	0	2	0	2	3	0	0	0	0
20	0	0	6	0	6	0	0	0	0
21	0	11	0	26	24	83	0	0	0
22	0	0	1	0	1	1	0	1	0
23	0	0	3	0	4	1	0	0	1
24	0	1	2	0	0	0	0	2	0
25	0	0	12	0	12	0	0	1	0
26	0	2	1	0	0	0	0	0	0
27	0	3	7	0	7	9	0	0	0
Total	12	29	122	55	192	165	3	11	4

<sup>1</sup> Mingitorio de pared

<sup>4</sup> Inodoro de fluxómetro

<sup>7</sup> Lavadora automática

<sup>2</sup> Mingitorio de porcelana

<sup>5</sup> Lavamanos

<sup>8</sup> Pila

<sup>3</sup> Inodoro de tanque

<sup>6</sup> Ducha

<sup>9</sup> Lavatrastos

Tabla 117. Cantidad de aparatos sanitarios utilizada para calcular el caudal teórico actual por el Método por Dotación, en el ingenio azucarero.

Fosa Séptica	Cantidad						
	MPA <sup>1</sup>	MPO <sup>2</sup>	IT <sup>3</sup>	IFL <sup>4</sup>	LM <sup>5</sup>	D <sup>6</sup>	P <sup>8</sup>
1	6	0	0	9	6	0	0
2	0	1	8	0	8	1	0
3	0	0	0	13	12	3	0
4	0	0	1	0	1	1	0
5	0	0	2	0	2	2	2
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	2	4	0
9	0	0	6	0	7	0	1
10	0	0	6	0	6	0	0
11	0	4	10	5	17	0	0
12	0	0	5	0	6	2	0
13	0	0	6	0	9	4	0
14	0	0	2	0	2	1	1
15	6	0	8	0	14	12	1
16	0	5	3	0	6	11	0
17	0	0	1	0	1	2	0
18	0	0	1	0	1	0	0
19	0	2	0	2	3	0	0
20	0	0	6	0	6	0	0
21	0	11	0	26	24	83	0
22	0	0	1	0	1	1	1
23	0	0	1	0	1	0	0
24	0	1	2	0	0	0	2
25	0	0	12	0	12	0	1
26	0	2	1	0	0	0	0
27	0	3	7	0	7	9	0
Total	12	29	90	55	154	136	9

<sup>1</sup> Mingitorio de pared

<sup>4</sup> Inodoro de fluxómetro

<sup>2</sup> Mingitorio de porcelana

<sup>5</sup> Lavamanos

<sup>8</sup> Pila

<sup>3</sup> Inodoro de tanque

<sup>6</sup> Ducha

Tabla 118. Consumo habitual de agua por descarga para varios aparatos domésticos en el ingenio azucarero.

Aparato	Valor ( $m^3$ /descarga)
Mingitorio de porcelana	6.00 E-04
Inodoro de tanque	2.30 E-02
Inodoro de fluxómetro	5.70 E-03

Tabla 119. Unidades Hunter para varios aparatos domésticos.

No.	Aparato	Unidades Hunter
1	Mingitorio corrido de pared	3
2	Mingitorio de porcelana	6
3	Inodoro de tanque	3
4	Inodoro de fluxómetro	6
5	Lavamanos	0.75
6	Ducha	1.5
7	Pila	2.25

Tabla 120. Parámetros para el cálculo del caudal teórico futuro calculado usando el Método por Dotación.

Parámetro	Valor	Unidad
Población actual	1266	persona
Año actual	2018	año
Año futuro	2033	año
Crecimiento poblacional	0.01	-

Tabla 121. Relación de velocidad horizontal sobre la velocidad ascendente de la grasa y el factor de compensación para turbulencia.

Vh/Vt	F2
20	1.45
15	1.37
10	1.27
6	1.14
3	1.07

Tabla 122. Propiedades de grasas y aceites según la Norma DIN 4040.

Densidad de aceites y grasas (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad de ascenso (m/s)	Área superficial del separador de aceites y grasas (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> /s)
750	81000	160
800	64800	200
850	48600	270
900	32400	400

Tabla 123. Parámetros de diseño para la trampa de aceites y grasas.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de retención	600	s
Diámetro de partícula	<0.00025	m
Concentración inicial media de grasas	0.04	kg/m <sup>3</sup>
Velocidad horizontal máxima	0.015	m/s
Eficiencia de remoción de DBO y DQO	92	%
DBO contenido en las grasas	20	%
DQO contenido en las grasas	2.0 – 2.5	kg/kg
Relación longitud - ancho	1 – 1.8	
Relación área de orificios de pantalla de distribución – área transversal	3 - 7	%

Tabla 124. Parámetros de diseño para la pantalla de distribución de la trampa de grasas.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro de orificio	0.10	m
Separación de orificios entre centros	0.15	m
Altura de la pantalla por encima del fondo del tanque	0.40	m

Tabla 125. Parámetros de diseño para el dimensionamiento de las cribas.

Parámetro	Valor	Unidad
Ancho de las barras	0.005 – 0.015	m
Profundidad de las barras	0.025 – 0.038	m
Ancho de luz entre barras	0.025 – 0.050	m
Ángulo sobre la vertical	30 – 45	°
Pérdida de cabeza máxima aceptable	0.150	m

Tabla 126. Caracterización de sólidos flotantes removidos por las cribas con un ancho de luz de 0.025 m.

Característica	Valor	Unidad
Humedad	80	%
Densidad	800	kg/m <sup>3</sup>
Fracción volumétrica de sólidos retenidos	0.015 – 0.037	m <sup>3</sup> /1000m <sup>3</sup>

Tabla 127. Parámetros de diseño para calcular la pérdida de energía en las cribas.

Parámetro	Valor	Unidad
Coficiente empírico de pérdida de energía por turbulencia en rejillas limpias	0.7	
Coficiente empírico de pérdida de energía por turbulencia en rejillas sucias	0.6	
Velocidad de aproximación en la alimentación del canal	0.3 – 0.6	m/s
Pérdida de energía máxima en una rejilla sucia	0.15	m

Tabla 128. Parámetros de diseño para el tanque de homogeneización.

Parámetro	Valor	Unidad
Relación alto - diámetro	1 – 1.8	
Número mínimo de tanques	2	unidades

Tabla 129. Parámetros de diseño para el sedimentador primario.

Parámetro	Valor	Unidad
Carga superficial	48	$\frac{m^2}{(m^3/s)}$
Tiempo de retención	3600 – 14400	s
	1.5 - 4	h
Relación longitud – ancho	3 – 5	
Relación longitud – profundidad	5 – 20	
Altura de seguridad	0.5	m
Número mínimo de tanques	2	unidades
Pendiente longitudinal del fondo	0.1	alto/largo
Pendiente de la tolva de lodos	2	alto/largo
Tiempo de descarga de lodos	1800	s
	0.5	h

Tabla 130. Parámetros de diseño del difusor de entrada al sedimentador primario.

Parámetro	Valor	Unidad
Ubicación de la pantalla aguas debajo de la alimentación	2 -2.5	m
Diámetro de orificios	0.075	m
Velocidad máxima a través del orificio	0.15	m/s
Filas	6	Filas
Columnas	9	Columnas

Tabla 131. Viscosidad cinemática de partículas sedimentables según la temperatura.

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática $\times 10^6$ ( $m^2/s$ )
0	1.785
5	1.519
10	1.306
15	1.139
20	1.003
25	0.893

Tabla 132. Características de las partículas sedimentables a sedimentar en el sedimentador primario.

Característica	Valor	Unidad
Densidad relativa del material seco	1.4	
Densidad relativa del material húmedo	1.02	
Diámetro de partícula	0.00005 – 0.00020	m
Humedad de lodos	92 - 96	%
Relación longitud - ancho	3 – 5	
Relación longitud - profundidad	5 - 20	

Tabla 133. Porcentaje de remoción de DQO y constantes utilizadas en el cálculo de remoción de DBO y SST de las aguas residuales salientes del sedimentador primario.

Parámetro	Valor	Unidad
Demanda Química de Oxígeno	30	%
Constante a para Demanda Biológica de Oxígeno	0.018	
Constante b para Demanda Biológica de Oxígeno	0.020	
Constante a para Sólidos Suspendedos Totales	0.0075	
Constante b para Sólidos Suspendedos Totales	0.0140	

## 2. Cálculos de muestra

### a. Estimación del caudal actual promedio

- 1) Se determinó el caudal generado por el lavamanos, duchas y mingitorio de pared de la misma forma en como se muestra en este paso. Se obtuvo el cociente del volumen y el tiempo de llenado para cada medición.

$$\text{Caudal de lavamanos} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

(Ecuación 63)

$$\text{Caudal de lavamanos} = \frac{0.006 \text{ m}^3}{38.68 \text{ s}} = 0.000155 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- 2) Se asumió un tiempo de lavado de manos, uso de ducha y flujo del mingitorio de 1 min, 5 min y 12 h, respectivamente para encontrar el consumo por visita.

$$\text{Consumo por visita} = \text{Tiempo de uso} * \text{Caudal de lavamanos}$$

(Ecuación 64)

$$\text{Consumo por visita} = 1 \frac{\text{min}}{\text{visita}} * \left( \frac{60\text{s}}{1\text{min}} \right) * 0.000155 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.00471 \frac{\text{m}^3}{\text{visita}}$$

- 3) De cada conjunto de datos, se calculó el promedio y desviación estándar.

$$\text{Caudal promedio de lavamanos} = \frac{\Sigma(\text{Caudal de } n \text{ mediciones})}{n}$$

(Ecuación 65)

*Caudal promedio de lavamanos*

$$= \frac{(0.00471 + 0.00443 + 0.00446 + 0.00439 + 0.00442 + 0.00419) \text{ m}^3/\text{s}}{6}$$

$$= 0.00443 \text{ m}^3/\text{visita}$$

$$\text{Caudal desviación estándar de lavamanos} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{\text{promedio}})^2}$$

(Ecuación 66)

$$\text{Caudal desviación estándar de lavamanos} = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^6 \left( Q_i - 0.00443 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^2} = 0.000165 \frac{\text{m}^3}{\text{visita}}$$

- 4) Se operó el parámetro de consumo de agua por visita por la cantidad de visitas diarias para calcular el caudal para cada aparato doméstico.

$$\text{Caudal del uso del lavamanos} = \text{Consumo por visita} * \text{Visitas diarias}$$

(Ecuación 67)

$$\text{Caudal del uso del lavamanos} = 0.00471 \frac{\text{m}^3}{\text{visita}} * 169 \frac{\text{visita}}{d} * \frac{d}{24h} * \frac{h}{60\text{min}} * \frac{\text{min}}{60s} = 0.000022 \frac{\text{m}^3}{s}$$

- 5) Se multiplicó la cantidad de unidades de un aparato doméstico por fosa séptica, para determinar el caudal por el Método por Dotación en el ingenio azucarero, por el caudal que este aparato consume de agua.

$$\text{Caudal de mingitorios de pared en fosa séptica 1}$$

$$= \text{Caudal de mingitorio de pared} * \text{Mingitorios de pared}$$

(Ecuación 68)

$$\text{Caudal de mingitorios de pared en fosa séptica 1} = 0.000158 \frac{\text{m}^3}{s} * 6 \text{ mingitorios de pared}$$

$$= 0.000950 \frac{\text{m}^3}{s}$$

- 6) Se repitió el paso anterior para cada aparato, se sumó el caudal para cada fosa séptica y, finalmente, se adiciona el total de cada fosa séptica para encontrar el caudal de agua consumida por los aparatos domésticos.

$$\text{Caudal de agua consumida en fosa séptica 1}$$

$$= \sum (\text{Caudal de agua consumida por aparato doméstico en fosa séptica 1})$$

(Ecuación 69)

$$\begin{aligned} \text{Caudal de agua consumida en fosa séptica 1} &= 0.000950 \frac{m^3}{s} + 0.000167 \frac{m^3}{s} + 0.000130 \frac{m^3}{s} \\ &= 0.001246 \frac{m^3}{s} \end{aligned}$$

$$\text{Caudal de agua consumida total} = \sum(\text{Caudal de agua consumida por fosa séptica})$$

(Ecuación 70)

$$\text{Caudal de agua consumida total} = 0.01920 \frac{m^3}{s}$$

- 7) Al caudal del paso anterior, se le multiplicó por el coeficiente de recuperación, 0.85, para determinar el caudal de aguas residuales por los aparatos domésticos en el ingenio azucarero.

$$\begin{aligned} \text{Caudal de aguas residuales de aparatos} \\ &= \text{Coeficiente de recuperación} * \text{Caudal de agua consumida de aparatos} \end{aligned}$$

(Ecuación 71)

$$\text{Caudal de aguas residuales de aparatos} = 0.85 * 0.01920 \frac{m^3}{s} = 0.01632 \frac{m^3}{s}$$

- 8) Se multiplicó la cantidad de unidades generadoras de aguas residuales por cada servicio identificado dentro del ingenio azucarero.

$$\text{Caudal de aguas residuales en salón de actos} = \text{Caudal} * \text{unidades}$$

(Ecuación 72)

$$\text{Caudal de aguas residuales en salón de actos} = \left( 980 \frac{m^3}{\text{sillas} * s} \right) * 30 \text{ sillas} = 29400 \frac{m^3}{s}$$

- 9) Se sumó el caudal de aguas residuales obtenidas por los aparatos domésticos y los servicios identificados dentro del ingenio azucarero.

$$\text{Caudal de aguas residuales de servicios} = \sum(\text{Caudal de aguas residuales de cada servicio})$$

(Ecuación 73)

$$\begin{aligned} \text{Caudal de aguas residuales de servicios} \\ &= 0.000004 \frac{m^3}{s} + 0.000042 \frac{m^3}{s} + 0.000004 \frac{m^3}{s} + 0.00028 \frac{m^3}{s} + 0.000003 \frac{m^3}{s} \\ &+ 0.00007 \frac{m^3}{s} + 0.000004 \frac{m^3}{s} = 0.000410 \frac{m^3}{s} \end{aligned}$$

10) Para cada aparato doméstico contabilizado y su respectivo caudal de consumo de agua, se le asignó las Unidades Hunter correspondientes. Se multiplicó la cantidad de unidades de un aparato doméstico contabilizado por fosa séptica en el ingenio azucarero por las Unidades Hunter de dicho aparato.

$$UH_{mingitorios fosa séptica 1} = UH_{mingitorio de pared} * Mingitorios de pared$$

(Ecuación 74)

$$UH_{mingitorios fosa séptica 1} = 3 UH * 6 mingitorios de pared = 18 UH$$

11) Se repitió el paso anterior para cada aparato, se sumaron las Unidades Hunter para cada fosa séptica y, finalmente, se adiciona el total de cada fosa séptica para encontrar las Unidades Hunter de agua consumida por los aparatos domésticos.

$$UH_{fosa séptica 1} = \sum (UH_{aparatos domésticos fosa séptica 1})$$

(Ecuación 75)

$$UH_{fosa séptica 1} = 18 UH_{mingitorio de pared} + 54 UH_{inodoro de fluxómetro} + 4.5 UH_{lavamanos} = 76.5 UH$$

$$UH_{total} = \sum (UH_{fosas sépticas})$$

(Ecuación 76)

$$UH_{total} = 1335 UH$$

12) Usando una tabla de referencia, se indicó el caudal de consumo de agua que corresponde a las Unidades Hunter totales. Al caudal obtenido, se le multiplicó por el coeficiente de recuperación, 0.85, para determinar el caudal de aguas residuales por los aparatos domésticos en el ingenio azucarero.

$$Q_{agua residual} = C_{recuperación} * Q_{agua consumida}$$

(Ecuación 77)

$$Q_{agua residual} = 0.85 * 0.01856 \frac{m^3}{s} = 0.01578 \frac{m^3}{s}$$

b. Estimación del caudal futuro promedio

1) Se calculó el crecimiento poblacional para cada par de años dado el personal contratado en la zafra.

$$Crecimiento poblacional = \frac{Personal anterior}{Personal siguiente} * 100\%$$

(Ecuación 78)

$$\text{Crecimiento poblacional} = \frac{1246}{1254} * 100\% = 0.64\%$$

- 2) Se determinó la cantidad de personal contratado en un plazo de 15 años a partir del año en curso.

$$\text{Personal futuro} = \text{Población actual} * (1 + \text{Crecimiento poblacional})^{(\text{Año futuro} - \text{Año actual})}$$

(Ecuación 79)

$$\text{Personal futuro} = 1266 * (1 + 0.01)^{(2033-2018)} = 1470 \text{ empleados}$$

- 3) Se multiplicó la cantidad de personal contratado en el 2033 por el parámetro de la generación de aguas residuales por el Método por Dotación.

$$\bar{Q} = \text{Parámetro} * \text{Personal futuro}$$

(Ecuación 80)

$$\bar{Q} = 98647 \frac{m^3}{\text{empleado} * s} * 1470 \text{ empleados} = 0.01942 \frac{m^3}{s}$$

- 4) Se calculó el caudal mínimo de aguas residuales como la mitad de dicho valor.

$$Q_{min} = \bar{Q} * 0.5$$

(Ecuación 81)

$$Q_{min} = 0.01942 \frac{m^3}{s} * 0.50 = 0.00971 \frac{m^3}{s}$$

- 5) Se calculó el coeficiente de Harmon a partir del número de empleados contratados en el 2033 y se operó con el caudal promedio para obtener el máximo.

$$C_{Harmon} = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\text{Población futura}/1000}}$$

(Ecuación 82)

$$C_{Harmon} = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{1470/1000}} = 3.69$$

- 6) Se calculó el caudal máximo de aguas residuales como el producto de la multiplicación entre el caudal promedio y el coeficiente de Harmon.

$$Q_{max} = C_{Harmon} * \bar{Q}$$

(Ecuación 83)

$$Q_{max} = 3.69 * 0.01942 \frac{m^3}{s} = 0.07159 \frac{m^3}{s}$$

7) Se calculó el caudal extraordinario como 1.5 superior al caudal máximo de aguas residuales.

$$Q_{max\ extra} = 1.5 * Q_{max}$$

(Ecuación 84)

$$Q_{max\ extra} = 1.5 * 0.07159 \frac{m^3}{s} = 0.10739 \frac{m^3}{s}$$

c. Diseño de la trampa de aceites y grasas

1) Se graficaron los datos para la densidad y la velocidad de ascenso del glóbulo de aceite. Se determinó la función lineal que representa dichos puntos usando Excel. Se determinó la velocidad de ascenso del glóbulo dada la densidad del aceite y grasas a separar en la trampa. Esto se repitió para conocer la relación del área superficial – caudal del mismo y para el factor de compensación por turbulencia.

$$y = mx + b$$

$$V_{ascenso} = -0.00002 \rho + 0.025$$

(Ecuación 85)

$$V_{ascenso\ deseada} = -0.00002 \frac{m^4}{kg * s} * 835.8 \frac{kg}{m^3} + 0.025 \frac{m}{s} = 0.00411 \frac{m}{s}$$

2) Se calculó la velocidad horizontal del flujo. Se comparó con el dado por la teoría y se seleccionó el de menor magnitud para los cálculos.

$$V_{horizontal} = 15 * V_{ascenso\ deseada}$$

(Ecuación 86)

$$V_{horizontal} = 15 * 0.00411 \frac{m}{s} = 0.0616 \frac{m}{s}$$

3) Dada la relación de la velocidad horizontal y la velocidad de ascenso, se determinó el factor de compensación por turbulencia.

$$\frac{V_{horizontal}}{V_{ascenso\ deseada}} = \frac{0.0616 \frac{m}{s}}{0.00411 \frac{m}{s}} = 3.65$$

(Ecuación 87)

$$F_2 = 0.0228 * \frac{V_{horizontal}}{V_{ascenso\ deseada}} + 1.0137$$

(Ecuación 88)

$$F_2 = 0.0228 * 3.65 + 1.0137 = 1.09$$

- 4) Se calculó el área horizontal mínima de la trampa de aceites y grasas como el producto del factor de compensación para turbulencia y el caudal sobre la velocidad de ascenso del glóbulo de aceite. La velocidad de ascenso es la menor entre 0.015 o la calculada en el paso a).

$$A_{hmin} = \frac{F_2 * Q}{V_{ascenso\ deseada}}$$

(Ecuación 89)

$$A_{hmin} = \frac{1.09 * 0.01942 \frac{m^3}{s}}{0.015 \frac{m}{s}} = 5.13 m^2$$

- 5) Para el pre dimensionamiento se estableció el área superficial de la trampa de aceites y grasas a partir del caudal de alimentación y la relación de área superficial – caudal.

$$A_s = Q * R_{As-Q}$$

(Ecuación 90)

$$A_s = 0.01942 \frac{m^3}{s} * 250 \frac{m^2}{\left(\frac{m^3}{s}\right)} = 4.86 m^2$$

- 6) Se determinó la longitud de la trampa de aceites y grasas como la raíz del producto entre área superficial la relación longitud – ancho seleccionada, 1.5.

$$L = \sqrt{A_s * 1.5}$$

(Ecuación 91)

$$L = \sqrt{4.86 m^2 * 1.5} = 2.70 m$$

- 7) Se obtuvo el ancho de la trampa de aceites y grasas a partir de la longitud calculada en el paso anterior y la relación longitud – ancho seleccionada, 1.5.

$$B = \frac{L}{1.5}$$

(Ecuación 92)

$$B = \frac{2.70 \text{ m}}{1.5} = 1.80 \text{ m}$$

- 8) Se estableció el volumen preliminar del tanque por medio de la división entre el caudal y el tiempo de retención.

$$V = Q * t_r$$

(Ecuación 93)

$$V = 0.01942 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 600 \text{ s} = 11.65 \text{ m}^3$$

- 9) Dado el volumen preliminar, se calculó la altura de la trampa de aceites y grasas al dividir el volumen dentro del área superficial.

$$H = \frac{V}{A_s}$$

(Ecuación 94)

$$H = \frac{11.65 \text{ m}^3}{4.86 \text{ m}^2} = 2.40 \text{ m}$$

- 10) Se determinó el número de columnas y filas de orificios en la pantalla de distribución de la trampa de grasas a partir de las dimensiones de la trampa de aceites y grasas y la distancia entre centros de los orificios. A continuación, se muestra el cálculo para las columnas de la pantalla de distribución.

$$N_{columnas} = \frac{B}{d_{centros}} - 1$$

(Ecuación 95)

$$N_{columnas} = \frac{2 \text{ m}}{0.15 \text{ m}} - 1 = 12$$

- 11) Se calculó el área total de los orificios con el número de columnas y filas, así como con el diámetro del orificio. Se corroboró que la relación entre el área de los orificios y el área transversal de la trampa estuviese dentro del rango aceptado.

$$N_{orificios} = N_{columnas} * N_{filas}$$

(Ecuación 96)

$$N_{orificios} = 12 * 2 = 24$$

$$A_{orificios} = N_{orificios} * \pi * \frac{D_{orificio}^2}{4}$$

(Ecuación 97)

$$A_{orificios} = 24 * \pi * \frac{(0.10 \text{ m})^2}{4} = 0.1885 \text{ m}^2$$

$$A_t = H * B$$

(Ecuación 98)

$$A_t = 2.50 \text{ m} * 2 \text{ m} = 5.00 \text{ m}^2$$

$$R_{A_{orificios}/A_t} = \frac{A_{orificios}}{A_t} * 100\%$$

(Ecuación 99)

$$R_{A_{orificios}/A_t} = \frac{0.1885 \text{ m}^2}{5.00 \text{ m}^2} * 100\% = 3.77\%$$

12) Se determinó la velocidad de paso en la pantalla como el cociente del caudal de aguas residuales alimentado y el área total de los orificios.

$$V_{pantalla} = \frac{Q}{A_{orificios}}$$

(Ecuación 100)

$$V_{pantalla} = \frac{0.01942 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.1885 \text{ m}^2} = 0.1030 \text{ m/s}$$

13) Se obtuvo el tiempo de retención real de la trampa de aceites y grasas diseñada al dividir el volumen con el caudal alimentado.

$$V = L * B * H$$

(Ecuación 101)

$$V = 3.00 \text{ m} * 2.00 \text{ m} * 2.50 \text{ m} = 15.00 \text{ m}^3$$

$$t_r = \frac{V}{Q}$$

(Ecuación 102)

$$t_r = \frac{15.00 \text{ m}^3}{0.01942 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 772 \text{ s} \approx 13 \text{ min}$$

- 14) Se calculó la concentración de grasas de las aguas residuales descargadas de la trampa de aceites y grasas como la eficiencia de remoción por la concentración inicial media de grasas.

$$C_{final} = C_{inicial} * \varepsilon$$

(Ecuación 103)

$$C_{final} = 0.040 \frac{kg}{m^3} * 0.92 = 0.003 \frac{kg}{m^3}$$

- 15) Se determinó la DBO del efluente multiplicando la cantidad de DBO aportada por las grasas y la unidad menos la eficiencia de la operación.

$$DBO_{final} = DBO_{inicial} * DBO_{aportado\ por\ grasas} * (1 - \varepsilon)$$

(Ecuación 104)

$$DBO_{final} = 0.400 \frac{kg}{m^3} * 0.20 * (1 - 0.92) = 0.499 \frac{kg}{m^3}$$

- 16) De forma similar, se estableció la DQO del efluente dada la concentración inicial media de grasas en el agua por la concentración de oxígeno que demanda cada grama por la unidad menos la eficiencia.

$$DQO_{final} = DQO_{inicial} * DQO_{aportado\ por\ grasas} * (1 - \varepsilon)$$

(Ecuación 105)

$$DQO_{final} = 0.400 \frac{kg}{m^3} * 2.25 \frac{kg\ O_2}{kg\ grasas} * (1 - 0.92) = 0.499 \frac{kg}{m^3}$$

d. Diseño de las cribas y malla

- 1) Con el ancho del canal elegido por conveniencia y el espaciamiento entre barras, se calculó el número de barras en la criba.

$$N_{barras} = \frac{B}{(D_{barras} + e)}$$

(Ecuación 106)

$$N_{barras} = \frac{0.50\ m}{(0.0127\ m + 0.0250\ m)} = 13$$

- 2) Se usó la velocidad de aproximación al canal y el caudal para determinar el área transversal del agua dentro del canal y a partir de estos datos, se obtuvo la altura del agua dentro del canal.

$$A_t = \frac{Q}{V_{aprox}}$$

(Ecuación 107)

$$A_t = \frac{0.01942 \frac{m^3}{s}}{0.30 \frac{m}{s}} = 0.06 m^2$$

$$H_{agua} = \frac{A_t}{B}$$

(Ecuación 108)

$$H_{agua} = \frac{0.06 m^2}{0.50 m} = 0.13 m$$

- 3) Se determinó la longitud de la criba, o la hipotenusa, modelando la altura del canal como la adyacente y así también el ángulo sobre la vertical dentro de la función coseno del Teorema de Pitágoras.

$$\cos(\theta) = \frac{A}{H}$$

(Ecuación 109)

$$H = \frac{A}{\cos(\theta)} = \frac{0.30 m}{\cos(40^\circ)} = 0.40 m$$

- 4) Se calculó la velocidad del flujo en el espaciamiento de las barras para la criba como el cociente del caudal alimentado y el espacio disponible para que el agua atravesase la criba.

$$V_{entre\ barras} = \frac{Q}{(B - N_{barras} * D_{barras}) * H_{agua}}$$

(Ecuación 110)

- 5) Se obtuvo la pérdida de energía de las cribas limpias y sucias dado el coeficiente empírico de pérdida de energía por turbulencia, la aceleración gravitacional, el flujo en el espaciamiento de las barras y la velocidad de aproximación en la alimentación del canal. La misma operación se hizo para las rejillas.

$$h_{limpia} = \frac{1}{C} * \left( \frac{V_{entre\ barras}^2 - V_{aprox}^2}{2 * g} \right)$$

(Ecuación 111)

$$h_{limpia} = \frac{1}{0.7} * \left( \frac{\left( (0.46 \frac{m}{s})^2 - (0.30 \frac{m}{s})^2 \right)}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} \right) = 0.0091 m$$

e. Diseño de tanques de homogeneización de caudal

- 1) Para determinar el volumen necesario de los tanques de homogeneización de caudal, se tabuló la cantidad de visitas al baño industrial de la fosa séptica 1 durante 8 días. Se supuso que por cada visita al mingitorio e inodoro habría una al lavamanos. Dado el caudal de cada aparato sanitario, se determinó el caudal de agua consumida en cada momento, por el baño industrial de la fosa séptica 1, como la cantidad de visitas a cada aparato y su caudal correspondiente.

$$Q_{instantáneo} = \sum_{i=1}^n Q_n * N_n$$

(Ecuación 112)

$$\begin{aligned} Q_{instantáneo} &= \left( 6.37E - 05 \frac{m^3}{s} \right) * (1 \text{ visita inodoro}) + \left( 1.84E - 05 \frac{m^3}{s} \right) \\ &* (1 \text{ visita lavamanos}) + \left( 1.35E - 04 \frac{m^3}{s} \right) * (0 \text{ visita mingitorio}) \\ &= 8.21E - 05 \frac{m^3}{s} \end{aligned}$$

- 2) Con el fin de conocer el volumen consumido de agua durante 24 horas, se calculó el promedio de los caudales de cada hora usando la ecuación (3) y se multiplicó por 3600 s. Finalmente, se obtuvo el volumen acumulado para cada hora del día por un día completo. El cálculo se realizó para el período de 1:00 a 2:00 horas del día 1.

$$\overline{Q_{horario}} = \frac{\sum Q}{n} = 1.29E - 07 \frac{m^3}{s}$$

$$\overline{V_{horario}} = \overline{Q_{horario}} * 3600s$$

(Ecuación 113)

$$\overline{V_{horario}} = 1.29E - 07 \frac{m^3}{s} * 3600 s = 4.65E - 04 \frac{m^3}{s}$$

$$V_{acumulado\ i} = \sum \overline{V_{horario}}$$

(Ecuación 114)

$$V_{acumulado\ i} = (4.48E - 04 + 4.64E - 04) \frac{m^3}{s} = 9.14E - 04 \frac{m^3}{s}$$

- 3) Cuando se establece el volumen mínimo gráficamente para los tanques, para cada uno de los 8 días tabulados, se indica el promedio y desviación estándar.

$$\overline{V_{min}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{min}}{n} = 4.09E - 03\ m^3$$

(Ecuación 115)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \overline{V_{min}})^2} = 2.26E - 03\ m^3$$

- 4) Se determinó el volumen efectivo del tanque de homogeneización realizando la división entre el volumen requerido por el baño industrial de la fosa séptica 1 y el número de tanques a instalar. De manera que este volumen estuviese dentro del rango dado por la desviación estándar y que el tiempo de retención estuviese próximo a 30 s.

$$V_{efectivo} = \frac{v}{n_{tanques}}$$

(Ecuación 116)

$$V_{efectivo} = \frac{1.30\ m^3}{2} = 0.65\ m^3$$

$$t = \frac{V_{efectivo}}{Q} \approx 30\ s$$

$$t = \frac{0.65\ m^3}{0.1942 \frac{m^3}{s}} = 36.88\ s$$

- 5) Se obtuvo el volumen de diseño al multiplicar el factor de seguridad por el volumen efectivo de cada tanque.

$$V_{diseño} = (1 + f) * V_{efectivo}$$

(Ecuación 117)

$$V_{diseño} = (1 + 0.20) * 0.65m^3 = 0.78\ m^3$$

- 6) Para obtener un pre dimensionamiento, se calculó el diámetro del tanque al sustituir la relación altura – diámetro dentro de la definición del volumen de un cilindro. Se obtuvo la altura a partir del diámetro y la relación altura - diámetro dada para el tanque de homogeneización. Dicha relación se corroboró con el diámetro y la altura definida para los tanques.

$$\frac{H}{D} = 1.5$$

(Ecuación 118)

$$H = 1.5 * D$$

$$V_{diseño} = \frac{\pi * D^2}{4} * H$$

(Ecuación 119)

$$V_{diseño} = \frac{1.5 * \pi * D^3}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{diseño}}{1.5 * \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 0.78 \text{ m}^3}{1.5 * \pi}} = 0.87 \text{ m}$$

$$H = 1.5 * 0.87 \text{ m} = 1.31 \text{ m}$$

f. Diseño del sedimentador primario

- 1) Se determinó el espaciamiento entre las columnas y filas de orificios en la pantalla de difusión de entrada como el cociente de las dimensiones de la pantalla y la unidad más el número de columnas o filas. Estas dimensiones corresponden al ancho y a la altura de la pantalla, para columnas y filas, respectivamente.

$$d_{centros} = \frac{B}{N_{columnas} + 1}$$

(Ecuación 120)

$$d_{centros} = \frac{3.50 \text{ m}}{9 + 1} = 0.35 \text{ m}$$

- 2) Se calculó la profundidad de la pendiente para recolectar los lodos dentro del sedimentador primario. Para ello, se estableció el punto de recolección de lodos, 0.5 m, y la longitud desde dicho punto hasta el extremo opuesto del sedimentador. Se multiplicó la longitud desde el punto de recolección y la pendiente longitudinal.

$$L_{lodos} = L_{sedimentador} - x$$

(Ecuación 121)

$$L_{lodos} = 10.70m - 1.0 m = 10.00m$$

$$P_{longitudinal} = \frac{H_{lodos}}{L_{lodos}} = 0.1$$

(Ecuación 122)

$$H_{lodos} = 0.1 * L_{lodos}$$

$$H_{lodos} = 0.1 * 10.00m = 0.860m$$

- 3) Con las propiedades de las partículas sedimentables, se obtuvo el número de Reynolds que describe el régimen de flujo laminar. Este se define como la operación de la carga superficial por el diámetro de partícula sedimentable sobre la viscosidad cinemática a una temperatura dada. Se verificó que este fuese menor a 1000 para poder usar la Ley de Stokes en el cálculo de velocidad de sedimentación.

$$Re = \frac{CS * D}{\nu} < 1000$$

(Ecuación 123)

$$Re = \frac{0.00012 \frac{m}{s} * 0.0001m}{0.000000893 \frac{m^2}{s}} = 0.010$$

- 4) Se determinó la velocidad de sedimentación en función del coeficiente de arrastre, la aceleración gravitacional, la densidad relativa y el diámetro de las partículas sedimentables.

$$Cd = \frac{24}{Re}$$

(Ecuación 124)

$$Cd = \frac{24}{0.010} = 2315$$

$$V_s = \frac{g * (\rho_{relativa} - 1) * D^2}{18 * \nu}$$

(Ecuación 125)

$$V_s = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * (1.4 - 1) * (0.001m)^2}{18 * 0.000000893 \frac{m^2}{s}} = 0.002 \frac{m}{s}$$

- 5) Se determinó el área superficial como el cociente entre el caudal y la carga superficial.

$$A_s = \frac{Q}{CS}$$

(Ecuación 126)

$$A_s = \frac{0.01942 \frac{m^3}{s}}{0.00012 \frac{m}{s}} = 31.73 m^2$$

- 6) Se investigó la expresión del porcentaje de remoción de DBO y SST. Se estableció el porcentaje de remoción en base al tiempo de retención hidráulico y dos constantes, a y b, obtenidas de la bibliografía para el sedimentador primario.

$$R_{DBO} = \frac{t}{a + bt}$$

(Ecuación 127)

$$R_{DBO} = \frac{1h}{0.018 + 0.02 * 1h} = 27.54\%$$

- 7) Se introdujo la concentración de DBO alimentada al sedimentador primario y el porcentaje de remoción común para dicho proceso, con el fin de conocer la concentración final. Dicho cálculo se usó tanto para SST y DQO, cada uno con su respectivo porcentaje de remoción.

$$DBO_{final} = DBO_{inicial} * (1 - R_{DBO})$$

(Ecuación 128)

$$DBO_{final} = 0.499 \frac{kg}{m^3} * (1 - 0.2754) = 0.361 kg/m^3$$

- 8) Usando las densidades relativas de las partículas sedimentables húmedas y secas y el porcentaje de humedad de los lodos descargados del sedimentador, se calculó la densidad del agua residual descargada del tratamiento primario. Para ello, se supuso que las densidades de las partículas sedimentables y el agua residual se mantuvieron constantes. Este valor representa la densidad del

agua en cuya composición se menciona una pequeña cantidad de aceite y grasas, así también de partículas sedimentables no removidas por los tratamientos.

$$\rho_{partículas\ húmedas} = [\rho_{partículas\ secas} * (1 - H)] + [\rho_{agua\ residual} * H]$$

(Ecuación 129)

$$\rho_{agua\ residual} = \frac{\rho_{partículas\ húmedas} - [\rho_{partículas\ secas} * (1 - H)]}{H}$$

$$\rho_{agua\ residual} = \frac{1020\ kg/m^3 - [1400\ kg/m^3 * (1 - 0.95)]}{0.95} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

- 9) Se determinó la densidad del agua residual saliente del sedimentador primario utilizando las densidades relativas de las partículas sedimentables secas y húmedas, así como de la composición de los lodos descargados del sedimentador primario.

$$\rho_{agua\ residual} = \rho_{agua} (1 - X_{partículas\ sedimentables}) + \rho_{partículas\ sedimentables} X_{partículas\ sedimentables}$$

(Ecuación 130)

$$\rho_{agua} = \frac{\rho_{agua\ residual} - \rho_{partículas\ sedimentables} X_{partículas\ sedimentables}}{(1 - X_{partículas\ sedimentables})}$$

$$\rho_{agua} = \frac{1020\ \frac{kg}{m^3} - (1400\ \frac{kg}{m^3} * 0.95)}{(1 - 0.95)} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

- 10) Se calculó la concentración de las aguas libres de aceites y grasas y partículas sedimentables como la diferencia entre las concentraciones del agua residual y sus componentes.

$$C_{agua} = C_{aguas\ residuales} - \sum C_{componentes}$$

(Ecuación 131)

$$C_{agua} = 1000\ \frac{kg}{m^3} - \left(0.102\ \frac{kg}{m^3} + 0.004\ \frac{kg}{m^3}\right) = 999.895\ \frac{kg}{m^3}$$

- 11) Se determinó el cociente entre la densidad sobre el caudal de cada componente para conocer su flujo másico. Se sumó cada componente para conocer el flujo másico de aguas residuales.

$$\dot{m} = \frac{\rho}{Q}$$

(Ecuación 132)

$$m_{aceites\ y\ grasas} = \frac{835.75 \frac{kg}{m^3}}{7.44 E - 08 \frac{m^3}{s}} = 6E - 05 \frac{kg}{s}$$

$$m_{tot} = 17.59 \frac{kg}{s}$$

12) Se calcularon las fracciones másicas como la división entre el flujo másico de un componente por el flujo másico total.

$$X_{aceites\ y\ grasas} = \frac{m_{aceites\ y\ grasas}}{m_{tot}}$$

(Ecuación 133)

$$X_{aceites\ y\ grasas} = \frac{6E - 05\ kg/s}{17.59\ kg/s} = 4E - 06$$

### 3. Datos calculados

Tabla 134. Contabilización de unidades de agua residual para los servicios en el ingenio azucarero.

Servicio	Cantidad diaria	Unidad
Salón de actos	30	Sillas
Hotel	24	Huésped
	10	Empleado
Estación de servicio	532	Vehículos
	6	Empleado
Lavandería	3	Lavadora
Tienda	10	Empleado

Tabla 135. Caudal de agua residual para los servicios en el ingenio azucarero.

Servicio	Caudal ( $m^3/s$ )
Salón de actos	3.94 E-06
Hotel	4.20 E-05
	4.38 E-06
Estación de servicio	2.79 E-04
	3.41 E-06
Lavandería	7.22 E-05
Tienda	4.38 E-06

Tabla 136. Promedio y desviación estándar de huéspedes en el hotel del ingenio azucarero en zafra.

Estadística	Valor	
	Huéspedes / mes	Huéspedes / d
Promedio	656	24
Desviación estándar	56	2

Tabla 137. Caudal y consumo por visita de los lavamanos en el ingenio azucarero.

Lavamanos	Corrida	Caudal ( $m^3/s$ )	Consumo ( $m^3/visita$ )	Propagación de error ( $m^3/visita$ )
Hombres	1	1.55 E-04	4.71 E-03	1.29E-05
	2	1.46 E-04	4.43 E-03	1.22E-05
	3	1.47 E-04	4.46 E-03	1.23E-05
Mujeres	1	1.45 E-04	4.39 E-03	1.21E-05
	2	1.46 E-04	4.42 E-03	1.21E-05
	3	1.38 E-04	4.19 E-03	1.15E-05

Tabla 138. Promedio y desviación estándar del consumo de agua por visita de los lavamanos en el ingenio azucarero.

Estadística	Consumo ( $m^3/visita$ )
Promedio	4.43E-03
Desviación estándar	1.65E-04

Tabla 139. Caudal y consumo por visita de las duchas en el ingenio azucarero.

Duchas	Corrida	Caudal ( $m^3/s$ )	Consumo ( $m^3/visita$ )	Propagación de error ( $m^3/visita$ )
Hombres	1	1.30 E-03	3.11 E-01	4.52E-05
	2	1.37 E-03	3.28 E-01	4.79E-05
	3	1.31 E-03	3.14 E-01	4.56E-05
Mujeres	1	1.54 E-04	3.69 E-02	1.28E-05
	2	1.85 E-04	4.43 E-02	1.54E-05
	3	1.72 E-04	4.12 E-02	1.43E-05

Tabla 140. Promedio y desviación estándar del consumo de agua por visita de las duchas de hombres en el ingenio azucarero.

Estadística	Consumo ( $m^3$ /visita)
Promedio	3.17E-01
Desviación estándar	9.13E-03

Tabla 141. Caudal del mingitorio de pared con 34 puntos de descarga en el ingenio azucarero.

Punto	Caudal ( $m^3/s$ )	Propagación de error ( $m^3/s$ )
1	9E-06	3E-06
2	1.6E-06	3E-06
3	4E-06	2E-06
Promedio por punto	9E-06	
Desviación estándar por punto	6E-06	
Total	0.158	

Tabla 142. Crecimiento de personal contratado por el ingenio azucarero para la zafra a lo largo de los años.

Año	Crecimiento Porcentual
2015	-
2016	0.64%
2017	0.96%

Tabla 143. Promedio, desviación estándar y frecuencia de uso al sanitario de la fosa séptica 1 en el ingenio azucarero durante la zafra.

Estadística	Inodoro	Mingitorio	Total	Unidad
Promedio	96	72	169	Visitas/d
Desviación estándar	34	33	54	Visitas/d
Uso	11	14	28	Visitas/aparato*d

Tabla 144. Caudales para varios aparatos domésticos en el ingenio azucarero.

No.	Aparato	Caudal ( $m^3/s$ )
1	Mingitorio de pared	1.58E-04
2	Mingitorio de porcelana	3.52E-06
3	Inodoro de tanque	7.49E-05
4	Inodoro de fluxómetro	1.86E-05
5	Lavamanos	2.16E-05
6	Ducha	3.32E-05
7	Pila	1.76E-04

Tabla 145. Caudal del consumo de agua habitual de agua para varios aparatos domésticos por el Método por Dotación, en el ingenio azucarero.

Fosa Séptica	Caudal ( $m^3/s$ )						
	MPA <sup>1</sup>	MPO <sup>2</sup>	IT <sup>3</sup>	IFL <sup>4</sup>	LM <sup>5</sup>	D <sup>6</sup>	P <sup>8</sup>
1	9.50E-04	0.00E+00	0.00E+00	1.67E-04	1.30E-04	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00E+00	3.52E-06	5.99E-04	0.00E+00	1.73E-04	3.32E-05	0.00E+00
3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.41E-04	2.60E-04	9.97E-05	0.00E+00
4	0.00E+00	0.00E+00	7.49E-05	0.00E+00	2.16E-05	3.32E-05	0.00E+00
5	0.00E+00	0.00E+00	1.50E-04	0.00E+00	4.33E-05	6.64E-05	3.52E-04
6	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8	0.00E+00	0.00E+00	7.49E-05	0.00E+00	4.33E-05	1.33E-04	0.00E+00
9	0.00E+00	0.00E+00	4.49E-04	0.00E+00	1.52E-04	0.00E+00	1.76E-04
10	0.00E+00	0.00E+00	4.49E-04	0.00E+00	1.30E-04	0.00E+00	0.00E+00
11	0.00E+00	1.41E-05	7.49E-04	9.28E-05	3.68E-04	0.00E+00	0.00E+00
12	0.00E+00	0.00E+00	3.74E-04	0.00E+00	1.30E-04	6.64E-05	0.00E+00
13	0.00E+00	0.00E+00	4.49E-04	0.00E+00	1.95E-04	1.33E-04	0.00E+00
14	0.00E+00	0.00E+00	1.50E-04	0.00E+00	4.33E-05	3.32E-05	1.76E-04
15	9.50E-04	0.00E+00	5.99E-04	0.00E+00	3.03E-04	3.99E-04	1.76E-04
16	0.00E+00	1.76E-05	2.25E-04	0.00E+00	1.30E-04	3.65E-04	0.00E+00
17	0.00E+00	0.00E+00	7.49E-05	0.00E+00	2.16E-05	6.64E-05	0.00E+00
18	0.00E+00	0.00E+00	7.49E-05	0.00E+00	2.16E-05	0.00E+00	0.00E+00
19	0.00E+00	7.03E-06	0.00E+00	3.71E-05	6.49E-05	0.00E+00	0.00E+00
20	0.00E+00	0.00E+00	4.49E-04	0.00E+00	1.30E-04	0.00E+00	0.00E+00
21	0.00E+00	3.87E-05	0.00E+00	4.83E-04	5.20E-04	2.76E-03	0.00E+00
22	0.00E+00	0.00E+00	7.49E-05	0.00E+00	2.16E-05	3.32E-05	1.76E-04
23	0.00E+00	0.00E+00	7.49E-05	0.00E+00	2.16E-05	0.00E+00	0.00E+00
24	0.00E+00	3.52E-06	1.50E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.52E-04
25	0.00E+00	0.00E+00	8.99E-04	0.00E+00	2.60E-04	0.00E+00	1.76E-04
26	0.00E+00	7.03E-06	7.49E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
27	0.00E+00	1.06E-05	5.24E-04	0.00E+00	1.52E-04	2.99E-04	0.00E+00
Subtotal	1.90E-03	1.02E-04	6.74E-03	1.02E-03	3.33E-03	4.52E-03	1.59E-03
Total	1.92E-02						

<sup>1</sup> Mingitorio de pared

<sup>4</sup> Inodoro de fluxómetro

<sup>8</sup> Pila

<sup>2</sup> Mingitorio de porcelana

<sup>5</sup> Lavamanos

<sup>3</sup> Inodoro de tanque

<sup>6</sup> Ducha

Tabla 146. Caudal del consumo de agua habitual de agua para varios aparatos domésticos por el Método de Hunter, en el ingenio azucarero.

Fosa Séptica	Unidades Hunter								
	MPA <sup>1</sup>	MPO <sup>2</sup>	IT <sup>3</sup>	IFL <sup>4</sup>	LM <sup>5</sup>	D <sup>6</sup>	LAU <sup>7</sup>	P <sup>8</sup>	LT <sup>9</sup>
1	18	0	0	54	4.5	0	0	0	0
2	0	6	24	0	6	1.5	0	0	0
3	0	0	0	78	9	4.5	0	0	0
4	0	0	3	0	0.75	1.5	0	0	0
5	0	0	6	0	1.5	3	0	4.5	0
6	0	0	36	0	12	18	6.75	4.5	0
7	0	0	48	0	12	24	0	0	0
8	0	0	3	0	1.5	6	0	0	0
9	0	0	18	0	5.25	0	0	2.25	0
10	0	0	18	0	4.5	0	0	0	0
11	0	24	30	30	12.75	0	0	0	0
12	0	0	15	0	4.5	3	0	0	0
13	0	0	24	0	9	6	0	0	1.5
14	0	0	6	0	1.5	1.5	0	2.25	3
15	18	0	24	0	10.5	18	0	2.25	0
16	0	30	9	0	4.5	16.5	0	0	0
17	0	0	3	0	0.75	3	0	0	0
18	0	0	3	0	0.75	0	0	0	0
19	0	12	0	12	2.25	0	0	0	0
20	0	0	18	0	4.5	0	0	0	0
21	0	66	0	156	18	124.5	0	0	0
22	0	0	3	0	0.75	1.5	0	2.25	0
23	0	0	9	0	3	1.5	0	0	1.5
24	0	6	6	0	0	0	0	4.5	0
25	0	0	36	0	9	0	0	2.25	0
26	0	12	3	0	0	0	0	0	0
27	0	18	21	0	5.25	13.5	0	0	0
Subtotal	36	174	366	330	144	247.5	6.75	24.75	6
Total	1335								

<sup>1</sup> Mingitorio de pared

<sup>5</sup> Lavamanos

<sup>9</sup> Lavatrastos

<sup>2</sup> Mingitorio de porcelana

<sup>6</sup> Ducha

<sup>3</sup> Inodoro de tanque

<sup>7</sup> Lavadora automática

<sup>4</sup> Inodoro de fluxómetro

<sup>8</sup> Pila

Tabla 147. Caracterización de la alimentación a la trampa de aceites y grasas de la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Compuesto	Concentración (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s)
Partículas sedimentables	0.200	1400.00	2.77E-06
Aceites y grasas	0.040	835.75	9.30E-07
Agua saliente del tratamiento primario	978.656	999.96	1.90E-02
Sólidos flotantes	17.600	800.00	4.27E-04
Agua residual total	996.496	996.50	1.94E-02

Tabla 148. Balance de masa para el agua residual en las etapas diseñadas para la trampa de aceites y grasas de la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia del ingenio azucarero.

Entrada			Salida		
Compuesto	Fracción másica	Flujo másico (kg/s)	Compuesto	Fracción másica	Flujo másico (kg/s)
Agua	0.98208	18.99086	Agua	0.982118	18.99086
Partículas sedimentables	0.00020	0.00388	Partículas sedimentables	0.000201	0.00388
Aceites y Grasas	0.00004	0.00078	Aceites y Grasas	0.000003	0.00006
Sólidos flotantes	0.01768	0.34184	Sólidos flotantes	0.017678	0.34184
Total	1.00000	19.35463	Total	1.000000	19.33665
			Aceites y Grasas	1.00	0.00071
			Total	1.00	0.00071

Tabla 149. Características del aceite y la trampa de aceites y grasas diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Característica	Valor	Unidades
Velocidad de ascenso del glóbulo de aceite	53217	m/s
Relación área superficial – caudal	250	$\frac{\text{m}^2}{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}$

Tabla 150. Determinación del factor de compensación de la trampa de aceites y grasas diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Variable	Valor	Unidades
Velocidad horizontal calculada	0.062	m/s
Velocidad horizontal teórica	0.015	m/s
Relación velocidad horizontal – velocidad de ascenso	3.65	
Factor de compensación por turbulencia	1.09	
Factor de compensación por cortocircuito	1.20	
Factor de compensación	1.30	
Área horizontal mínima	5.13	m <sup>2</sup>
Carga superficial	0.0038	m/s

Tabla 151. Especificaciones de la pantalla de distribución de la trampa de aceites y grasas diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Parámetro	Valor	Unidades
Ancho de la pantalla	2.00	m
Altura de la pantalla	2.10	m
Columnas de orificios	12	Columnas
Filas de orificios	2	Filas
Número de orificios	24	orificios
Área total de orificios	0.1885	m <sup>2</sup>
Relación área de orificios de pantalla de distribución – área transversal	3.77	%
Velocidad de paso en la pantalla	0.10	m/s

Tabla 152. Parámetros del agua residual alimentada a la criba y malla en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Característica	Valor	Unidades
Temperatura	25	°C
Demanda Química de Oxígeno	0.903	kg/m <sup>3</sup>
Demanda Biológica de Oxígeno	0.611	kg/m <sup>3</sup>
Sólidos Suspendidos Totales	0.200	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 153. Caracterización del agua residual alimentada a la criba y malla en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Compuesto	Concentración (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s)	Fracción másica
Partículas sedimentables	0.200	1400.00	1.47E-06	0.000201
Aceites y grasas	0.003	835.75	7.44E-08	0.000003
Agua saliente del tratamiento primario	978.929	999.96	1.90E-02	0.982118
Sólidos flotantes	17.621	800.00	4.27E-04	0.017678
Agua residual total	996.753	835.75	1.94E-02	1.000000

Tabla 154. Pérdida de energía en criba limpia y sucia diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Variable	Valor	Unidades
Caudal de alimentación	0.1942	m <sup>3</sup> /s
Velocidad de aproximación en la alimentación del canal	0.30	m/s
Velocidad de flujo en el espaciamiento de las barras	0.46	m/s
Pérdida de energía en una rejilla limpia	0.0091	m
Pérdida de energía en una rejilla sucia	0.0335	m

Tabla 155. Pérdida de energía en malla limpia y sucia diseñada para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Variable	Valor	Unidades
Caudal de alimentación	0.1942	m <sup>3</sup> /s
Velocidad de aproximación en la alimentación del canal	0.30	m/s
Velocidad de flujo en el espaciamiento de las barras	0.42	m/s
Pérdida de energía en una rejilla limpia	0.0062	m
Pérdida de energía en una rejilla sucia	0.0258	m

Tabla 156. Balance de masa para el agua residual en el cribado para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Entrada			Salida		
Compuesto	Fracción másica	Flujo másico (kg/s)	Compuesto	Fracción másica	Flujo másico (kg/s)
Agua	0.98208	18.99086	Agua	0.999776	17.62351
Partículas sedimentables	0.00020	0.00388	Partículas sedimentables	0.000220	0.00388
Aceites y Grasas	0.00004	0.00078	Aceites y Grasas	0.000004	0.00006
Sólidos flotantes	0.01768	0.34184	Total	1.000000	17.62745
Total	1.00000	19.35463	Agua	0.80	1.3674
			Sólidos flotantes	0.20	0.3418
			Total	1.00	1.7092

Tabla 157. Caracterización del agua residual alimentada al canal Parshall en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Compuesto	Concentración (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s)
Partículas sedimentables	0.220	1400.00	1.47E-06
Aceites y grasas	0.004	835.75	7.44E-08
Agua saliente del tratamiento primario	1000.096	999.96	1.76E-02
Agua residual total	1000.320	1000.320	1.76E-02

Figura 116. Caudal horario del baño industrial de la fosa séptica 1 del ingenio azucarero.

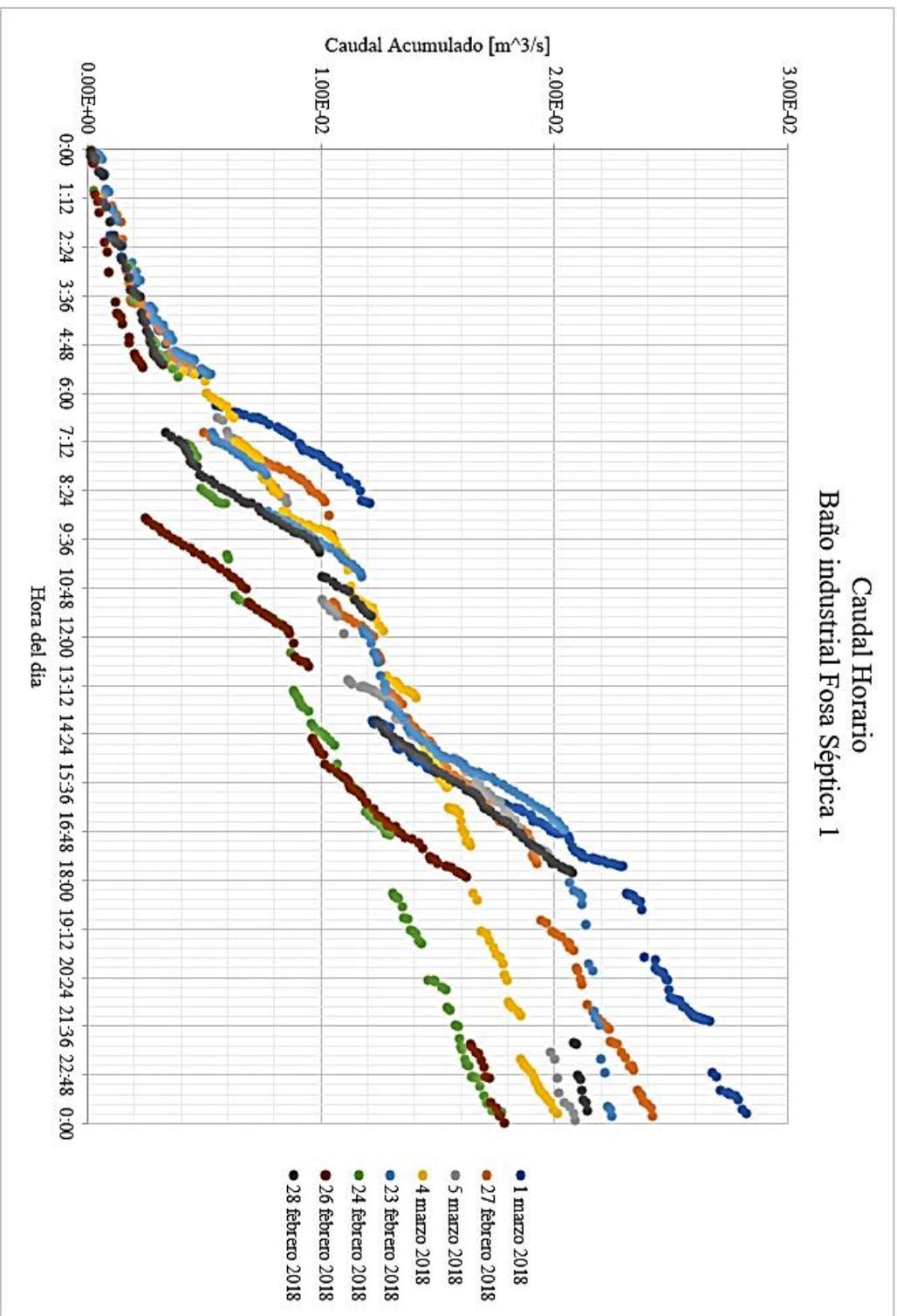


Tabla 158. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 1 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
0 a 1	1.25E-04	4.48E-01	4.48E-01
1 a 2	1.29E-04	4.65E-01	9.14E-01
2 a 3	8.21E-05	2.95E-01	1.21E+00
3 a 4	1.09E-04	3.91E-01	1.60E+00
4 a 5	8.85E-05	3.19E-01	1.92E+00
5 a 6	1.01E-04	3.65E-01	2.28E+00
6 a 7	8.21E-05	2.95E-01	2.58E+00
7 a 8	2.08E-04	7.50E-01	3.33E+00
8 a 9	1.66E-04	5.96E-01	3.93E+00
9 a 10	1.17E-04	4.23E-01	4.35E+00
10 a 11	0.00E+00	0.00E+00	4.35E+00
11 a 12	1.66E-04	5.96E-01	4.94E+00
12 a 13	1.17E-04	4.23E-01	5.37E+00
13 a 14	1.53E-04	5.51E-01	5.92E+00
14 a 15	1.25E-04	4.51E-01	6.37E+00
15 a 16	1.55E-04	5.57E-01	6.93E+00
16 a 17	1.68E-04	6.06E-01	7.53E+00
17 a 18	8.21E-05	2.95E-01	7.83E+00
18 a 19	0.00E+00	0.00E+00	7.83E+00
19 a 20	1.74E-04	6.25E-01	8.45E+00
20 a 21	1.49E-04	5.37E-01	8.99E+00
21 a 22	1.94E-04	6.98E-01	9.69E+00
22 a 23	1.37E-04	4.92E-01	1.02E+01
23 a 0	1.12E-04	4.05E-01	1.06E+01

Tabla 159. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 2 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	1.27E-04	4.57E-01	4.57E-01
1 a 2	1.53E-04	5.51E-01	1.01E+00
2 a 3	1.17E-04	4.23E-01	1.43E+00
3 a 4	1.10E-04	3.97E-01	1.83E+00
4 a 5	8.21E-05	2.95E-01	2.12E+00
5 a 6	8.21E-05	2.95E-01	2.42E+00
6 a 7	0.00E+00	0.00E+00	2.42E+00
7 a 8	1.49E-04	5.37E-01	2.96E+00
8 a 9	2.11E-04	7.58E-01	3.71E+00
9 a 10	1.93E-04	6.96E-01	4.41E+00
10 a 11	2.09E-04	7.54E-01	5.16E+00
11 a 12	1.86E-04	6.69E-01	5.83E+00
12 a 13	0.00E+00	0.00E+00	5.83E+00
13 a 14	0.00E+00	0.00E+00	5.83E+00
14 a 15	1.34E-04	4.83E-01	6.32E+00
15 a 16	1.64E-04	5.89E-01	6.90E+00
16 a 17	1.39E-04	5.02E-01	7.41E+00
17 a 18	1.62E-04	5.83E-01	7.99E+00
18 a 19	0.00E+00	0.00E+00	7.99E+00
19 a 20	0.00E+00	0.00E+00	7.99E+00
20 a 21	0.00E+00	0.00E+00	7.99E+00
21 a 22	0.00E+00	0.00E+00	7.99E+00
22 a 23	8.21E-05	2.95E-01	8.28E+00
23 a 0	1.27E-04	4.57E-01	4.57E-01

Tabla 160. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 3 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	1.10E-04	3.97E-01	3.97E-01
1 a 2	1.10E-04	3.97E-01	7.95E-01
2 a 3	1.17E-04	4.23E-01	1.22E+00
3 a 4	1.06E-04	3.80E-01	1.60E+00
4 a 5	1.07E-04	3.85E-01	1.98E+00
5 a 6	1.15E-04	4.13E-01	2.40E+00
6 a 7	0.00E+00	0.00E+00	2.40E+00
7 a 8	1.62E-04	5.83E-01	2.98E+00
8 a 9	1.17E-04	4.23E-01	3.40E+00
9 a 10	2.11E-04	7.61E-01	4.16E+00
10 a 11	1.76E-04	6.35E-01	4.80E+00
11 a 12	8.21E-05	2.95E-01	5.09E+00
12 a 13	9.62E-05	3.46E-01	5.44E+00
13 a 14	1.23E-04	4.41E-01	5.88E+00
14 a 15	1.63E-04	5.85E-01	6.47E+00
15 a 16	1.92E-04	6.90E-01	7.16E+00
16 a 17	2.02E-04	7.28E-01	7.88E+00
17 a 18	0.00E+00	0.00E+00	7.88E+00
18 a 19	1.72E-04	6.18E-01	8.50E+00
19 a 20	8.21E-05	2.95E-01	8.80E+00
20 a 21	1.17E-04	4.23E-01	9.22E+00
21 a 22	1.06E-04	3.80E-01	9.60E+00
22 a 23	1.17E-04	4.23E-01	1.00E+01
23 a 0	1.17E-04	4.23E-01	1.04E+01

Tabla 161. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 4 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	8.21E-05	2.95E-01	2.95E-01
1 a 2	8.21E-05	2.95E-01	5.91E-01
2 a 3	8.21E-05	2.95E-01	8.86E-01
3 a 4	8.21E-05	2.95E-01	1.18E+00
4 a 5	8.21E-05	2.95E-01	1.48E+00
5 a 6	8.21E-05	2.95E-01	1.77E+00
6 a 7	0.00E+00	0.00E+00	1.77E+00
7 a 8	0.00E+00	0.00E+00	1.77E+00
8 a 9	0.00E+00	0.00E+00	1.77E+00
9 a 10	2.00E-04	7.19E-01	2.49E+00
10 a 11	1.99E-04	7.15E-01	3.21E+00
11 a 12	1.88E-04	6.77E-01	3.88E+00
12 a 13	1.57E-04	5.67E-01	4.45E+00
13 a 14	0.00E+00	0.00E+00	4.45E+00
14 a 15	1.06E-04	3.80E-01	4.83E+00
15 a 16	1.38E-04	4.97E-01	5.33E+00
16 a 17	1.67E-04	6.02E-01	5.93E+00
17 a 18	1.90E-04	6.84E-01	6.61E+00
18 a 19	0.00E+00	0.00E+00	6.61E+00
19 a 20	0.00E+00	0.00E+00	6.61E+00
20 a 21	0.00E+00	0.00E+00	6.61E+00
21 a 22	0.00E+00	0.00E+00	6.61E+00
22 a 23	1.26E-04	4.55E-01	7.07E+00
23 a 0	1.27E-04	4.57E-01	7.52E+00

Tabla 162. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 5 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	8.21E-05	2.95E-01	2.95E-01
1 a 2	1.44E-04	5.19E-01	8.14E-01
2 a 3	9.98E-05	3.59E-01	1.17E+00
3 a 4	1.06E-04	3.80E-01	1.55E+00
4 a 5	1.53E-04	5.51E-01	2.10E+00
5 a 6	9.03E-05	3.25E-01	2.43E+00
6 a 7	0.00E+00	0.00E+00	2.43E+00
7 a 8	1.33E-04	4.79E-01	2.91E+00
8 a 9	1.54E-04	5.56E-01	3.46E+00
9 a 10	0.00E+00	0.00E+00	3.46E+00
10 a 11	8.21E-05	2.95E-01	3.76E+00
11 a 12	2.20E-04	7.92E-01	4.55E+00
12 a 13	2.35E-04	8.46E-01	5.40E+00
13 a 14	1.04E-04	3.74E-01	5.77E+00
14 a 15	1.55E-04	5.56E-01	6.33E+00
15 a 16	1.53E-04	5.51E-01	6.88E+00
16 a 17	1.53E-04	5.51E-01	7.43E+00
17 a 18	0.00E+00	0.00E+00	7.43E+00
18 a 19	1.02E-04	3.68E-01	7.80E+00
19 a 20	1.10E-04	3.97E-01	8.19E+00
20 a 21	2.19E-04	7.87E-01	8.98E+00
21 a 22	1.13E-04	4.06E-01	9.39E+00
22 a 23	9.98E-05	3.59E-01	9.75E+00
23 a 0	1.44E-04	5.20E-01	1.03E+01

Tabla 163. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 6 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	9.98E-05	3.59E-01	3.59E-01
1 a 2	1.41E-04	5.08E-01	8.67E-01
2 a 3	8.21E-05	2.95E-01	1.16E+00
3 a 4	8.21E-05	2.95E-01	1.46E+00
4 a 5	2.14E-04	7.72E-01	2.23E+00
5 a 6	1.94E-04	6.98E-01	2.93E+00
6 a 7	1.63E-04	5.87E-01	3.52E+00
7 a 8	1.49E-04	5.37E-01	4.05E+00
8 a 9	1.56E-04	5.62E-01	4.61E+00
9 a 10	1.34E-04	4.82E-01	5.10E+00
10 a 11	0.00E+00	0.00E+00	5.10E+00
11 a 12	1.56E-04	5.62E-01	5.66E+00
12 a 13	0.00E+00	0.00E+00	5.66E+00
13 a 14	1.32E-04	4.76E-01	6.13E+00
14 a 15	1.37E-04	4.94E-01	6.63E+00
15 a 16	1.41E-04	5.07E-01	7.14E+00
16 a 17	1.40E-04	5.04E-01	7.64E+00
17 a 18	1.55E-04	5.56E-01	8.20E+00
18 a 19	0.00E+00	0.00E+00	8.20E+00
19 a 20	0.00E+00	0.00E+00	8.20E+00
20 a 21	0.00E+00	0.00E+00	8.20E+00
21 a 22	0.00E+00	0.00E+00	8.20E+00
22 a 23	1.29E-04	4.65E-01	8.66E+00
23 a 0	9.98E-05	3.59E-01	3.59E-01

Tabla 164. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 7 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	1.17E-04	4.23E-01	4.23E-01
1 a 2	1.53E-04	5.51E-01	9.73E-01
2 a 3	1.23E-04	4.41E-01	1.41E+00
3 a 4	1.12E-04	4.05E-01	1.82E+00
4 a 5	1.10E-04	3.96E-01	2.22E+00
5 a 6	1.26E-04	4.52E-01	2.67E+00
6 a 7	1.56E-04	5.63E-01	3.23E+00
7 a 8	1.24E-04	4.47E-01	3.68E+00
8 a 9	1.48E-04	5.31E-01	4.21E+00
9 a 10	0.00E+00	0.00E+00	4.21E+00
10 a 11	0.00E+00	0.00E+00	4.21E+00
11 a 12	0.00E+00	0.00E+00	4.21E+00
12 a 13	0.00E+00	0.00E+00	4.21E+00
13 a 14	0.00E+00	0.00E+00	4.21E+00
14 a 15	1.30E-04	4.68E-01	4.68E+00
15 a 16	1.73E-04	6.23E-01	5.30E+00
16 a 17	1.60E-04	5.77E-01	5.88E+00
17 a 18	1.32E-04	4.74E-01	6.35E+00
18 a 19	1.14E-04	4.11E-01	6.76E+00
19 a 20	2.70E-04	9.73E-01	7.74E+00
20 a 21	8.80E-05	3.17E-01	8.05E+00
21 a 22	1.12E-04	4.02E-01	8.45E+00
22 a 23	1.17E-04	4.23E-01	8.88E+00
23 a 0	1.17E-04	4.23E-01	4.23E-01

Tabla 165. Obtención de la curva de volumen horario acumulado del día 8 para el baño industrial de la fosa séptica 1.

Período de tiempo	Caudal ( $m^3/s$ )	Volumen ( $m^3$ )	Volumen acumulado ( $m^3$ )
0 a 1	1.59E-04	5.71E-01	5.71E-01
1 a 2	1.41E-04	5.08E-01	1.08E+00
2 a 3	1.44E-04	5.20E-01	1.60E+00
3 a 4	1.53E-04	5.51E-01	2.15E+00
4 a 5	8.21E-05	2.95E-01	2.44E+00
5 a 6	1.84E-04	6.62E-01	3.11E+00
6 a 7	1.01E-04	3.63E-01	3.47E+00
7 a 8	8.75E-05	3.15E-01	3.78E+00
8 a 9	9.39E-05	3.38E-01	4.12E+00
9 a 10	1.57E-04	5.64E-01	4.69E+00
10 a 11	1.53E-04	5.51E-01	5.24E+00
11 a 12	1.13E-04	4.05E-01	5.64E+00
12 a 13	0.00E+00	0.00E+00	5.64E+00
13 a 14	1.19E-04	4.30E-01	6.07E+00
14 a 15	8.21E-05	2.95E-01	6.37E+00
15 a 16	8.21E-05	2.95E-01	6.66E+00
16 a 17	8.21E-05	2.95E-01	6.96E+00
17 a 18	8.21E-05	2.95E-01	7.25E+00
18 a 19	1.53E-04	5.51E-01	7.80E+00
19 a 20	1.67E-04	6.00E-01	8.40E+00
20 a 21	8.21E-05	2.95E-01	8.70E+00
21 a 22	1.13E-04	4.06E-01	9.10E+00
22 a 23	1.06E-04	3.80E-01	9.48E+00
23 a 0	1.06E-04	3.80E-01	9.86E+00

Tabla 166. Volúmenes del tanque de homogeneización dado por el volumen acumulado diario del baño 1 de la fosa séptica 1.

Día	Volumen ( $m^3$ )
1	5.49
2	3.67
3	4.84
4	7.60
5	5.87
6	1.79
7	0.95
8	2.54
Promedio	4.09
Desviación Estándar	2.26
Rango	1.83 – 6.35

Tabla 167. Determinación de la velocidad de sedimentación en el sedimentador primario diseñado para la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Parámetro	Valor	Unidades
Número de Reynolds	0.010	
Coefficiente de arrastre	2315	
Velocidad de sedimentación	0.0016	m/s
Velocidad horizontal	0.0025	m/s

Tabla 168. Porcentajes de remoción para los parámetros del agua residual saliente del sedimentador primario.

Parámetro	Valor	Unidades
Demanda Biológica de Oxígeno	28.37	%
Sólidos Suspendidos Totales	49.13	%

Tabla 169. Caracterización del agua residual alimentada a la laguna anaerobia cubierta en la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia.

Compuesto	Concentración (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s)	Fracción másica
Partículas sedimentables	0.104	1400.00	1.48E-06	0.000118
Aceites y grasas	0.004	835.75	7.44E-08	0.000004
Agua saliente del tratamiento primario	999.893	999.96	1.76E-02	0.999878
Agua residual total	1000.000	1000.00	1.76E-02	1.000000

Tabla 170. Balance de masa para el agua residual en las etapas diseñadas para el sedimentador primario de la planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia del ingenio azucarero.

Entrada			Salida		
Compuesto	Fracción másica	Flujo másico (kg/s)	Compuesto	Fracción másica	Flujo másico (kg/s)
Agua	0.999776	17.62351	Agua	0.999878	17.58917
Partículas sedimentables	0.000220	0.00388	Partículas sedimentables	0.000118	0.00208
Aceites y Grasas	0.000004	0.00006	Aceites y Grasas	0.000004	0.00006
Total	1.000000	17.62745	Total	1.000000	17.59130
			Agua	0.95	0.03434
			Partículas sedimentables	0.05	0.00181
			Total	1.00	0.03615

#### 4. Estudio topográfico

Figura 117. Delimitación del área en el ingenio para el estudio de nivel.

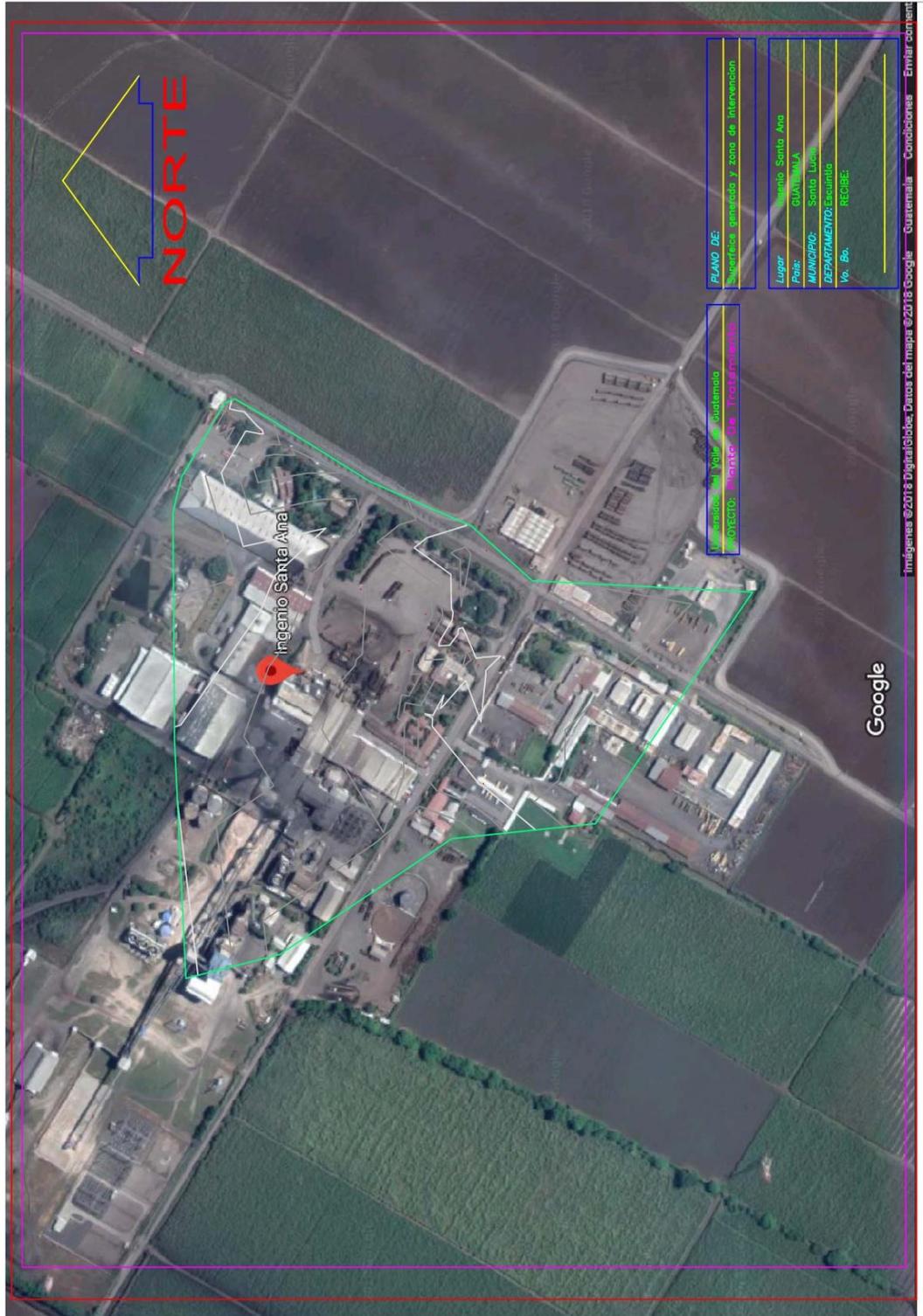


Figura 118. Curvas de nivel del área de estudio.

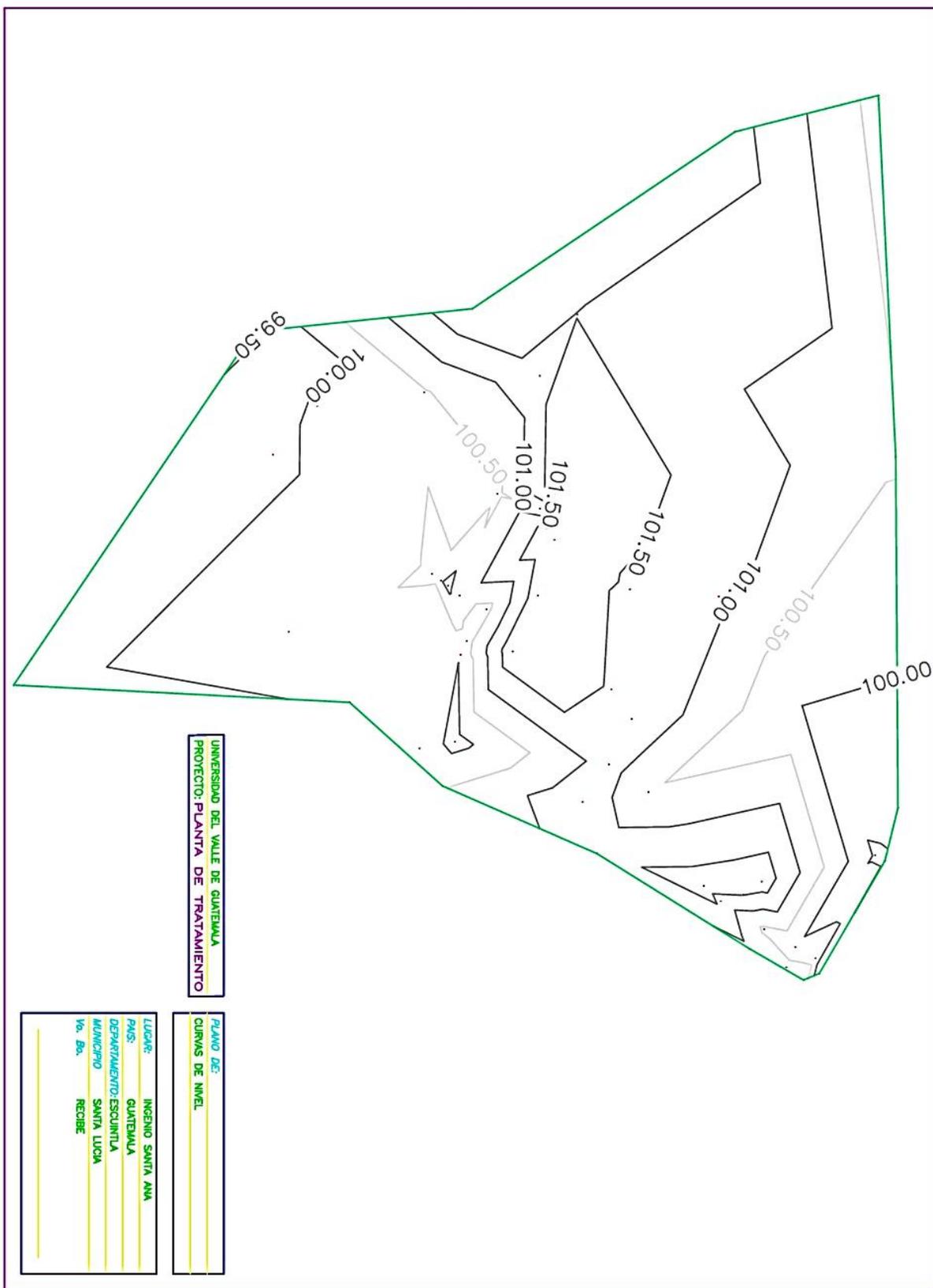
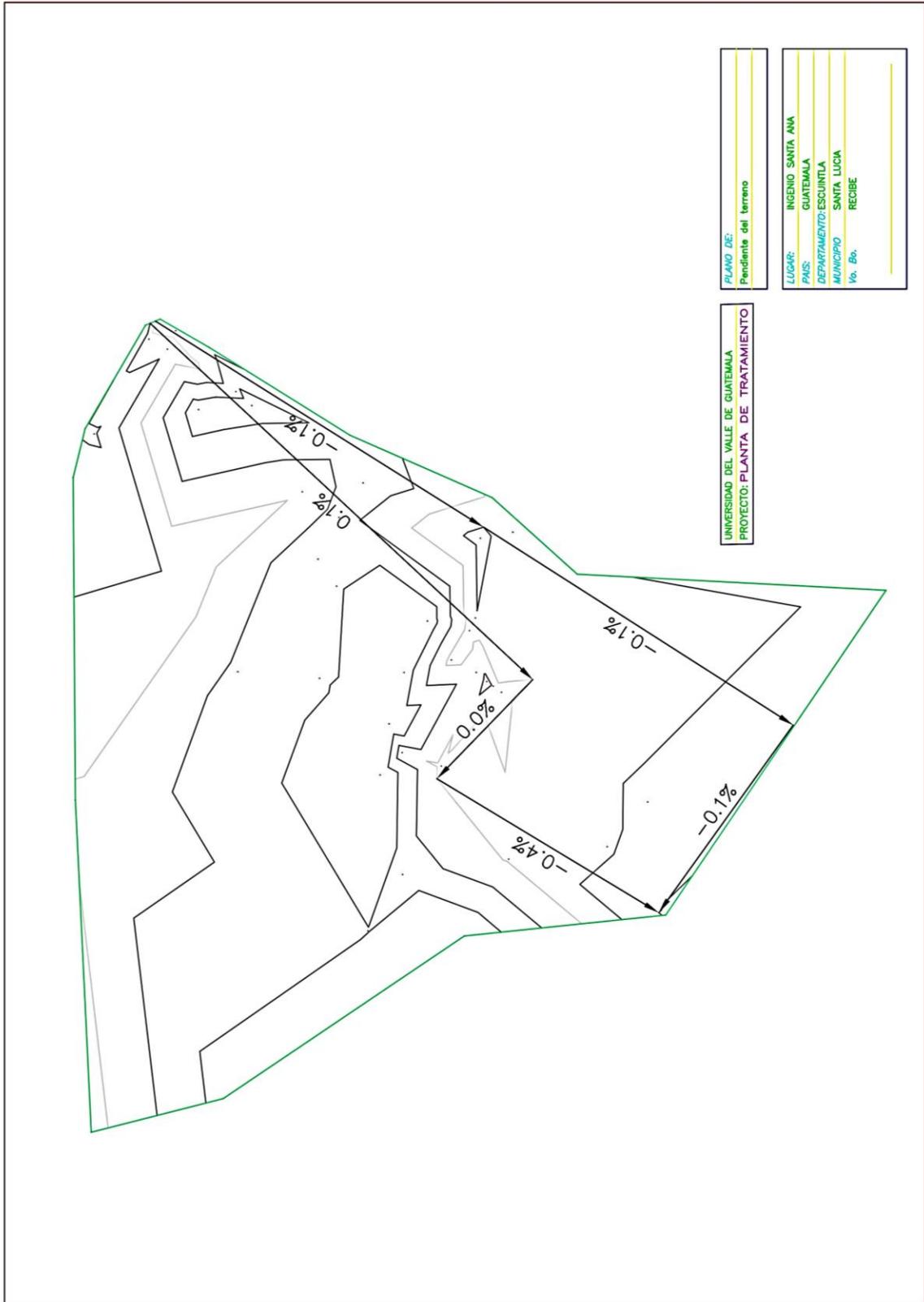


Figura 119. Pendiente porcentual del área de estudio hacia el punto de interés.



## B. Módulo 2: Diseño del tratamiento secundario de una planta anaeróbica de aguas residuales

### 1. Datos originales

#### a. Parámetros de diseño del tratamiento secundario

Tabla 171. Características de entrada al tratamiento secundario.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	1519.9	m <sup>3</sup> /d
DBO	367.0	mg/L
DQO	574.1	mg/L
SST	107.0	mg/L

Nota: Los valores de la Tabla 171 se obtuvieron de los cálculos realizados en el módulo "Diseño del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico".

Tabla 172. Temperatura promedio mensual en la estación de Concepción, Escuintla.

Mes	Año	Temperatura
2017	Agosto	24.58
	Septiembre	24.92
	Octubre	24.38
	Noviembre	24.74
	Diciembre	25.32
2018	Enero	25.35
	Febrero	25.28
	Marzo	25.53
	Abril	24.87
	Mayo	24.60
	Junio	24.35
	Julio	26.13
Promedio		25.00
Desviación estándar		0.53

Tabla 173. Elevación del ingenio azucarero.

Parámetro	Valor	Unidad
Elevación	150	metros sobre el nivel del mar

b. Caracterización del material de empaque

Tabla 174. Determinación del volumen total del lecho experimental.

Número de corrida	Masa de agua (g) [±0.1]	Temperatura (°C) [±0.5]
1	991.1	21.0
2	989.4	21.0
3	990.2	21.0

Tabla 175. Caracterización del lecho empacado al azar.

No. de corrida	Número de anillos	Masa empaque al azar (g) [±0.1]	Masa del empaque sumergido (g) [±0.1]	Temperatura (°C) [±0.5]
1	18	136.7	1025.7	23.0
2	18	147.3	1035.0	22.0
3	18	138.5	1024.5	21.5

## 2. Cálculos de muestra

### a. Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)

Cálculo No. 1 Caudal a tratar por filtro

$$Q_{filtro} = \frac{Q_{total}}{N}$$

(Ecuación 134)

$$Q_{filtro} = \frac{1519.9 \text{ m}^3/d}{2} = 759.9 \frac{\text{m}^3}{d}$$

Cálculo No. 2. Volumen nominal de los filtros

Por medio de iteraciones (ver Tabla 176), se estableció un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 17.5 h, a partir del cual se calculó el volumen nominal de los filtros:

$$V = Q_{filtro} * TRH$$

$$V = \left(759.9 \frac{\text{m}^3}{d}\right) (17.5 \text{ h}) \left(\frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}}\right) = 554.1 \text{ m}^3$$

Cálculo No. 3. Altura total de los filtros

Se establecieron las siguientes alturas: 1.0 m para el fondo ( $H_F$ ), 3.0 m para el lecho filtrante ( $H_L$ ) y 0.5 m para el borde superior ( $H_S$ ), las cuales dan una altura total de 4.5 m.

$$H_T = H_F + H_L + H_S$$

$$H_T = 1.0 \text{ m} + 3.0 \text{ m} + 0.5 \text{ m} = 4.5 \text{ m}$$

Cálculo No. 5. Área superficial de los filtros

$$A = \frac{V}{H_T}$$

(Ecuación 135)

$$A = \frac{554.1 \text{ m}^3}{4.5 \text{ m}} = 123.1 \text{ m}^2$$

Cálculo No. 6. Dimensiones de los filtros

En el caso de un tanque cuadrado, el largo es de:

$$l = a = \sqrt{A}$$

(Ecuación 136)

$$l = a = \sqrt{123.1 \text{ m}^2} = 11.10 \text{ m}$$

Cálculo No. 7. Razón de carga hidráulica

Se calculó la razón de carga hidráulica (RCH) para comprobar el caudal tratado por unidad de área:

$$RCH = \frac{Q_{\text{filtro}}}{A}$$

$$RCH = \frac{759.9 \text{ m}^3/d}{123.1 \text{ m}^2} = 6.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2d)$$

Cálculo No. 8. Carga orgánica volumétrica

Se calculó la carga de DBO tratada al día, por filtro:

$$C_{DBO} = Q_{\text{total}} * DBO_e$$

(Ecuación 137)

$$C_{DBO} = \left(759.9 \frac{\text{m}^3}{d}\right) * \left(367 \frac{\text{mg}}{L}\right) \left(\frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{mg}}{L}}\right) = 278.9 \text{ kg DBO}/d$$

Se comprobó la carga volumétrica de DBO en la totalidad del filtro:

$$C_V = \frac{C_{DBO}}{V}$$

(Ecuación 138)

$$C_V = \frac{278.9 \text{ kg DBO/d}}{554.1 \text{ m}^3} = 0.50 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3 \text{ d}}$$

Para comprobar la carga en el lecho filtrante, primero se calculó el volumen:

$$V_{lecho} = H_L * A$$

(Ecuación 139)

$$V_{lecho} = (3.0 \text{ m}) * (123.1 \text{ m}^2) = 369.4 \text{ m}^3$$

La carga volumétrica de lecho se calculó utilizando la carga total diaria de DBO y el volumen del lecho:

$$C_V = \frac{C_{DBO}}{V_{lecho}}$$

(Ecuación 140)

$$C_V = \frac{278.8 \text{ kg DBO/d}}{369.4 \text{ m}^3} = 0.75 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3 \text{ d}}$$

Cálculo No. 9. Velocidad ascendente de flujo

$$v_0 = \frac{Q_{filtro}}{A}$$

(Ecuación 141)

$$v_0 = \frac{713.2 \text{ m}^3/\text{d}}{115.6 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 0.26 \text{ m/h}$$

Cálculo No. 10. Eficiencia del sistema de FAFA

Se utilizó la siguiente ecuación del sistema con las constantes empíricas  $b = 0.87$  y  $m = 0.5$  para hallar la eficiencia de remoción de DBO y DQO:

$$\eta = 100[1 - b (TRH)^{-m}]$$

$$\eta = 100[1 - 0.87 * (17.5 \text{ h})^{-0.5}] = 79.20\%$$

Cálculo No. 11. Parámetros de salida para el sistema de FAFA

Se utilizaron las eficiencias de remoción para los parámetros de DBO, DQO y SST, así como sus valores de entrada, para calcular las concentraciones de salida:

$$S_s = S_e - \eta * S_e$$

$$S_s = \left(367 \frac{mg\ DBO}{L}\right) - (79.20\%) \left(367 \frac{mg\ DBO}{L}\right)$$

$$S_s = 76\ mg\ DBO/L$$

$$S_s = \left(574.1 \frac{mg\ DQO}{L}\right) - (79.20\%) \left(574.1 \frac{mg\ DQO}{L}\right)$$

$$S_s = 119\ mg\ DQO/L$$

$$S_s = \left(107 \frac{mg\ SST}{L}\right) - (60\%) \left(107 \frac{mg\ SST}{L}\right)$$

$$S_s = 43\ mg\ SST/L$$

Se multiplicó el caudal por la concentración de salida para encontrar la carga de DBO y DQO del afluente:

$$C_{DBO} = Q_s * S_s$$

(Ecuación 142)

$$C_{DBO} = \left(1517 \frac{m^3}{d}\right) \left(75 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \frac{kg}{m^3}}{1000 \frac{mg}{L}}\right) = 114.5 \frac{kg\ DBO}{d}$$

$$C_{DQO} = Q_s * S_s$$

$$C_{DQO} = \left(1517 \frac{m^3}{d}\right) \left(119 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \frac{kg}{m^3}}{1000 \frac{mg}{L}}\right) = 181.2 \frac{kg\ DBO}{d}$$

Cálculo No. 12. Producción de lodos con el sistema de FAFA

Se estableció el valor de 70 kg de sólidos secos producidos al día por cada 1000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada, de acuerdo con el rango de 60 a 80 kg dado por Metcalf & Eddy (2003) para filtros biológicos:

$$M_s = \left(\frac{70\ kg}{1000\ m^3}\right) * Q_{total}$$

(Ecuación 143)

$$V_L = \frac{M_s}{\rho_w S_{sl} P_s}$$

$$M_s = \left(\frac{70\ kg}{1000\ m^3}\right) \left(1519.9 \frac{m^3}{d}\right) = 106\ kg/d$$

$$V_L = \frac{M_s}{\rho_w S_{sl} P_s}$$

$$V_L = \frac{106 \text{ kg/d}}{\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (1.025)(0.04)} = 2.59 \text{ m}^3 \text{ lodos/d}$$

b. Caracterización del material de empaque para los FAFA

Cálculo No. 13. Volumen total del lecho empacado.

Se utilizó la densidad del agua y su masa para encontrar el volumen ocupado en el beaker vacío. Este volumen es igual al volumen total del lecho empacado.

$$V_{total} = \frac{m_{agua}}{\rho_{agua}}$$

(Ecuación 144)

$$V_{total} = \frac{990.2 \pm 0.1 \text{ g}}{0.99849 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = (991.7 \pm 0.1) \text{ mL} = (9.917 \pm 0.001) \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Cálculo No. 14. Volumen de espacios vacíos en el lecho empacado.

Se utilizó la masa de agua en el lecho y su densidad para determinar el volumen de espacios vacíos una vez que el lecho estuviera empacado con anillos.

$$V_{vacío} = \frac{m_{agua \text{ y empaque}} - m_{empaque}}{\rho_{agua}}$$

(Ecuación 145)

$$V_{vacío} = \frac{(1025.7 \pm 0.1 \text{ g}) - (136.7 \pm 0.1 \text{ g})}{0.99762 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = (891.1 \pm 0.1) \text{ mL} = (8.911 \pm 0.001) \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Cálculo No. 14. Área superficial por unidad de volumen del empaque

$$A_s = \pi * L * (D_e + D_i)$$

(Ecuación 146)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0.033 \text{ m}) [(0.0334 \text{ m}) + (0.0262 \text{ m})] = 6.179 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{anillo}}$$

$$\left(\frac{A_s}{V}\right)_{lecho} = \frac{N_{tubos} * A_s}{V}$$

(Ecuación 147)

$$\left(\frac{A_s}{V}\right)_{lecho} = \frac{(18 \text{ anillos}) * (6.179 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{anillo})}{(9.917 \pm 0.001) \times 10^{-4} \text{ m}^3} = (112.15 \pm 0.01) \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

Cálculo No. 15. Porosidad del empaque

$$\varepsilon = \frac{V_{vacíos}}{V_{total}}$$

(Ecuación 148)

$$\varepsilon = \frac{(8.894 \pm 0.001) \times 10^{-4} \text{ m}^3}{(9.917 \pm 0.001) \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 0.8969 \pm 0.0001$$

El valor se aproximó a 0.90.

Cálculo No. 16. Caída de presión en el lecho filtrante

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 * v * \mu * (1 - \varepsilon)^2}{\phi_s^2 * D_p^2 * \varepsilon^3} + \frac{1.75 * \rho * v^2 * (1 - \varepsilon)}{\phi_s * D_p * \varepsilon^3}$$

(Ecuación 149)

(McCabe, *et. al.* 2007)

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 \left(\frac{7.14 \times 10^{-5} \text{ m}}{\text{s}}\right) \left(0.00091 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right) (1 - 0.90)^2}{(0.33)^2 (0.0334 \text{ m})^2 (0.90)^3} + \frac{1.75 \left(999.64 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (7.14 \times 10^{-5} \text{ m/s})^2 (1 - 0.90)}{(0.33)(0.0334 \text{ m})(0.90)^3}$$

$$\frac{\Delta p}{L} = 0.0012 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

$$\Delta p = \left(0.0012 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}\right) (3.00 \text{ m}) = 0.0036 \text{ Pa}$$

Este valor de caída de presión se consideró despreciable.

Cálculo No. 17. Cantidad de tubería necesaria para el lecho filtrante

Se comenzó por calcular la densidad del bulto del empaque al azar.

$$\rho_{bulto} = \frac{m_{anillos}}{V}$$

(Ecuación 150)

$$\rho_{bulto} = \frac{(0.1408 \pm 0.0001) \text{ kg}}{(9.917 \pm 0.001) \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 142.0 \pm 0.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La densidad de bulto se multiplicó por el volumen a llenar de cada filtro.

$$m = \rho_{bulto} * V$$

(Ecuación 151)

$$m = \left(142.0 \pm 0.1 \frac{kg}{m^3}\right) (369.4 m^3) = 52,458 \pm 75 kg \approx 52.5 t$$

Se requiere de 52.5 t de empaque por filtro y 105 t en total.

Para conocer la cantidad de tubería necesaria para los filtros, se calculó la longitud que se necesita para llenar cierta cantidad de volumen con el empaque.

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{lecho} = \frac{N_{anillos} L}{V}$$

(Ecuación 152)

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{lecho} = \frac{(18)(0.034 m)}{(9.917 \pm 0.001) \times 10^{-4} m^3} = 617.1 \pm 0.1 \frac{m}{m^3}$$

Dicha relación se multiplicó por el volumen de lecho de cada filtro para obtener la longitud de tubería necesaria de cada filtro.

$$m = \left(\frac{L}{V}\right)_{lecho} * V$$

(Ecuación 153)

$$m = \left(617.1 \pm 0.1 \frac{m}{m^3}\right) (369.4 m^3) = 227,958 \pm 35 m$$

Por lo tanto, se requiere de 227,958 metros de tubería por cada filtro y de 455,916 metros en total.

### c. Laguna anaerobia de estabilización

Cálculo No. 18. Carga orgánica volumétrica

Según la Tabla 10, la mayor carga permisible a una temperatura de 25 °C es:

$$C_V = 10 * T + 100$$

(Ecuación 154)

$$C_V = 10 * (25 °C) + 100 = 350 \frac{g DBO}{m^3 d}$$

Después de iterar, (ver Tabla 185) se seleccionó un valor de carga orgánica de 250 g DBO/m<sup>3</sup>-d para el diseño, el cual es menor al máximo permisible calculado.

Cálculo No. 19. Volumen nominal de la laguna

$$V = \frac{S_e * Q_{total}}{C_v}$$

$$V = \frac{\left(367 \frac{mg\ DBO}{L}\right) \left(1519.9 \frac{m^3}{d}\right) \left(\frac{1\ g}{1000\ mg}\right)}{250 \frac{g}{m^3\ d}} = 2207\ m^3$$

Cálculo No. 20. Tiempo de retención hidráulica

Se comprobó que el tiempo de retención hidráulica (TRH) estuviera dentro de los valores aceptables.

$$TRH = \frac{V}{Q_{total}}$$

$$TRH = \frac{2207\ m^3}{1519.9 \frac{m^3}{d}} = 1.45\ d$$

Cálculo No. 21. Área superficial

Se estableció una profundidad de 5.00 metros para el líquido en la laguna. A partir de esta, se calculó el área superficial del líquido a la mitad de la profundidad de la laguna.

$$A = \frac{V}{H}$$

(Ecuación 155)

$$A = \frac{2207\ m^3}{5.00\ m} = 441.4\ m^2$$

Cálculo No. 22. Dimensiones

A partir del área superficial, se determinó el largo y ancho, estableciendo una relación igual a 2 entre ambas dimensiones. Estas dimensiones se dan a la mitad de la profundidad del líquido.

$$w = \sqrt{\frac{A}{R_{w/l}}}$$

(Ecuación 156)

$$w = \sqrt{\frac{441.4 \text{ m}^2}{2}} = 14.86 \text{ m}$$

Se aproximó el ancho a 15.0 m.

$$l = R_{w/l} * w$$

(Ecuación 157)

$$l = 2 * (15.0 \text{ m}) = 30.0 \text{ m}$$

A partir de la profundidad del líquido y su ancho y largo a la mitad de profundidad, se calcularon las dimensiones de corona (parte superior) y de base (parte inferior) de la laguna. Se estableció un borde libre (F) de 0.5 m sobre la profundidad del líquido y taludes a 45°, los cuales dan un factor de inclinación (n) igual a 1. Para el largo de la laguna:

$$L_{corona} = L + n(D + 2F)$$

(Ecuación 158)

$$L_{corona} = 30.0 \text{ m} + 1 * [5.0 \text{ m} + (2 * 0.5 \text{ m})] = 36.0 \text{ m}$$

$$L_{base} = L - nD$$

(Ecuación 159)

$$L_{base} = 30.0 \text{ m} - 1 * 5.0 \text{ m} = 25.0 \text{ m}$$

Para el ancho de la laguna:

$$W_{corona} = W + n(D + 2F)$$

(Ecuación 160)

$$W_{corona} = 15.0 \text{ m} + 1 * [5.0 \text{ m} + (2 * 0.5 \text{ m})] = 21.0 \text{ m}$$

$$W_{base} = W - nD$$

(Ecuación 161)

$$W_{base} = 15.0 \text{ m} - 1 * 5.0 \text{ m} = 10.0 \text{ m}$$

Cálculo No. 23. Eficiencia de remoción de DBO

Según la Tabla 10, para una temperatura de 25 °C:

$$\eta = 2 * T + 25$$

(Ecuación 162)

$$\eta = 2 * (25 \text{ }^\circ\text{C}) + 20 = 70\%$$

Cálculo No. 24. Parámetros de salida

Se utilizaron las eficiencias de remoción para los parámetros de DBO, DQO y SST, así como sus valores de entrada, para calcular las concentraciones de salida:

$$S_s = S_e - \eta * S_e$$

$$S_s = \left(367 \frac{\text{mg DBO}}{\text{L}}\right) - (70\%) \left(367 \frac{\text{mg DBO}}{\text{L}}\right)$$

$$S_s = 109 \text{ mg DBO/L}$$

$$S_s = \left(574.1 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}\right) - (40\%) \left(574.1 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}\right)$$

$$S_s = 344 \text{ mg DQO/L}$$

$$S_s = \left(107 \frac{\text{mg SST}}{\text{L}}\right) - (65\%) \left(107 \frac{\text{mg SST}}{\text{L}}\right)$$

$$S_s = 37 \text{ mg SST/L}$$

Se multiplicó el caudal por la concentración de salida para encontrar la carga de DBO y DQO del afluente:

$$C_{DBO} = Q_s * S_s$$

$$C_{DBO} = \left(1519 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \left(109 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \left(\frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}\right) = 165 \frac{\text{kg DBO}}{\text{d}}$$

$$C_{DQO} = Q_s * S_s$$

$$C_{DQO} = \left(1519 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \left(344 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \left(\frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}\right) = 523 \frac{\text{kg DBO}}{\text{d}}$$

Cálculo No. 25. Producción de lodos en la laguna cubierta anaerobia

Se utilizó la tasa de acumulación anual de lodos por persona de 0.04 m<sup>3</sup>, dada por Mara y Pearson (1998), y la población atendida por la planta de tratamiento.

$$Q_{\text{lodos}} = P * s$$

(Ecuación 163)

$$Q_{\text{lodos}} = (1470 \text{ personas}) \left( 0.04 \frac{\text{m}^3}{\text{persona} - \text{año}} \right) = 58.8 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{lodos}} = \left( 58.8 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \left( \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ d}} \right) = 0.16 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Cálculo No. 26. Frecuencia de descarga de lodos en la laguna cubierta anaerobia

$$n = \frac{V}{3 * P * s}$$

$$n = \frac{2207 \text{ m}^3}{3 * (1470 \text{ personas}) \left( 0.04 \frac{\text{m}^3}{\text{persona} - \text{a}} \right)} = 12.5 \text{ a}$$

Se aproximó el resultado a 12 años para la frecuencia de descarga de lodos.

d. Biogás

Cálculo No. 27. Corrección de la presión atmosférica a la altura del ingenio azucarero.

$$\frac{P_b}{P_a} = e^{\left[ \frac{-gMZ}{RT} \right]}$$

(Ecuación 164)

(Metcalf & Eddy, 2003)

En donde,

$P_a$  = Presión atmosférica, 101,325 Pa

$g$  = 9.81 m/s<sup>2</sup>

$M$  = masa molar del aire, 28.97 kg/kmol

$Z$  = elevación, m

$R$  = consante universal de gases, 8,314 J/kmol K

$T$  = temperatura, K = (273.15 + °C)

$$P_b = (101,325 \text{ Pa}) * e^{\left[ \frac{\left( \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left( \frac{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) (150 \text{ m})}{\left( \frac{8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol K}} \right) (298.15 \text{ K})} \right]}$$

$$P_b = 99,597 \text{ Pa}$$

Cálculo No. 28. Producción diaria de biogás.

Se realizó el mismo cálculo para ambos sistemas, se muestra como ejemplo el cálculo para los FAFAs. Primero, se calculó la carga de DQO reducida:

$$C_{DQO} = Q_{total} * (S_e - S_s)$$

(Ecuación 165)

$$C_{DQO} = \left(1519.9 \frac{m^3}{d}\right) * \left(574.1 \frac{mg}{L} - 119 \frac{mg}{L}\right) * \left(\frac{1 \frac{kg}{m^3}}{1000 \frac{mg}{L}}\right) = 775 \text{ kg DQO/d}$$

Luego, se determinaron los moles de metano producidos, de acuerdo con la relación 64 g DQO/moles de CH<sub>4</sub>:

$$\dot{n}_{CH_4} = \left(64 \frac{mol CH_4}{g DQO}\right) * C_{DQO}$$

(Ecuación 166)

$$\dot{n}_{CH_4} = \left(\frac{1 \text{ mol } CH_4}{64 \text{ g DQO}}\right) \left(775 \frac{\text{kg DQO}}{d}\right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}\right)$$

$$\dot{n}_{CH_4} = 1.211 \times 10^{-2} \frac{\text{mol } CH_4}{d} = 12.11 \frac{\text{kmol } CH_4}{d}$$

Assumiendo un contenido de 65% de metano en el biogás, se determinaron los moles de biogás producidos:

$$\dot{n}_{biogás} = \frac{\dot{n}_{CH_4}}{X_{CH_4}}$$

(Ecuación 167)

$$\dot{n}_{biogás} = \frac{12.11 \text{ kmol } CH_4/d}{0.65} = 18.64 \frac{\text{kmol biogás}}{d}$$

Luego, se estimó el volumen de biogás producido por día:

$$\dot{V}_{biogás} = \frac{\dot{n}_{biogás} RT}{P}$$

(Ecuación 168)

$$\dot{V}_{biogás} = \frac{(18.64 \text{ kmol}) \left(8.314 \times 10^3 \frac{J}{\text{kmol } K}\right) (298 \text{ K})}{(99,597 \text{ Pa})} = 464 \frac{m^3 \text{ biogás}}{d}$$

Por último, se asumió una composición de 34.7% mol de CO<sub>2</sub> y de 0.3% mol de H<sub>2</sub>S y de para calcular la masa de biogás producido:

$$\dot{m}_{biogás} = \dot{n}_{biogás} (X_{CH_4} M_{CH_4} + X_{CO_2} M_{CO_2} + X_{H_2S} M_{H_2S})$$

(Ecuación 169)

$$\dot{m}_{biogás} = \left(18.64 \frac{kmol}{d}\right) \left[ (0.65) \left(16.04 \frac{kg}{kmol}\right) + (0.347) \left(44.1 \frac{kg}{kmol}\right) + (0.003) \left(34.1 \frac{kg}{kmol}\right) \right]$$

$$\dot{m}_{biogás} = 481 \text{ kg/d}$$

#### e. Bombas y tuberías

Como ejemplo, se muestra el cálculo de las tuberías y bombas para la alimentación de los filtros anaerobios de flujo ascendente, a partir del primer sedimentador primario. Se siguió la misma secuencia de cálculos para calcular las tuberías y bombas requeridas para alimentar la laguna anaerobia. El diseño se realizó considerando tuberías de PVC. Las pérdidas por fricción se calcularon de forma individual para cada segmento de tubería con el mismo diámetro y caudal.

Cálculo No. 29. Diámetro de tubería y velocidad lineal de flujo.

Se estableció una velocidad lineal de flujo arbitraria de 2 m/s para estimar el diámetro.

$$A = \frac{Q}{v}$$

(Ecuación 170)

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} A}$$

(Ecuación 171)

$$A = \frac{1519.89 \frac{m^3}{d}}{2 \frac{m}{s}} \left( \frac{1 d}{24 h} \right) \left( \frac{1 h}{3600 s} \right) = 0.00880 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} (0.00880 \text{ m}^2)} = 0.1058 \text{ m}$$

Se aproximaron los diámetros internos de tubería a los más cercanos dados por los proveedores. En este caso, se aproximó al diámetro interno de 0.1015 m dado por la tubería de diámetro nominal de 10.16 cm (4 pulgadas). Con este diámetro, se corrigió la velocidad asumida:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0.1015 \text{ m})^2 = 0.00809 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1519.89 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0.00809 \text{ m}^2} \left( \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 2.17 \text{ m/s}$$

Cálculo No. 30. Pérdidas por fricción causadas por rugosidad de material

Se utilizó el Anexo F para determinar el factor de Fanning. Para ello, se calculó el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería de PVC. La rugosidad absoluta de este material es de 0.0015 mm (Escamilla y Rodríguez, 2004).

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

(Ecuación 172)

(McCabe, 2007)

$$Re = \frac{(0.1015 \text{ m}) \left( 2.17 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{0.00091 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 2.42 \times 10^5$$

$$\frac{k}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{101.5 \text{ mm}} = 0.00001$$

Del diagrama se leyó un factor de Fanning (f) igual a 0.0039.

Cálculo No. 31. Pérdidas por fricción causadas por accesorios

Se utilizaron los coeficientes de pérdidas por fricción en accesorios (Anexo G). En este segmento desde el sedimentador primero hasta la derivación hacia los FAFA se tiene: 1 válvula de compuerta abierta, 1 tee y 2 codos a 90°:

$$K_f = 0.17 + 0.4 + 2(0.75) = 2.07$$

Cálculo No. 32. Pérdidas por fricción causadas por expansiones.

Se calculó la pérdida de fricción por el paso de una tubería de diámetro interno 0.0773 m a una de 0.1015 m en la descarga de la bomba:

$$K_e = \left( 1 - \frac{D_a}{D_b} \right)^2$$

(Ecuación 173)

(McCabe, 2007)

$$K_e = \left(1 - \frac{0.0773 \text{ m}}{0.1015 \text{ m}}\right)^2 = 0.06$$

Cálculo No. 33. Pérdidas totales por fricción

$$h_f = \left(4f \frac{L}{D} + K_c + K_e + K_f\right) * \frac{v^2}{2}$$

(Ecuación 174)

(McCabe, 2007)

$$h_f = \left[4(0.0039) \frac{(8.25 \text{ m})}{(0.1015 \text{ m})} + 0 + 0.06 + 2.07\right] * \frac{\left(2.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 8.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Las pérdidas totales por fricción fueron de 11.73 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> para el segmento desde el segundo sedimentador hacia la derivación y de 6.00 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> para el segmento desde la derivación hasta la entrada de los FAFA.

Cálculo No. 34. Potencia de la bomba necesaria (WHP).

Se utilizó la ecuación de Bernoulli, tomando como punto “a” el líquido al nivel del sedimentador y como punto “b” el líquido al nivel de los FAFA para calcular la potencia aplicada al fluido.

$$\frac{p_a}{\rho} + gZ_a + \frac{v_a^2}{2} + \eta W_p = \frac{p_b}{\rho} + gZ_b + \frac{v_b^2}{2} + h_f$$

(Ecuación 175)

(McCabe, 2007)

Dado que ambos puntos se encuentran a nivel del suelo, los términos Z<sub>a</sub> y Z<sub>b</sub> se cancelan en la ecuación. La velocidad de ambos puntos se consideró igual a 0 m/s, por lo que se cancelan las variables v<sub>a</sub> y v<sub>b</sub>. Ambos tanques se encuentran a la misma presión, por lo que también se cancelan los términos p<sub>a</sub> y p<sub>b</sub>. La caída de presión en el lecho filtrante no se tomó en cuenta por ser despreciable.

$$\eta W_p = h_f$$

(Ecuación 176)

$$\eta W_p = (11.73 + 6.00) \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\eta W_p = 17.73 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Cálculo No. 35. Potencia del motor (BHP)

Se utilizó la curva característica de una bomba dada por un proveedor (Anexo H), las cuales se leyeron con el caudal y la cabeza total. Esta última fue calculada de la siguiente forma:

$$H = \frac{\eta W_p}{g}$$

(Ecuación 177)

(McCabe, 2007)

$$H = \frac{17.73 \frac{m^2}{s^2}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 1.81 m$$

Con un caudal de 1519.89 m<sup>3</sup>/d (63 m<sup>3</sup>/h), se determinó que se requiere un motor de 1.12 kW (1.5 hp).

Cálculo No. 36. Carga neta de succión positiva (NPSH) disponible.

Se comprobó que el NPSH disponible fuera mayor al valor teórico recomendado de 2 a 3 metros para bombas pequeñas (McCabe, et. al. 2007).

$$NPSH = \frac{1}{g} \left( \frac{p_a - p_v}{\rho} - h_{fs} \right) - Z_a$$

(Ecuación 178)

(McCabe, 2007)

$$NPSH = \frac{1}{9.8 \frac{m}{s^2}} \left( \frac{99,597 Pa - 3170 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3}} - 11.73 \right) - 0 m$$

$$NPSH = 8.64 m$$

### 3. Datos calculados intermedios

#### a. Diseño de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)

Tabla 176. Iteraciones realizadas para determinar el tiempo de retención hidráulica de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

No. de Iteración	Tiempo de retención hidráulica (h)	Volumen del filtro ( $m^3$ )	Razón de carga hidráulica ( $m^3/m^2-d$ )	Carga orgánica volumétrica total (kg DBO/ $m^3-d$ )	Carga orgánica volumétrica en el lecho (kg DBO/ $m^3-d$ )
1	6	190	18.00	1.45	2.18
2	8	253	13.50	1.09	1.63
3	10	317	10.80	0.87	1.31
4	12	380	9.00	0.73	1.09
5	15	475	7.20	0.58	0.87
6	17	538	6.35	0.51	0.77
7	17.5	554	6.17	0.50	0.75

Tabla 177. Datos intermedios en el dimensionamiento de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de retención hidráulica	17.5	h
Número de filtros	2	----
Caudal promedio	759.9	$m^3/d$
Volumen nominal	554.1	$m^3$
Área	123.2	$m^2$
Volumen del lecho filtrante	369.4	$m^3$

Tabla 178. Comprobación de la carga orgánica e hidráulica de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Carga orgánica	275.9	kg DBO/d
Carga orgánica volumétrica total	0.50	kg DBO/ $m^3-d$
Carga orgánica volumétrica en el lecho filtrante	0.75	kg DBO/ $m^3-d$
Razón de carga hidráulica	6.17	$m^3/m^2-d$

Tabla 179. Eficiencias de remoción del sistema de filtros anaerobios de flujo ascendente.

Parámetro	Eficiencia
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	79.2 %
Demanda química de oxígeno (DQO)	79.2 %
Sólidos suspendidos totales (SST)	60.0 %

Tabla 180. Caudal y concentración del afluente de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	1517.3	m <sup>3</sup> /d
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	75	mg/L
Demanda química de oxígeno (DQO)	119	mg/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	42	mg/L

Tabla 181. Producción de lodos en los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Sólidos secos	106	kg/d
Lodos húmedos	2660	kg/d
Volumen de lodos	2.59	m <sup>3</sup> /d
Volumen de lodos por descarga	38.9	m <sup>3</sup> /descarga

b. Caracterización del material de empaque de los FAFA

Tabla 182. Volumen total del lecho empacado.

Corrida	Volumen (cm <sup>3</sup> ) [±0.1]
1	992.6
2	990.9
3	991.7
Promedio	991.7
Desviación estándar	0.9

Tabla 183. Volumen de espacios vacíos en el lecho empacado experimental.

Corrida	Masa de agua (g) [±0.1]	Volumen de espacios vacíos (cm <sup>3</sup> ) [±0.1]
1	889.0	891.1
2	887.7	889.6
3	886.0	887.6
Promedio	887.6	889.4
Desviación estándar	1.5	1.8

Tabla 184. Características del lecho empacado.

Parámetro	Valor	Unidad
Porosidad	$0.8969 \pm 0.0001$	---
Área de contacto	61.79	cm <sup>2</sup> /anillo
Densidad de bulto	$142.0 \pm 0.1$	kg/m <sup>3</sup>
Relación largo-volumen	$617.1 \pm 0.1$	m/m <sup>3</sup>
Caída de presión	0.0036	Pa

c. Diseño de la laguna anaerobia de estabilización

Tabla 185. Iteraciones para determinar la carga orgánica volumétrica de la laguna anaerobia de estabilización.

Número de iteración	Carga orgánica volumétrica (kg DBO/m <sup>3</sup> -d)	Volumen nominal (m <sup>3</sup> )	Tiempo de retención hidráulica (d)
1	0.350	1576	1.04
2	0.250	2207	1.45

Tabla 186. Datos intermedios en el dimensionamiento de la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Número de lagunas	1	----
Carga orgánica volumétrica	0.250	kg DBO/m <sup>3</sup> -d
Volumen nominal	2207	m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulica	1.45	d
Altura del líquido	5.0	m
Área a profundidad media de líquido	441.4	m <sup>2</sup>
Relación largo-ancho	2	----
Largo a profundidad media de líquido	30.00	m
Ancho a profundidad media de líquido	15.00	m
Bordo libre	0.5	m

Tabla 187. Eficiencias de remoción de la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Eficiencia de remoción
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	70 %
Demanda química de oxígeno (DQO)	40 %
Sólidos suspendidos totales (SST)	65 %

Tabla 188. Caudal y concentración del afluente de la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	1519.7	m <sup>3</sup> /d
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	109	mg/L
Demanda química de oxígeno (DQO)	344	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	37	mg/L

Tabla 189. Producción de lodos en la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Producción anual	58.8	m <sup>3</sup> /a
Producción diaria	0.16	m <sup>3</sup> /d

d. Producción de biogás

Tabla 190. Producción de biogás en los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Presión atmosférica	99,597	Pa
Carga de DQO removida	775	kg/d
Cantidad de metano	12.11	kmol/d
Cantidad de biogás	18.64	kmol/d
Masa de biogás	481	kg/d
Concentración de metano (CH <sub>4</sub> )	65	% mol
Concentración de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	34.7	% mol
Concentración de sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0.03	% mol

Tabla 191. Producción de biogás en la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Presión atmosférica	99,597	Pa
Carga de DQO removida	349	kg/d
Cantidad de metano	5.45	kmol/d
Cantidad de biogás	8.39	kmol/d
Masa de biogás	216.5	kg/d
Concentración de metano (CH <sub>4</sub> )	65	% mol
Concentración de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	34.7	% mol
Concentración de sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0.03	% mol

e. Bombas y tuberías

Tabla 192. Datos intermedios en el diseño del sistema de transporte hacia los FAFA.

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad lineal	2.17	m/s
Factor de fricción de Fanning	0.0039	---
Pérdidas de fricción por accesorios	6.56	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Pérdidas de fricción por expansiones	0.06	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Pérdidas totales por fricción	17.74	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Cabeza total	1.81	m
NPSH disponible	8.64	m

Tabla 193. Accesorios necesarios para el transporte hacia los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Accesorio	Cantidad	Diámetro nominal
Válvula de compuerta	4	10.16 cm (4")
Codo a 90°	9	10.16 cm (4")
Te	3	10.16 cm (4")

Tabla 194. Especificaciones del sistema de transporte hacia los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Parámetro	Valor	Unidad
Material de tubería	PVC	---
Diámetro nominal de tubería	10.16	cm
Longitud de tubería	60	m
Potencia del motor	1.12	kW

Tabla 195. Datos intermedios en el diseño del sistema de transporte hacia la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad lineal	2.17	m/s
Factor de fricción de Fanning	0.0039	---
Pérdidas de fricción por accesorios	5.24	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Pérdidas de fricción por expansiones	0.06	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Pérdidas totales por fricción	20.2	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Cabeza total	2.07	m
NPSH disponible	9.84	m

Tabla 196. Accesorios necesarios para el transporte hacia la laguna anaerobia de estabilización.

Accesorio	Cantidad	Diámetro nominal
Válvula de compuerta	3	10.16 cm (4")
Codo a 90°	8	10.16 cm (4")
Te	2	10.16 cm (4")

Tabla 197. Especificaciones del sistema de transporte hacia la laguna anaerobia de estabilización.

Parámetro	Valor	Unidad
Material de tubería	PVC	---
Diámetro nominal de tubería	10.16	cm
Longitud de tubería	30	m
Potencia del motor	1.12	kW

- f. Artículos del Acuerdo Gubernativo 236-2006 relacionados a los niveles de materia orgánica

**Artículo 17. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.** Los entes generadores existentes deberán reducir en forma progresiva la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas residuales que descarguen a un cuerpo receptor, conforme a los valores y etapas de cumplimiento del cuadro siguiente:

Etapa		Uno				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once					
Duración, años	5					
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<6000	6000≤EG<12000	12000≤EG<25000	25000≤EG<50000	50000≤EG<250000	
Reducción porcentual	10	20	30	35	50	
Etapa		Dos				
Duración, años	4					
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince					
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5500	5500≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<50000	50000≤EG<125000	
Reducción porcentual	10	20	40	45	50	
Etapa		Tres				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte					
Duración, años	5					
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<65000		
Reducción porcentual	50	70	85	90		
Etapa		Cuatro				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro					
Duración, años	4					
Carga, kilogramos por día	3000<EG<4000			4000≤EG<7000		
Reducción porcentual	40			60		

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Para efectos de la aplicación del presente modelo, el valor inicial de descarga estará determinado en el Estudio Técnico. Dicho valor inicial, se refiere a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno. Para los porcentajes de reducción de la etapa uno, se utilizará el valor inicial de descarga del Estudio Técnico y para cada una de las etapas siguientes, la carga inicial será el resultado obtenido de la reducción porcentual de la etapa anterior.

**Artículo 18. DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.** Los entes generadores, en el Estudio Técnico, deberán incluir la determinación de la demanda química de oxígeno, a efecto de establecer su relación con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

**Artículo 19. META DE CUMPLIMIENTO.** La meta de cumplimiento, al finalizar las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas, se establece en tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. Los entes generadores existentes que alcancen y mantengan éstos valores habrán cumplido con la meta establecida en este artículo y con el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17 del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes que registren cargas menores o iguales a tres mil kilogramos por día, pero que registren valores mayores a doscientos miligramos por litro en el parámetro de calidad asociado, procederán a efectuar la reducción del valor de dicho parámetro de conformidad con los porcentajes correspondientes a la primera columna del lado izquierdo correspondiente a los rangos, en el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17, del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes de aguas residuales de tipo especial y ordinario que después de tratar dichas aguas, y que en cualesquiera de las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas alcancen y mantengan valores en el parámetro de calidad asociado, iguales o menores que cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

## C. Módulo 3: Diseño del sistema terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario

### 1. Memoria de cálculo de diseño de tanque aireado

Primero se deben realizar los cálculos necesarios para la determinación de las características del agua necesarias para el diseño.

Determinación de los sólidos suspendidos volátiles a partir de los sólidos suspendidos totales

Utilizando la Tabla 202. de anexos se obtuvo una relación del 78.04% de los SST son SSV.

$$SSV = 78.04\% * \frac{42g}{m^3} = \frac{32.78g}{m^3}$$

Con la Figura 148 y procedimiento se obtuvo el porcentaje de representación de sDBO, sDQO, respecto a DBO y DQO totales siendo estos de 26.37% y 39.72% respectivamente.

Determinación de la concentración de demanda química de oxígeno biodegradable

$$bDQO = 1.29 * \left(\frac{75g}{m^3}\right) = 96.75g/m^3$$

Determinación de demanda química de oxígeno no biodegradable

$$nbDQO = 119 g/m^3 - 96.75 g/m^3 = 22.25 g/m^3$$

Determinación de la demanda química de oxígeno soluble a partir de la demanda química de oxígeno total, se realizó un promedio ponderado de las aguas residuales características para diversos caudales y se determinó que la demanda química de oxígeno soluble representa un 39.72% de la demanda química de oxígeno total. De la misma manera se determinó que la demanda biológica de oxígeno soluble representa el 26.37% de la demanda biológica total.

Determinación de la demanda química de oxígeno soluble en el efluente

$$sDQO_e = (39.72\% * 119 g/m^3) - 1.6 * (26.37\% * 75 g/m^3) = 15.62 g/m^3$$

Determinación de la cantidad de sólidos suspendidos volátiles no biodegradables

$$\frac{bpDQO}{pDQO} = \frac{\left(\frac{96.75 \frac{g}{m^3}}{75 \frac{g}{m^3}}\right) (75 g/m^3 - 19.78 g/m^3)}{119 \frac{g}{m^3} - 47.27 \frac{g}{m^3}} = \frac{0.993g}{m^3}$$

$$nbVSS = \left(1 - 0.993 \frac{g}{m^3}\right) * 32.78 \frac{g}{m^3} = \frac{0.227g}{m^3}$$

Para realizar un diseño de un sistema de nitrificación es necesario determinar la tasa de crecimiento específica de los organismos nitrificadores usando la ecuación<sup>115</sup> 10. Esta tasa es la encargada de controlar el diseño pues los organismos nitrificadores crecen más lento que el resto de los microorganismos removedores de carbón.

$$\mu_{n^{116}} = \left(\frac{1.05 \frac{g}{g*d} * 0.5 \frac{g}{m^3}}{0.96 \frac{g}{m^3} + 0.5 \frac{g}{m^3}}\right) \left(\frac{2 \frac{g}{m^3}}{0.5 \frac{g}{m^3} + 2 \frac{g}{m^3}}\right) - 0.10 \frac{g}{g * d} = 0.19 \frac{g}{g * d}$$

Luego se procede a calcular el tiempo de retención teórico utilizando la ecuación 12, para tener un tiempo de retención teórico de 5.23 d corregido por un factor de seguridad de 1.6 para tener un tiempo de diseño de 8.6 d.

<sup>115</sup> Se encuentra descrita en la sección de cinética de crecimiento de nitrificación del marco teórico.

<sup>116</sup> Todos los datos fueron corregidos por temperatura a 25°C utilizando la ecuación 11 del marco teórico.

Para determinar la concentración de salida del sustrato en el efluente (parámetro necesario para determinar la biomasa producida en el tanque, deben conocerse el tiempo de retención de diseño, el coeficiente de decaimiento endógeno y la tasa máxima de crecimiento específico.

$$S = \frac{20[1 + (0.15 \frac{g}{g*d}) 8.6d]}{8.6d (8.42 \frac{g}{g*d} - 0.15 \frac{g}{g*d}) - 1} = 0.64 \frac{gbDQO}{m^3}$$

Con el tiempo de diseño se calcula la producción de biomasa<sup>117</sup> en base a la cantidad de nitrógeno presente en el agua, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno y sólidos suspendidos totales. Para realizar el cálculo se asume que el 80% del nitrógeno total corresponde a la cantidad de nitratos que se producirán en el tanque aireado.

$$P_{X,bio} = \frac{1517 \frac{m^3}{d} * 0.5 \frac{gVSS}{gbDQO} \left( \frac{96.75gDQO}{m^3} - \frac{0.64gbDQO}{m^3} \right) \left( \frac{1kg}{10^3g} \right)}{1 + \left( \frac{0.15g}{g*d} \right) 8.6d} + \frac{\left( \frac{0.15g}{g} \right) \left( 0.5 \frac{gVSS}{gbDQO} \right) \left( 1517 \frac{m^3}{d} \right) \left( \frac{96.75gDQO}{m^3} - \frac{0.64gbDQO}{m^3} \right) 8.6d * \left( \frac{1kg}{10^3g} \right)}{1 + \left( \frac{0.15g}{g*d} \right) 8.6d} + \frac{1517 \frac{m^3}{d} \left( \frac{75.33g}{m^3} \right) \left( \frac{1kg}{10^3g} \right)}{1 + \left( \frac{0.15g}{g*d} \right) 8.6d} = \frac{45.82kgVSS}{d}$$

Con un balance de masa de nitrógeno y la cantidad de biomasa producida en el tanque se obtiene la cantidad real de nitratos oxidados a partir del nitrógeno total en el tanque aireado.

$$NO_x = \frac{96.14g}{m^3} - \frac{0.5g}{m^3} - 0.12 \left( \frac{\frac{42.82kgVSS}{d}}{\frac{1517m^3}{d}} \right) = 93.66g/m^3$$

Para determinar el volumen ideal del tanque se debe de conocer la cantidad y concentración de sólidos suspendidos que se van a producir en el tanque de aireación agregando un término a la ecuación de producción de biomasa que toma en cuenta los nbVSS que hay en el caudal de entrada.

$$P_{x,VSS} = 45.82 \frac{kgVSS}{d} + 1517 \left( 0.227 \frac{g}{m^3} \right) = 46.16 \frac{kg}{d}$$

---

<sup>117</sup> Se encuentra definida en la sección de producción de lodos en parámetros de diseño y operación de lodos activados en el marco teórico.

$$P_{x, TSS} = 46.16 \frac{kg}{d} + 1517 \frac{m^3}{d} \left( 42 \frac{g}{m^3} - 32.78 \frac{g}{m^3} \right) \left( \frac{1kg}{10^3g} \right) = 68.25 \frac{kg}{d}$$

La cantidad de sólidos suspendidos en el licor dentro del tanque depende de la cantidad de días que el agua se encuentre en el sistema por lo que se obtiene la concentración de MLSS y MLVSS al multiplicar la concentración de biomasa correspondiente por el tiempo de retención.

$$X_{VSS} * V = \left( 46.16 \frac{kg}{d} \right) * 8.6d = 398.27kgMLVSS$$

$$X_{TSS} * V = \left( 68.25 \frac{kg}{d} \right) * 8.6d = 588.78 kgMLSS$$

Los datos teóricos de diseño de tanques aireados se basan en una concentración teórica de MLSS entre 1200 a 4000 /m<sup>3</sup>, para este tratamiento se seleccionaron 3000 g/m<sup>3</sup> para mantener una relación de recirculación de lodos al tanque aireado del 60%

$$V = \frac{\left( 68.25 \frac{kg}{d} \right) 8.6d}{3000 \frac{g}{m^3}} = 196m^3$$

El tiempo de retención del tanque aireado es una relación entre el caudal de entrada y el volumen necesario para tratar el agua.

$$\tau = \frac{196 m^3 * 24 \frac{h}{d}}{1517 \frac{m^3}{d}} = 3h$$

Para corroborar los volúmenes y parámetros de diseño seleccionados se debe de obtener la relación de sustrato microorganismo, la concentración real de MLVSS y carga volumétrica en el tanque.

Determinación de los MLVSS reales a partir de la fracción de VSS (para los MLSS propuestos)

$$Fracción VSS = \frac{398.27 kg}{588.78 kg} = 0.68$$

$$MLVSS = 0.68 * 3000 \frac{g}{m^3} = 2029 \frac{g MLVSS}{m^3}$$

Determinar la relación F/M de sustrato microorganismo

$$\frac{F}{M} = \frac{\left( \frac{1517m^3}{d} \right) \left( 75 \frac{g}{m^3} \right)}{2029 \frac{g}{m^3} * 196m^3} = 0.29 \frac{gDBO}{gVSS}$$

Carga volumétrica de DBO

$$L_{org} = \frac{\left( 1517 \frac{m^3}{d} \right) \left( 96.75 \frac{gDQO}{m^3} \right)}{\left( 196m^3 * 10^3 \right)} = \frac{0.58kgDBO}{m^3}$$

Evaluación del rendimiento del sistema basado en los sólidos suspendidos totales y volátiles

$$bDQO \text{ removido} = 1517 \frac{g}{m^3} \left( 96.75 \frac{g}{m^3} - 0.64 \frac{g}{m^3} \right) \left( \frac{1kg}{10^3g} \right) = 145.8 \frac{kg}{d}$$

$$Y_{obs,TSS} = \frac{68.25 \frac{kg}{d}}{145.8 \frac{kg}{d}} * \frac{1.29 g bDQO}{g DBO} = \frac{0.60 g_{TSS}}{g_{DBO}}$$

$$Y_{obs,VSS} = 80\% * \frac{0.60 g_{TSS}}{g_{DBO}} = 0.48 \frac{g_{VSS}}{g_{DBO}}$$

Una vez comprobado el rendimiento del tanque según los parámetros de diseño seleccionados se procede a calcular la cantidad de oxígeno requerido para realizar el tratamiento y cumplir con la nitrificación.

$$R_o = \frac{1517 m^3}{d} * \left( \frac{96.75 g DQO}{m^3} - \frac{0.64 g bDQO}{m^3} \right) = \frac{696.07 kg}{d} = \frac{29 kg}{h}$$

Finalmente se determinaron las dimensiones del tanque y espesor de pared, Se definió una profundidad de 4.5m debido a que a esa profundidad se tenía la eficiencia de los difusores de disco a utilizar.

$$Largo = \sqrt{\frac{196.26 m^3}{4.5 m}} = 6.6 m$$

El largo y ancho del tanque es de 6.6 m (este mismo cálculo se empleó para la zona anóxica)

Figura 120 Parámetros de diseño típicos para la zona aireada del proceso de lodos activados

Parámetros típicos de diseño comunmente utilizados para procesos de lodos activados

Nombre del proceso	Tipo de Reactor	SRT, d	Carga volumétrica			MLSS mg/L	Total t, h	RAS % de afluente
			F/M kgDBO/ kgMLVSS*d	lb DBO/ 1000ft3*d	kgDBO/ m3*d			
Aireación alta eficiencia	PFR	0.5-2	1.5-2.0	75-150	1.2-2.4	200-1000	1.5-3	100-150
Estabilización por contacto	PFR	5-10	0.2-0.6	60-75	1.0-1.3	1000-3000 <sup>b</sup> 6000-10000 <sup>c</sup>	0.5-1 <sup>b</sup> 2-4 <sup>c</sup>	50-150
Oxígeno alta pureza	PFR	1-4	0.5-1.0	80-200	1.3-3.2	2000-5000	1-3	25-50
Flujo pistón convencional	PFR	3-15	0.2-0.4	20-40	0.3-0.7	1000-3000	4-8	25-75 <sup>d</sup>
Alimentación por pasos	PFR	3-15	0.2-0.4	40-60	0.7-1.0	1500-4000	3-5	25-75
Mezcla Completa	CMBAS	3-15	0.2-0.6	20-100	0.3-1.6	1500-4000	3-5	25-100 <sup>d</sup>
Aireación extendida	PFR	20-40	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	2000-5000	20-30	50-150
Laguna de oxidación	PFR	15-30	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	3000-5000	15-30	75-150
Decantación batch	Batch	12-25	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	2000-5000 <sup>d</sup>	20-40	NA
Reactor batch secuencial	Batch	10-30	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	2000-5000 <sup>e</sup>	15-40	NA
Sistema de aireación a contracorriente (CCAS)	PFR	10-30	0.04-0.10	5-10	0.1-0.3	2000-4000	15-40	25-75 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Adapted from WEF (1998); Crites and Tchobanoglous (1998).

(Metcalf & Eddy, 2003)

## 2. Memoria de cálculo de diseño zona anóxica

Utilizando los datos obtenidos del tanque aireado, tiempo de retención, caudal y volumen se determina la biomasa activa (MLVSS) para la zona anóxica

$$X_b = \left[ \frac{1517 \frac{m^3}{d} (8.6d)}{196 m^3} \right] \left[ \frac{0.5 \left( \frac{96.75g}{m^3} - 0.64 \frac{g}{m^3} \right)}{1 + \left( 0.15 \frac{g}{g*d} \right) 8.6d} \right] = 1428 \frac{g}{m^3}$$

Al determinar la tasa de recirculación interna se debe tomar en cuenta la concentración de nitrógeno inicial, la concentración de NH<sub>4</sub>-N de salida del tanque aireado y el porcentaje de recirculación de lodos del clarificador como se muestra a continuación

$$IR = \frac{\frac{94.16g}{m^3}}{20 \frac{g}{m^3}} - 1.0 - 0.60 = 3.1 \approx 3$$

Luego de determinar la tasa de recirculación del sistema (la teórica se encuentra entre 3 a 4 veces)<sup>118</sup> se procede a calcular el caudal y la concentración de nitratos alimentados a la zona anóxica

$$Q_{ir} = \left( 3.1 * 1517 \frac{m^3}{d} \right) + \left( 0.60 * 1517 \frac{m^3}{d} \right) = 5587.94 \frac{m^3}{d}$$

$$NO_{x,alimentado} = 5587.94 \frac{m^3}{d} * 20 \frac{g}{m^3} = 111759 \frac{gNO_x}{d}$$

Para encontrar el volumen del tanque es necesario realizar una serie de iteraciones variando el tiempo de retención hasta tener la relación de sustrato microorganismo que dé el mayor porcentaje de conversión de nitrato a nitrógeno molecular, para ello se asume un tiempo de retención inicial (entre 1 h y 3 h), se calcula el volumen del tanque y la relación sustrato microorganismo que existe para esas condiciones, a partir de eso y la tasa de desnitrificación específica.<sup>119</sup>

Primera iteración asumiendo un tiempo de retención de 1h

$$\tau = \frac{1h}{24h} = 0.042d$$

$$V_{anox} = 0.042d * 1517 \frac{m^3}{d} = 63.22m^3$$

<sup>118</sup> Para más información sobre la tasa de recirculación ver el marco teórico.

<sup>119</sup> Esta definición se encuentra en la sección desnitrificación del marco teórico

$$\frac{F}{M_b} = \frac{1517 \frac{m^3}{d} * 96.75 \frac{gDQO}{m^3}}{63.22 m^3 * \left(1428 \frac{g}{m^3}\right)} = \frac{1.6g}{g * d}$$

Para obtener la tasa de desnitrificación específica (SDNR) es necesario obtener la relación de demanda química de oxígeno biodegradable y la demanda química de oxígeno raramente biodegradable.

$$\frac{rbDQO}{bDQO} = \frac{24.19 \frac{g}{m^3}}{96.75 \frac{g}{m^3}} = 0.25$$

A partir de la Figura 8 se obtiene la tasa de desnitrificación específica a 20°C con la relación de sustrato microorganismo a una relación de rbDQO/bDQO específica y para este caso el valor leído es de  $\frac{0.26gNO_3-N}{gbiomasa*d}$ , sin embargo, la temperatura de diseño del sistema es de 25°C por lo que debe realizarse una corrección por temperatura para el valor calculado.

$$SDNR_{25^\circ C} = \frac{0.26gNO_3 - N}{gbiomasa * d} - \left(0.0209 * \ln\left(1.6 \frac{g}{g * d}\right)\right) - 0.012 = \frac{0.23gNO_3 - N}{gbiomasa * d}$$

Debido a que la cantidad de recirculaciones internas en el tanque provocan una disminución en la desnitrificación por el contenido de oxígeno disuelto que se encuentra en el agua, se realiza una corrección por número de recirculaciones como se muestra en la ecuación 20 del marco teórico.

$$SDNR_{adj} = \frac{0.23gNO_3-N}{gbiomasa*d} - 0.029 \ln\left(\frac{0.26gNO_3-N}{gbiomasa*d}\right) - 0.012 = 0.27$$

Finalmente se determina la cantidad de NO<sub>3</sub>-N removido y la tasa de capacidad de remoción para determinar la eficiencia del tratamiento

$$NO_r = 63.22m^3 * 0.27 * 1428 \frac{g}{m^3} = \frac{24007gNO_3 - N}{g}$$

$$\% \text{ remoción} = \frac{24007 g/d}{111759 g/d} * 100\% = 21\%$$

Debido a que el porcentaje de remoción obtenido es bajo en comparación a la cantidad de nitratos de entrada se opta por utilizar un tiempo de retención mayor para la segunda iteración t = 2h

$$\tau = \frac{2h}{24h} = 0.083d$$

$$V_{anox} = 0.083d * 1517 \frac{m^3}{d} = 126.44 m^3$$

$$\frac{F}{M_b} = \frac{1517 \frac{m^3}{d} * 96.75 \frac{gDQO}{m^3}}{126.44 m^3 * \left(1428 \frac{g}{m^3}\right)} = \frac{0.8g}{g * d}$$

$$\frac{rbDQO}{bDQO} = \frac{24.19 \frac{g}{m^3}}{96.75 \frac{g}{m^3}} = 0.25$$

$$SDNR_{25^\circ C} = \frac{0.28gNO_3 - N}{gbiomasa * d} - \left(0.0209 * \ln\left(1.6 \frac{g}{g * d}\right)\right) - 0.012 = \frac{0.20gNO_3 - N}{gbiomasa * d}$$

$$SDNR_{adj} = \frac{0.20gNO_3 - N}{gbiomasa * d} - 0.029 \ln\left(\frac{0.26gNO_3 - N}{gbiomasa * d}\right) - 0.012 = 0.23$$

$$NO_r = 126.44m^3 * 0.27 * 1428 \frac{g}{m^3} = \frac{41876gNO_3 - N}{g}$$

$$\% \text{ remoción} = \frac{41876 g/d}{111759 g/d} * 100\% = 37\%$$

Debido a que la tasa de remoción aun es considerablemente baja se realiza una tercera iteración con el tiempo de retención máximo  $t = 3h$

$$\tau = \frac{3h}{24h} = 0.125d$$

$$V_{anox} = 0.125d * 1517 \frac{m^3}{d} = 189.66 m^3$$

$$\frac{F}{M_b} = \frac{1517 \frac{m^3}{d} * 96.75 \frac{gDQO}{m^3}}{189.66 m^3 * \left(1428 \frac{g}{m^3}\right)} = \frac{0.5g}{g * d}$$

$$\frac{rbDQO}{bDQO} = \frac{24.19 \frac{g}{m^3}}{96.75 \frac{g}{m^3}} = 0.25$$

$$SDNR_{25^\circ C} = \frac{0.19gNO_3 - N}{gbiomasa * d} - \left(0.0209 * \ln\left(1.6 \frac{g}{g * d}\right)\right) - 0.012 = \frac{0.20gNO_3 - N}{gbiomasa * d}$$

$$SDNR_{adj} = \frac{0.20gNO_3 - N}{gbiomasa * d} - 0.029 \ln\left(\frac{0.26gNO_3 - N}{gbiomasa * d}\right) - 0.012 = 0.22$$

$$NO_r = 126.44m^3 * 0.27 * 1428 \frac{g}{m^3} = \frac{60276gNO_3 - N}{g}$$

$$\% \text{ remoción} = \frac{60276 \text{ g/d}}{111759 \text{ g/d}} * 100\% = 54\%$$

En este caso se obtuvo más del 50% de retención sin embargo es el tiempo máximo teórico para la zona anóxica por lo que se toma como válido y se utiliza este valor como la capacidad máxima de remoción del sistema.

Para comprobar que el valor obtenido de tasa de desnitrificación es coherente con los valores observados en otras plantas de tratamiento de aguas se realiza una comparación con los MLSS

$$(SDNR)(MLSS) = 0.22 * \left( \frac{1428 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{3000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}} \right) = \frac{0.11 \text{g}}{\text{g} * \text{d}}$$

Como se discutió en el marco teórico los valores de la tasa de desnitrificación específica varían entre 0.04 a 0.42 g/g\*d, por lo que se considera aceptable el valor de 0.11 g/g\*d ya que está dentro del rango.

Durante la reacción de desnitrificación<sup>120</sup> se produce oxígeno en la reacción por lo que la relación de oxígeno requerido en el tanque aireado disminuye al obtenerlo en la zona anóxica.

$$\text{oxígeno} = \left( \frac{2.86 \text{g } O_2}{\text{gNO}_3 - N} \right) \left( \frac{93.66 \text{g}}{\text{m}^3} - \frac{20 \text{g}}{\text{m}^3} \right) \left( 1517 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) \left( \frac{1 \text{kg}}{10^3 \text{g}} \right) = 320 \frac{\text{kg } O_2}{\text{d}} = 13.32 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El oxígeno requerido luego del tratamiento de desnitrificación el tanque aireado

$$R_o = \left( 29.00 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 13.32 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 15.69 \frac{\text{kg } O_2}{\text{h}}$$

Para realizar esta operación es necesario tener agitación constante por lo que la potencia requerida del agitador se calcula de la siguiente manera

$$P = 196 \text{m}^3 * \left( \frac{10 \text{kW}}{10^3 \text{m}^3} \right) = 1.96 \text{kW}$$

### 3. Memoria de cálculo de sistema de aireación

Debido a que la concentración de oxígeno disuelto depende de la presión y temperatura a la que se encuentre el agua se deben realizar correcciones, para determinar la concentración de saturación a las condiciones del terreno donde estará ubicado el sistema se realiza la siguiente corrección por presión y elevación

---

<sup>120</sup> Ver marco teórico sección de desnitrificación Figura 6.

$$\frac{P_b}{P_a} = e^{\left( \frac{\left( \frac{9.81m}{s^2} \right) \left( \frac{28.97kg}{kmol} \right) (150-0m)}{\left( \frac{8314 kg \cdot m^2}{s^2 kmol \cdot K} \right) (298.15K)} \right)} = 0.98$$

La altitud del terreno es de 150m y se obtuvo midiéndola en Google Earth® y la concentración de oxígeno a la temperatura de diseño se obtuvo de la Figura 123. Concentración de oxígeno disuelto a 760 mmHg

$$C_{s,TH} = 8.24 \frac{g}{m^3} * 0.98 = \frac{8.10g}{m^3}$$

Se procede a corregir la presión atmosférica por la altitud del lugar a colocar la planta

$$P_{atm,H} = \frac{0.98 * \frac{101.325kN}{m^2}}{9.77 \frac{kN}{m^3}} = 10.19m$$

Se asumió un porcentaje de oxígeno en el aire del 19% para tener un margen de diseño en la concentración de oxígeno suministrada al tanque según los cambios de presión realizados.

$$C_{s,THc} = 8.10 \frac{g}{m^3} \left( \frac{1}{2} \right) \left( \left( \frac{10.19m + 4.5m}{10.19m} \right) + \frac{19}{21} \right) = 9.45 \frac{g}{m^3}$$

Con las concentraciones y presiones corregidas según presión y elevación se procede a calcular la tasa de transferencia de oxígeno que se dará en el tanque (SOTR).

$$SOTR = \frac{15.69 \frac{kgO_2}{h} \left( \frac{9.08g}{m^3} \right) (1.024)^{(20-25)}}{(0.65)(0.9) \left[ (0.95 * 10.19m) - 2 \frac{gO_2}{m^3} \right]} 31 \frac{kgO_2}{h}$$

El flujo másico previamente calculado representa la cantidad de oxígeno puro necesario para realizar la nitrificación, sin embargo, en este sistema se utilizará aire como fuente de oxígeno por lo que se debe obtener el flujo másico de aire alimentado necesario para poder abastecer esa concentración de oxígeno en el tanque.

$$Flujo\ de\ aire = \frac{31 \frac{kgO_2}{h}}{0.35 * 60 \frac{min}{h} * 0.270 \frac{kgO_2}{m^3\ aire}} = 5.5 \frac{m^3}{min}$$

Para determinar el flujo de aire se toma en cuenta la eficiencia de los difusores de cerámica a la profundidad del tanque, el factor de ensuciamiento, y dos correcciones una por tensión superficial y otra por transferencia de oxígeno al agua.

Una vez calculado el flujo requerido para el sistema de aireación se procede a calcular la velocidad del aire en tuberías, diámetros de tubería y caídas de presión para determinar la caída de presión a vencer por parte del equipo suministrador de aire.

$$V_{aire} = \frac{5.5 \frac{m^3}{min}}{60\pi * \left(\frac{0.100m}{2}\right)^2} = 11.25 \frac{m}{s}$$

Según la Tabla 14 del marco teórico la velocidad del aire en tuberías debe estar entre 9 y 15 m/s por lo que es una velocidad aceptable para el diámetro de tubería seleccionado de 0.100 m (4 in nominal)

Para el requerimiento de aire en el tanque aireado se seleccionó una velocidad de flujo a través de los difusores de diseño de 2.55 m<sup>3</sup>/h (1.5 cfm) fijada por el proveedor, al igual que la caída de presión es de 2615.43 Pa (10.5 inWG) a la velocidad de flujo de diseño por cada difusor instalado.

$$h_d = 2615.43Pa * 24 \text{ difusores} = 62770.40Pa \text{ (0.63bar)}$$

Según la (Ecuación 27) las pérdidas por fricción de accesorios en tuberías que conducen aire comprimido se calculan mediante un factor de resistencia y diámetro de tubería

$$L = 55.4 * (1.33)(0.11m^{1.2}) * 7 = 35.80m$$

Este cálculo se realizó para todos los accesorios, 1 válvula de compuerta y 1 codos de 90° pero se ejemplificó únicamente para la cantidad (7) de uniones T que se utilizarán en el sistema. Para tener una longitud total de 137.16m sumando la longitud de la tubería la longitud equivalente total es de 62.88m.

Se corrige la temperatura a la que se encuentra el fluido dentro de la tubería

$$T = 298.15K * \left(\frac{8.51atm}{0.983 atm}\right)^{0.283} = 549.18K$$

El factor de fricción por rugosidad del material para tuberías de hierro galvanizado se obtiene al leer en la figura 52. dependiendo del diámetro de tubería nominal y se tuvo un valor de 0.023.

La caída de presión total en la tubería recta

$$h_f = 9.82x10^{-8} \frac{0.023 * 62.88m * 549.18K * \left(\frac{5.47m^3}{min}\right)^2}{0.11m * 862275.8Pa} = 1.80Pa$$

La caída de presión total en el sistema de aireación incluyendo la presión ejercida por el filtro de aire es de:

$$h_f = 1.80Pa + 62770Pa + 1490.61pa = 64261.8Pa \text{ (0.64bar)}(9.32psi)$$

Figura 121 Solubilidad de oxígeno disuelto en agua en función de la salinidad, presión barométrica y temperatura

Temp. °C	Concentración de oxígeno disuelto, mg/L									
	Salinidad, partes por millón									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	14.60	14.11	13.64	13.18	12.74	12.31	11.90	11.50	11.11	10.74
1	14.20	13.73	13.27	12.83	12.40	11.98	11.58	11.20	10.83	10.46
2	13.81	13.36	12.91	12.49	12.07	11.67	11.29	10.91	10.55	10.20
3	13.45	13.00	12.58	12.16	11.76	11.38	11.00	10.64	10.29	9.95
4	13.09	12.67	12.25	11.85	11.47	11.09	10.73	10.38	10.04	9.71
5	12.76	12.34	11.94	11.56	11.18	10.82	10.47	10.13	9.80	9.48
6	12.44	12.04	11.65	11.27	10.91	10.56	10.22	9.89	9.57	9.27
7	12.13	11.74	11.37	11.00	10.65	10.31	9.98	9.66	9.35	9.06
8	11.83	11.46	11.09	10.74	10.40	10.07	9.75	9.44	9.14	8.85
9	11.55	11.19	10.83	10.49	10.16	9.84	9.53	9.23	8.94	8.66
10	11.28	10.92	10.58	10.25	9.93	9.62	9.32	9.03	8.75	8.47
11	11.02	10.67	10.34	10.02	9.71	9.41	9.12	8.83	8.56	8.30
12	10.77	10.43	10.11	9.80	9.50	9.21	8.92	8.65	8.38	8.12
13	10.53	10.20	9.89	9.59	9.30	9.01	8.74	8.47	8.21	7.96
14	10.29	9.98	9.68	9.38	9.10	8.82	8.55	8.30	8.04	7.80
15	10.07	9.77	9.47	9.19	8.91	8.64	8.38	8.13	7.88	7.65
16	9.86	9.56	9.28	9.00	8.73	8.47	8.21	7.97	7.73	7.50
17	9.65	9.36	9.09	8.82	8.55	8.30	8.05	7.81	7.58	7.36
18	9.45	9.17	8.90	8.64	8.39	8.14	7.90	7.66	7.44	7.22
19	9.26	8.99	8.73	8.47	8.22	7.98	7.75	7.52	7.30	7.09
20	9.08	8.81	8.56	8.31	8.07	7.83	7.60	7.38	7.17	6.96
21	8.90	8.64	8.39	8.15	7.91	7.69	7.46	7.25	7.04	6.84
22	8.73	8.48	8.23	8.00	7.77	7.54	7.33	7.12	6.91	6.72
23	8.56	8.32	8.08	7.85	7.63	7.41	7.20	6.99	6.79	6.60
24	8.40	8.16	7.93	7.71	7.49	7.28	7.07	6.87	6.68	6.49
25	8.24	8.01	7.79	7.57	7.36	7.15	6.95	6.75	6.56	6.38

Tomado de: (Metcalf & Eddy, 2003)

Figura 122 Propiedades físicas del agua a distintas temperaturas

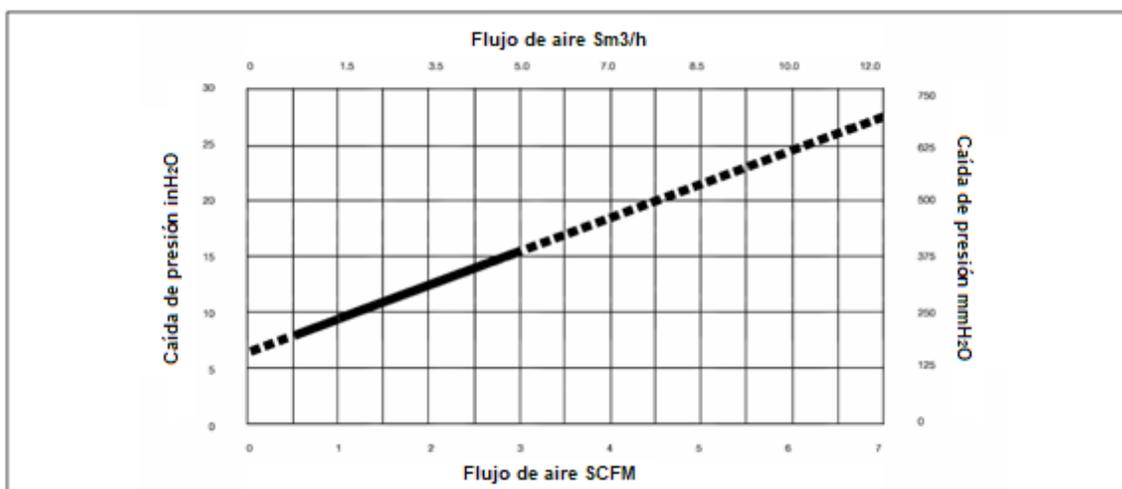
Temperatura °C	Peso Específico $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	Densidad $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Elasticidad $E/10^6$ , kN/m <sup>2</sup>	Viscosidad dinámica $\mu \times 10^3$ , N·s/m <sup>2</sup>	Viscosidad cinemática $\nu \times 10^6$ , m <sup>2</sup> /s	Tensión superficial $\sigma$ , N/m	Presión de vapor $P_v$ , kN/m <sup>2</sup>
0	9.805	999.8	1.98	1.781	1.785	0.0765	0.61
5	9.807	1000.0	2.05	1.518	1.519	0.0749	0.87
10	9.804	999.7	2.10	1.307	1.306	0.0742	1.23
15	9.798	999.1	2.15	1.139	1.139	0.0735	1.70
20	9.789	998.2	2.17	1.002	1.003	0.0728	2.34
25	9.777	997.0	2.22	0.890	0.893	0.0720	3.17
30	9.764	995.7	2.25	0.798	0.800	0.0712	4.24
40	9.730	992.2	2.28	0.653	0.658	0.0696	7.38
50	9.689	988.0	2.29	0.547	0.553	0.0679	12.33
60	9.642	983.2	2.28	0.466	0.474	0.0662	19.92
70	9.589	977.8	2.25	0.404	0.413	0.0644	31.16
80	9.530	971.8	2.20	0.354	0.364	0.0626	47.34
90	9.466	965.3	2.14	0.315	0.326	0.0608	70.10
100	9.399	958.4	2.07	0.282	0.294	0.0589	101.33

Tomado de: (Metcalf & Eddy, 2003)

Figura 123 Obtención teórica de la elevación del terreno propuesto para montaje de la planta de tratamiento de aguas residuales



Figura 124 Gráfica de pérdidas por fricción de difusores de aire de cerámica



(INTERNATIONAL, s.f.)

Figura 125 Parámetros teóricos con los que debe de cumplir un diseño de MLE

Parámetros de diseño típicos empleados para procesos comunes de remoción de nitrógeno

Parámetros de diseño/ proceso	SRT, d <sup>a</sup>	MLSS, mg/L	$\tau, h$			RAS % de afluente	% de afluente de recirculación interna
			Total	Zona Anóxica	Zona Aeróbica		
MLE	7-20	3000-4000	5-15	1-3	4-12	50-100	100-200
SBR	10-30	3000-5000	20-30	Variable	Variable		
BARDENPHO - (4 ETAPAS)	10-20	3000-4000	8-20	1-3 (1st stage)	4-12 (2nd stage)	50-100	200-400
				2-4 (3rd stage)	0.5-1 (4th stage)		
Laguna oxidación	20-30	2000-4000	18-30	Variable	Variable	50-100	
Bio-denitró	20-40	3000-4000	20-30	Variable	Variable	50-100	
Orbal	10-30	2000-4000	10-20	6-10 (1st stage)	3-6 (2nd stage)	50-100	Optional

<sup>a</sup> Dependiente de la temperatura

(Metcalf & Eddy, 2003)

#### 4. Memoria de cálculo del clarificador secundario

Una vez obtenido los parámetros de diseño de todo el sistema se procede a calcular el clarificador secundario, ya que es necesario sedimentar los lodos para obtener una de las recirculaciones, y enviar el agua tratada a desinfección.

Para definir una tasa de recirculación de lodos que tenga como fin lograr la mayor tasa de remoción de nitrógeno posible en el sistema se debe utilizar un valor entre 0.25 y 0.75 de recirculación de lodos, se realizaron pruebas hasta tener la combinación de concentración de MLSS en el sistema que diera el mayor porcentaje de remoción. Se obtuvo que fue de 60% con una concentración de biomasa de 8000 g/m<sup>3</sup>.

$$R = \frac{3000 \frac{g}{m^3}}{8000 \frac{g}{m^3} - \frac{3000g}{m^3}} = 0.60$$

El flujo promedio de entrada se seleccionó en base a la velocidad de sedimentación de los lodos, teóricamente se encuentra en un rango de 16 a 28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d para sedimentadores que se encuentren después de un sistema de lodos activados se seleccionó un flujo promedio de entrada de 22 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d como primera iteración

$$\text{Área} = \frac{1517 \frac{m^3}{d}}{22 \frac{m^3}{m^2*d}} = 68.97 m^2$$

Determinar el diámetro del clarificador

$$D = \sqrt{\frac{69m^2}{\pi}} * 2 = 9.37m$$

Se usará un diámetro efectivo de 10 m por lo que se tiene un área de 79 m<sup>2</sup> con una carga de sólidos de 3.9 kgMLSS/m<sup>2</sup>\*h con una profundidad propuesta de 4.5 m para la primera iteración (la carga de sólidos se calcula como se muestra a continuación

$$\text{Carga de sólidos} = \frac{(1 + 0.6) \left(\frac{1517m^3}{d}\right) \left(\frac{3000g}{m^3}\right) \left(\frac{1kg}{10^3g}\right)}{(79m^2) \left(\frac{24h}{d}\right)} = 3.9 \frac{kgMLSS}{m^2 * d}$$

Para comprobar que los valores seleccionados corresponden a un buen diseño de clarificador se determina el tiempo que tarda en sedimentar la carga de sólidos y el tiempo de retención del líquido en el clarificador, si el tiempo de retención es mayor que el tiempo de sedimentación se da por terminado el diseño pues los valores supuestos son adecuados para el sistema.

$$\tau_{retención} = \frac{353.43m^3}{\frac{2414.03m^3}{d}} = 0.1d \text{ (3.5h)}$$

$$v_{sed} = \frac{22m^3}{m^2 * d} * \frac{1.75 * 1d}{24h} = 1.60 \frac{m}{h}$$

$$\tau_{sed} = \frac{4.5m}{\frac{1.60m}{h}} = 2.81h$$

Se utilizó un factor de seguridad mínimo de 1.75 para los cálculos de la velocidad de sedimentación.

Figura 126 Parámetros de diseño teóricos para dimensionamiento adecuado de un clarificador secundario luego del proceso de lodos activados

**Información de diseño típica para clarificadores secundarios para el proceso de lodos activados**

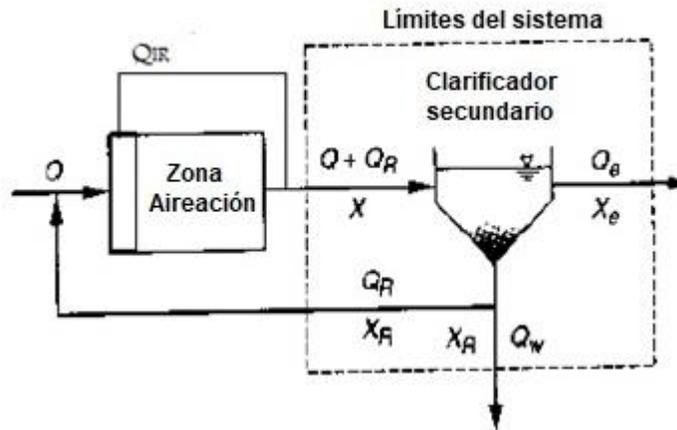
Tipo de tratamiento	Tasa de desbordamiento		carga de sólidos				Profundidad m <sup>3</sup>		
	gal/ft <sup>2</sup> -d	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -d	lb/ft <sup>2</sup> -h	kg/m <sup>2</sup> -h	lb/ft <sup>2</sup> -h	kg/m <sup>2</sup> -h			
Después de lodos activados - aire (excluyendo aireación extendida)	400-700	1000-1600	16-28	40-64	0.8-1.2	1.6	4-6	8	3.5-6
Removedores de nutrientes biológicos	400-700	1000-1600	16-28	40-64	1.0-1.5	1.8	5-8	9	3.5-6
Sedimentación después de lodos (oxígeno)	400-700	1000-1600	16-28	40-64	1.0-1.4	1.8	5-7	9	3.5-6
Sedimentación después de aireación extendida	200-400	600-800	8-16	24-32	0.2-1.0	1.4	1.0-5	7	3.5-6
Sedimentación para remoción de fósforo para concentraciones de efluentes de:									
Fósforo total P=2	600-800		24-32						
Fósforo total P= 1	400-600		16-24						
Fósforo total P= 0.2-0.5	300-500		12-20						

\*Adapted in part from Kong (1987); WEF (1998).

(Metcalf & Eddy, 2003)

## 5. Balance de masa del sistema de lodos activados

Figura 127 Identificación de corrientes del clarificador en el sistema de lodos activados



(Metcalf & Eddy, 2003)

Para corroborar que todos los cálculos son los adecuados y el dimensionamiento es correcto se realiza un balance de masa del sistema, en el cual se determina el caudal de agua de salida al siguiente tratamiento y los lodos producidos, así como sus composiciones como se muestra a continuación:

$$0 = X(Q + Q_R) - Q_R X_R - Q_W X_R - Q_e X_e$$

$$Q_R = \frac{\left[ \left( \frac{3000g}{m^3} \right) \left( 1517 \frac{m^3}{d} \right) - \left( \frac{\left( \frac{3000g}{m^3} \right) * 196.26 m^3}{8.6d} \right) \right]}{\frac{8000g}{m^3} - \frac{3000g}{m^3}} = 896.73 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_2 = Q + Q_R = 896.73 \frac{m^3}{d} + 1517 \frac{m^3}{d} = 2414.03 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_W = \frac{\left( 2414.03 \frac{m^3}{d} \right) \left( \frac{3000g}{m^3} \right)}{\frac{8000m^3}{d}} = 905.26 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_e = 1517 \frac{m^3}{d} - 905.26 \frac{m^3}{d} = 612.04 \frac{m^3}{d}$$

## 6. Memoria de cálculo de dimensionamiento de tubería y accesorios

La velocidad óptima de agua en tubería es entre 1 m/s y 3 m/s se seleccionó de 1 m/s para realizar el diseño de todas las tuberías con agua<sup>121</sup>. Utilizando las propiedades del agua a 25 °C de densidad y viscosidad como se muestran en la Figura 122 se calculó el número de Reynolds para determinar el régimen de flujo y el diámetro de tubería ideal

$$A = \frac{\frac{0.0071m^3}{d}}{1 \frac{m}{s}} = 0.0071m^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.0071m^2}{\pi}} = 0.09m \text{ (3.74in } \approx 4in)$$

$$N_{re} = \frac{(0.10m) \left( \frac{996.7kg}{m^3} \right) \left( \frac{1m}{s} \right)}{\left( 0.000891 \frac{kg}{m*s} \right)} = 1.14 \times 10^5$$

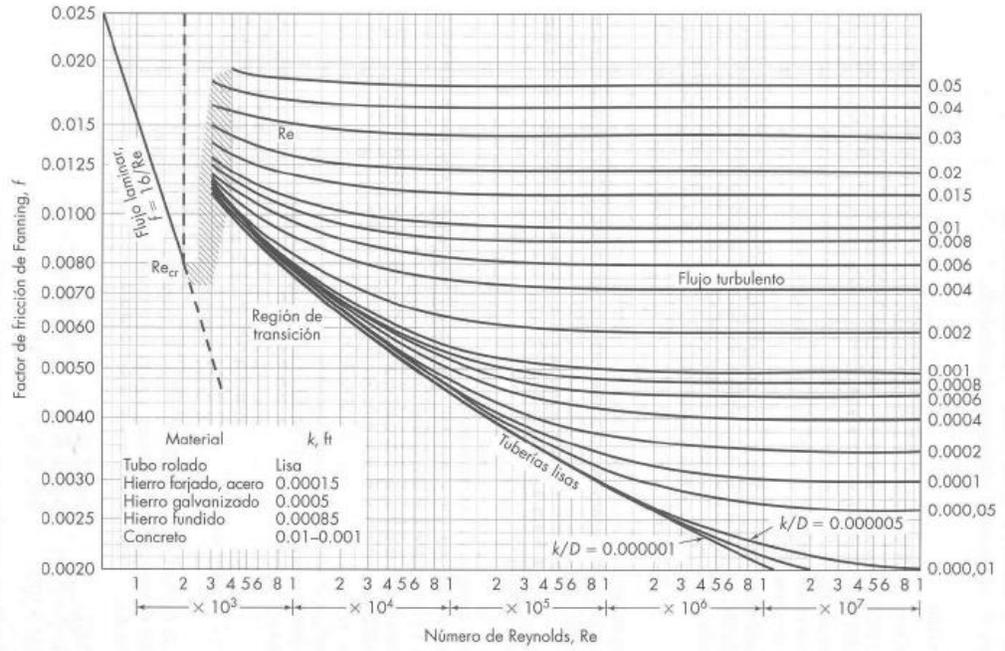
Se selecciona tubería cédula 40 de 0.09m (4 in) de diámetro nominal de PVC.

---

<sup>121</sup> Para leer sobre velocidades de flujo en tubería ir a la sección de dimensionamiento de tuberías en el marco teórico.

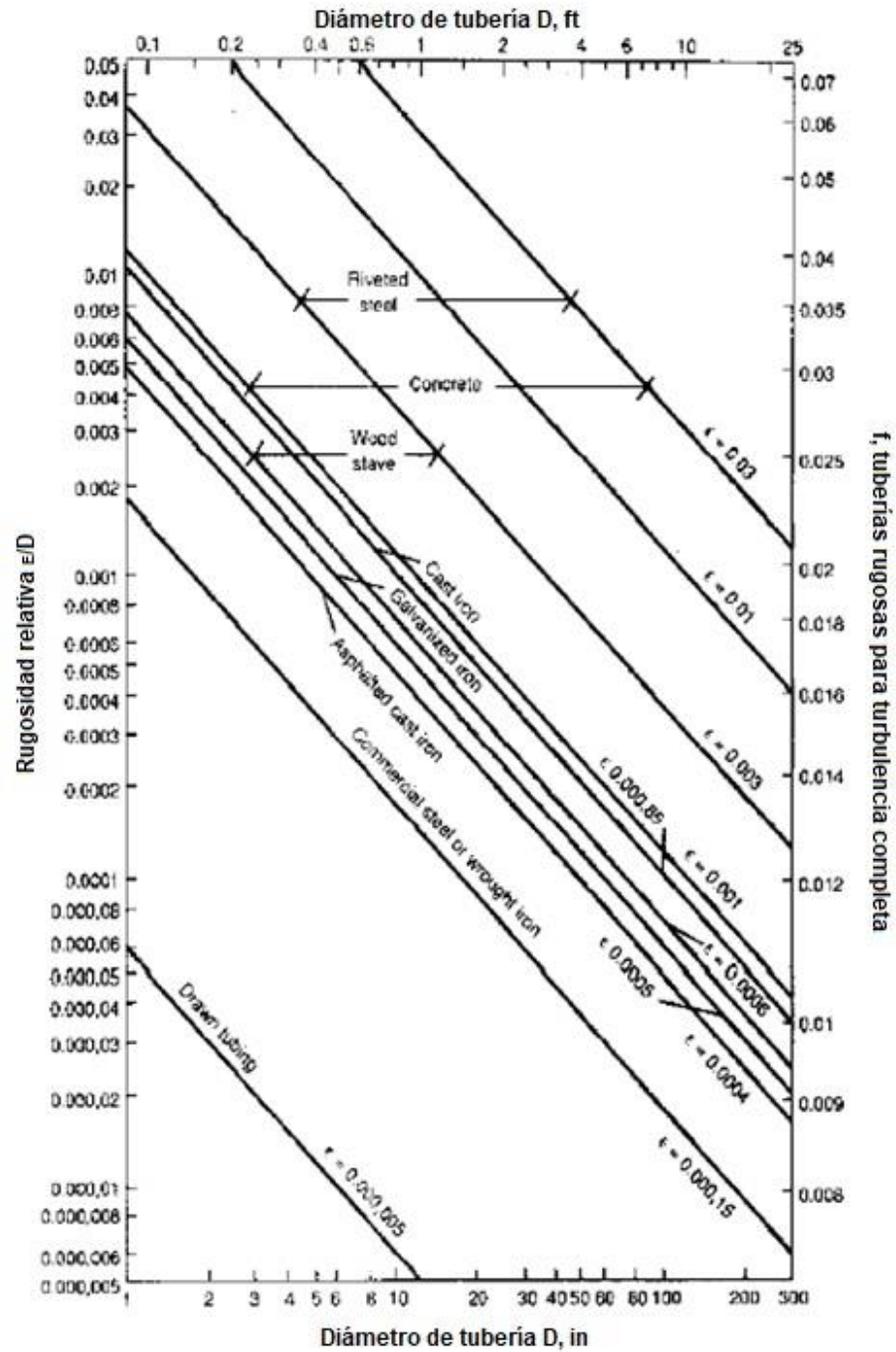


Figura 130 Gráfica del factor de fricción para tuberías circulares



(McCabe & Smith, 2007)

Figura 131 Diagrama de Moody para distintos materiales y obtención del factor de fricción de tubería en base al diámetro nominal (in)



(Metcalf & Eddy, 2003)

## 7. Memoria de cálculo de dimensionamiento de bombas

Para dimensionar una bomba es necesario conocer la cabeza que debe ser capaz la bomba de levantar en m, el caudal a manejar.

Se obtienen las pérdidas por fricción de accesorios en toda la tubería

$$h_{ff} = 5.74 \left( \frac{\left(\frac{1m}{s}\right)^2}{2} \right) = 2.87 \frac{m^2}{s^2}$$

Las pérdidas por fricción de superficie se obtienen al leer en el diagrama de Moody<sup>122</sup> el número de Reynolds y la rugosidad del material a emplear (en este caso se empleó tubería lisa por ser PVC) y se leyó un factor de fricción de fanning de 0.00205 el tramo de tubería a diseñar es de 8m

$$h_{fs} = 4 * 0.00205 \left( \frac{8m}{0.15m} \right) * \left( \frac{1m}{s} \right)^2 = 0.21 \frac{m^2}{s^2}$$

Pérdidas por fricción por expansión de tubería,

$$k_e = \left( 1 - \frac{4\pi(0.15m)^2}{4\pi(0.08m)^2} \right)^2 = 8.59$$

$$h_{fe} = 8.59 \left( \frac{\left(\frac{1m}{s}\right)^2}{2} \right) = 4.29 \frac{m^2}{s^2}$$

Pérdidas por fricción por contracción de diámetro de tubería

$$k_c = 0.4 * \left( 1 - \frac{0.008m^2}{0.02m^2} \right) = 0.224$$

$$h_{fc} = 0.224 \left( \frac{\left(\frac{1m}{s}\right)^2}{2} \right) = 0.112$$

Por medio de la (Ecuación 31) de Bernoulli se determina que la cabeza total es igual a la suma entre el trabajo, altura y las pérdidas por fricción, pues ambos tanques se encuentran a presión atmosférica, y la diferencia de alturas es de 1m entre el punto A (succión) y el punto B (descarga).

---

<sup>122</sup> Ver Figura 131 de anexos.

$$W_p = \frac{\frac{7.49m^2}{s^2} + \left(1m * 9.81 \frac{m}{s^2}\right)}{\frac{9.81m}{s^2}} = 1.76m$$

La cabeza total es de 1.76 m para un caudal de 63.22 m<sup>3</sup>/h, ahora en base a esto se buscó en las gráficas de familias de bombas (Figura 132), para determinar una curva característica de la bomba adecuada para esas condiciones y luego determinar la potencia con la Figura 133.

A partir de la Figura 133 se obtuvieron las siguientes características de la bomba:

Tabla 198 Características de la bomba seleccionada para alimentación del tratamiento terciario

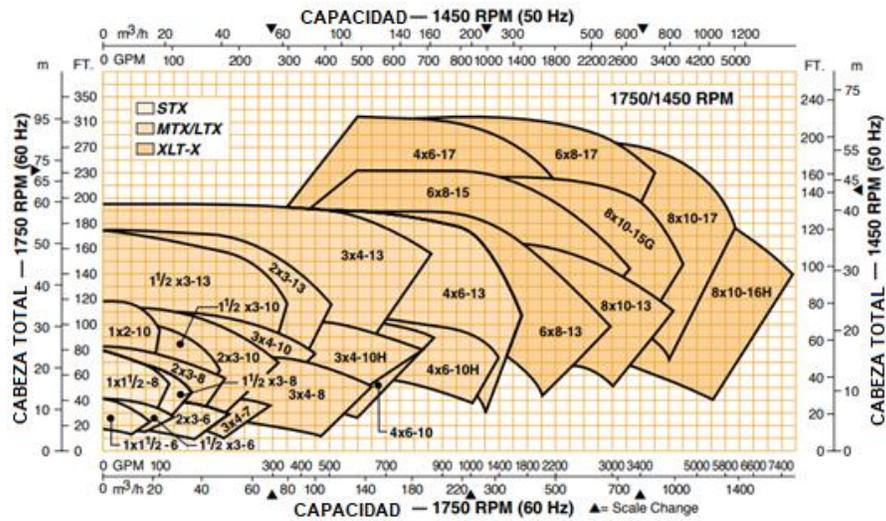
Características	Tamaño
Descarga	0.08m (3 in)
Succión	0.10m (4 in)
Potencia Motor (BHP)	1.5kW (2hp)
Eficiencia	65%
Revoluciones de bomba	1450rpm
Potencia bomba (hidráulica)	0.98kW (1.3hp)
NPSH requerido	1.2m
NPSH	8.92m

Para comprobar que la bomba seleccionada es la adecuada y no tendrá problemas de cavitación se realizó el cálculo de NPSH demandado por el sistema y este debe ser mayor al requerido por el fabricante.

$$NPSH = \frac{1}{\frac{9.81m}{s^2}} \left( \frac{(101325Pa - 3170Pa)}{997 \frac{kg}{m^3}} - 1.12 \frac{m^2}{s^2} \right) - 1m = 8.92m$$

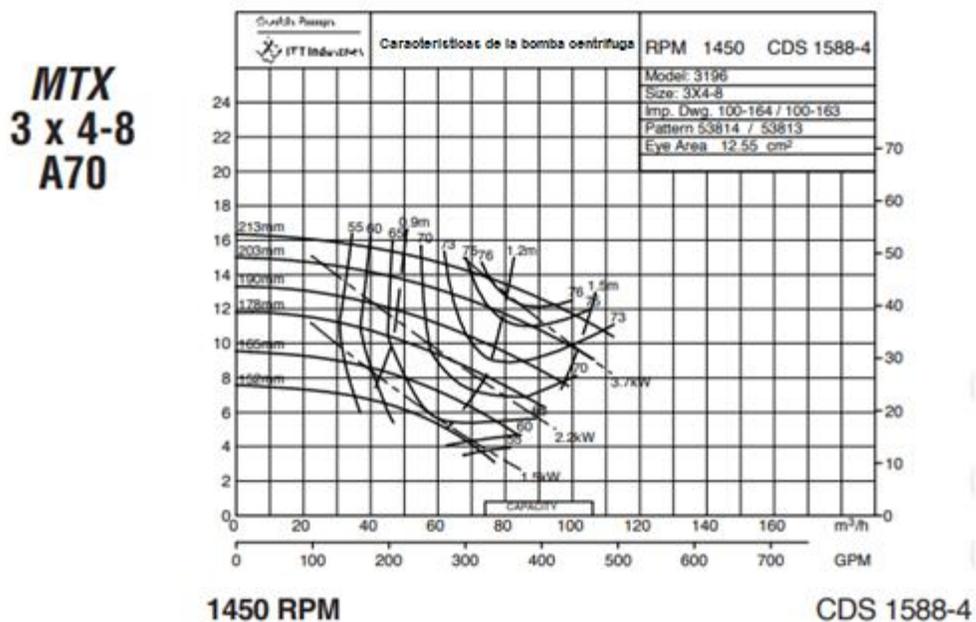
La bomba cumple satisfactoriamente con los requerimientos del proceso por lo que se toma como aceptable. (El mismo cálculo se realizó para seleccionar todas las bombas requeridas en el sistema).

Figura 132 Gráfica de familias de bombas para 1750rpm y 1450 rpm



Tomado de Gould pumps, (PUMPS, 2018)

Figura 133 Curvas características de una bomba centrífuga para caudal de entrada al tratamiento terciario



Tomado de Gould pumps (PUMPS, 2018)

## 8. Determinación de pérdidas por evaporación de agua en tanques abiertos

Durante el análisis y diseño del equipo se planteó la posibilidad de tener pérdidas por evaporación de los tanques debido a las temperaturas donde se realizará el montaje de la planta por lo que se realizó el cálculo para determinar la cantidad de agua a perderse por evaporación y así ver si su pérdida era significativa o no para tomarla en cuenta en el balance de masa del sistema (Monteith, 1981).

Como se muestra a continuación:

$$E_0 = \frac{\frac{700 \cdot (25^\circ\text{C} + (0.006 \cdot 150\text{m}))}{(100 - -91.51^\circ)} + 15(25^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C})}{(80 - 25^\circ\text{C})} = \frac{2.82\text{mm}}{d} = \frac{0.0028\text{m}}{d}$$

No se consideran relevantes considerando la profundidad del tanque por lo que no se tomaron en cuenta para el diseño del sistema, sin embargo, si los tanques a dimensionar tienen profundidades menores a 1m deben ser tomadas en cuenta (Linacre, 1977).

## 9. Determinación de dosificación de bacterias Biozyme FS/AC

Según la ficha técnica del producto Biozyme FS/AC<sup>123</sup> se emplea una dosis de 6 g/m<sup>3</sup> de agua, por lo que para dosificar la cantidad adecuada para el tamaño del tanque aireado se requieren de 1.2 kg del producto en el tanque.

$$\text{Dosis} = \frac{6\text{g}}{\text{m}^3} \left( \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \right) \times 196.26\text{m}^3 = 1.2\text{kg enzimas cada 8 días}$$

La dosis se aplica cada 8 días debido a que es el tiempo de retención del agua en el sistema y es la cantidad de tiempo que necesitarían estar en el tanque para lograr un 55% de remoción.

---

<sup>123</sup> Ver ficha técnica en la Figura 134 de anexos

Figura 134 Ficha técnica de bacterias y enzimas Biozyme FS/AC



**Fichas técnicas de los productos:**

**FICHA TÉCNICA**

<b>Apariencia física</b>	Polvo bronceado, de fácil flujo.
<b>Olor</b>	Fragancia agradable a levadura.
<b>Ingredientes</b>	Cultivos viables de bacterias.
<b>Actividad</b>	Inmediata
<b>Rango de pH efectivo</b>	4.0 – 10.0
<b>Rango de temperatura específico</b>	(5 – 50) °C
<b>Estabilidad</b>	12 – 24 meses
<b>Aplicación</b>	6 gramos por cada metro cúbico de agua diariamente.
<b>Conteo de Actividad</b>	1*10 <sup>12</sup> unidades formadoras de colonias por gramo. Organismos digestores de desechos sólidos y grasas. Organismos y enzimas digestores de proteínas y celulosa.
<b>Organismos contenidos:</b>	<i>Bacillus Subtilis, bacillus Polymxa, bacillus megaterium, Bacillus licheniformis.</i>
<b>Enzimas Contenidas:</b>	Celulasa, lipasa, proteasa, Hemicelulasa, entre otras.

Avalado por el Inventario de la EPA TS  
 Registro de la FDA #12925762678  
 Origen del Producto: CANADA

Los organismos en Biozyme AC biológico, en polvo, cumple con las normas de:

“El Ministerio de Ambiente Canadiense, Listas DSL y Clase 1, en Estados Unidos, Asia, Australia, Europa y la mayoría de países como organismos no patógenos que no producen organismos con forma de esferas no mutantes, ni forma esporas”.

10. Montaje y datos obtenidos de experimento de remoción de nitrógeno utilizando el producto Biozyme FS/AC

Figura 135 Esterilización de frascos colectores de muestra en autoclave



Figura 136 Muestras recolectadas de fosa de compras (oficinas administrativas)



Figura 137 Sistema con agitación de primera prueba realizada donde se observa el aumento de temperatura ocurrido en el último día de análisis

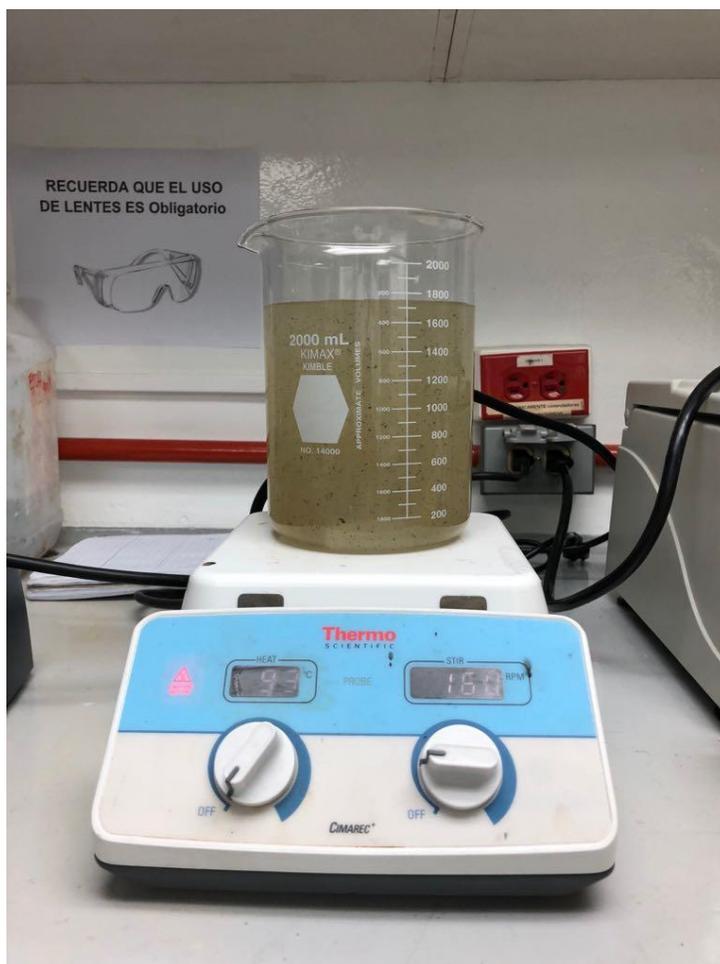


Figura 138 Resultados de prueba de pH realizada

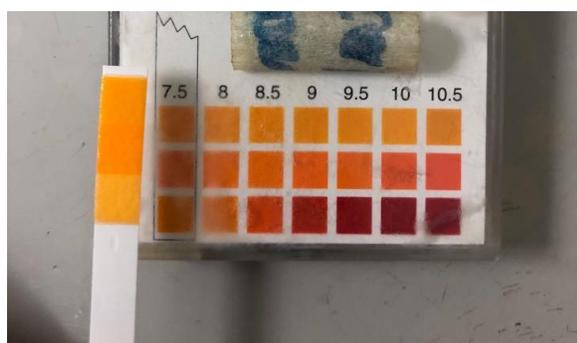


Figura 139 Espuma formada y crecimiento de algas en el agua residual tratada durante la segunda prueba



Figura 140 Cantidad de enzimas agregada y apariencia física del producto utilizado



Figura 141 Colorímetro utilizado y una muestra analizada del kit de nitrógeno total comparada contra el blanco



Figura 142 Agua al finalizar el tratamiento, con los sólidos sedimentados



Figura 143 Curva de remoción de nitrógeno utilizando Biozyme FS/AC primera prueba de 95h.

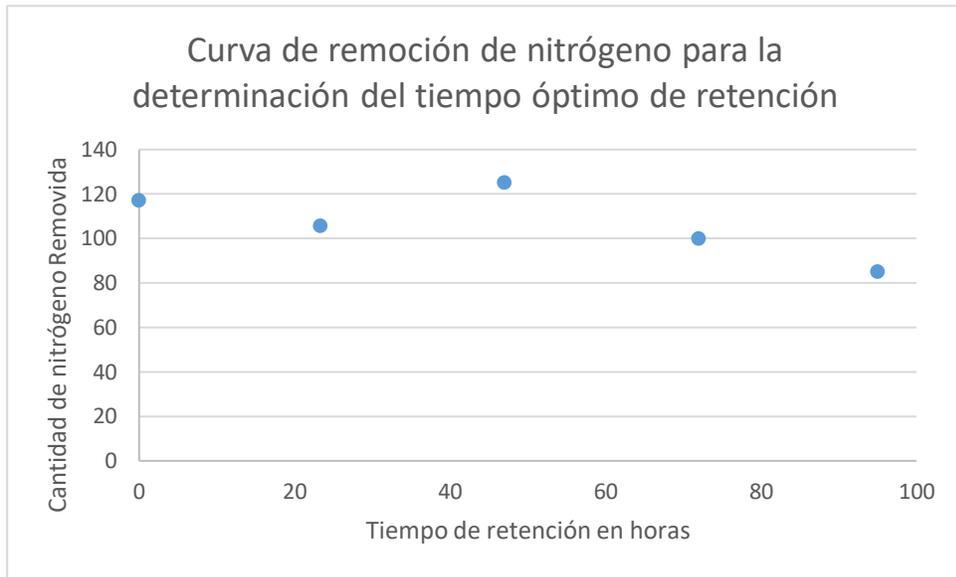


Figura 144 Curva de remoción de nitrógeno utilizando Biozyme FS/AC durante 166h

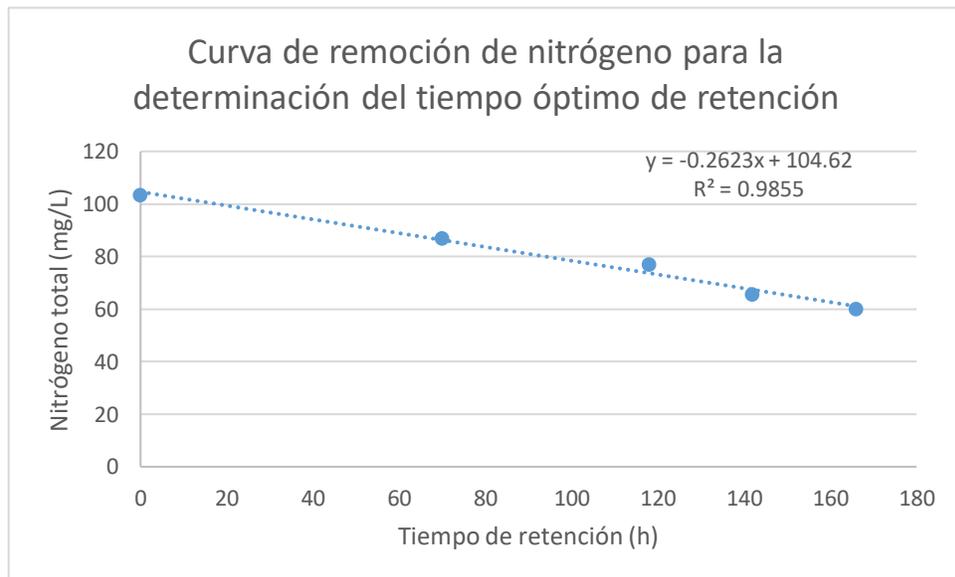


Tabla 199 Concentración de nitrógeno medida en el tiempo, durante las 95h de experimentación

Primera prueba realizada		
Fecha	Tiempo enzimas en reactor (h)	[nitrógeno] ( $\pm 3$ g/m <sup>3</sup> )
16/04/2018	0	117
17/04/2018	23.3	105.5
18/04/2018	47	125
19/04/2018	72	100
20/04/2018	95	85
Remoción alcanzada (%)		27.35 $\pm$ 9%

Tabla 200 Concentración de nitrógeno durante 166h de experimentación

Segunda prueba realizada		
Fecha	Tiempo enzimas en reactor (h)	[nitrógeno] ( $\pm 3$ g/m <sup>3</sup> )
27/04/2018	0	103
30/04/2018	70	87
2/05/2018	118	77
3/05/2018	142	65.5
4/05/2018	166	60
Remoción alcanzada (%)		42 $\pm$ 9%

## 11. Cálculo de concentraciones de entrada al mezclar tratamiento primario y secundario

Tabla 201 Parámetros de salida de DBO, DQO, SST y caudales de tratamiento primario y secundario

Parámetro	Tratamiento primario	Tratamiento secundario
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	228	1292
DBO (g/m <sup>3</sup> )	363	75
DQO (g/m <sup>3</sup> )	574.1	119
SST (g/m <sup>3</sup> )	105	42

Para determinar la composición del agua en base a la mezcla de los caudales se realizó un promedio ponderado como se muestra a continuación para DBO (el mismo cálculo se realizó para los otros parámetros). Partiendo que del total del agua el 85% corresponde al caudal de salida del tratamiento secundario y el 15% del caudal proveniente del tratamiento primario

$$\text{promedio ponderado} = \left( 75 \frac{\text{gDBO}}{\text{m}^3} \right) (0.85) = \frac{63.75 \text{gDBO}}{\text{m}^3}$$

$$\text{promedio ponderado} = \left(363 \frac{gDBO}{m^3}\right)(0.15) = \frac{54.45gDBO}{m^3}$$

$$\text{Concentración final} = 63.75 \frac{gDBO}{m^3} + 54.45 \frac{gDBO}{m^3} = \frac{118gDBO}{m^3}$$

Con los nuevos parámetros de entrada se realizan todos los cálculos de la misma manera como se describen en memoria de cálculo de zona aireada, anóxica y clarificador secundario obteniendo un porcentaje de remoción de nitratos en la zona anóxica del 79%.

Tabla 202 Composición típica de aguas residuales de tipo doméstico según el caudal y concentración del agua

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Baja	Media	Alta
Sólidos Totales (ST)	mg/l	390	720	1230
Sólidos Disueltos (TDS)	mg/l	270	500	860
Fijos	mg/L	160	300	520
Volátiles	mg/L	110	200	340
Sólidos Suspendidos, totales (SST)	mg/L	120	210	400
Fijos	mg/L	25	50	85
Volátiles	mg/l	95	160	315
Sólidos Sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno DBO 5-d 20°C	mg/l	110	190	350
Carbón orgánico Total (COT)	mg/l	80	140	260
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	250	430	800
Nitrógeno total (N)	mg/l	20	40	70
Orgánico	mg/l	8	15	25
Amonio libre	mg/l	12	25	45
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo Total	mg/l	4	7	12
Orgánico	mg/l	1	2	4
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	90
Sulfatos	mg/l	20	30	50
Aceites y grasas	mg/L	50	90	100
Compuestos orgánicos volátiles	mg/l	<100	100-400	>400
Coliformes Totales	No./100 ml.	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>10</sup>
Coliformes fecales	No./100 ml.	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>8</sup>
<i>Cryptosporidium accyts</i>	No./100 mL	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>1</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>2</sup>
<i>Giardia Lambía cysts</i>	No./100 ml.	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>1</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>2</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>3</sup>

a. Bajas concentraciones con un caudal de 750 L/cápita\*d o 200 gal/cápita\*d.  
 Concentración media basada en un caudal de 480 L/cápita\*d (120 gal/cápita\*d)  
 Concentración altaa basada en un caudal de 240L/cápita\*d (80 gal/cápita\*d).  
 b. mg/L = g/m<sup>3</sup>.

(Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 203 Resumen de resultados de diseño para sistema colocado después de filtro anaeróbico de flujo ascendente

TRATAMIENTO DESPUÉS DE FAFA		
Caudal	1520	(m <sup>3</sup> /d)
	Zona aireada	
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Oxígeno requerido	750.7	kg/d
Volumen	281	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	4	h
F/M	0.3	g DBO/g VSS*día
Alto	4.5	m
Ancho	8	m
Profundidad	8	m
	Zona anóxica	
Volumen	189.9	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	3	h
F/M <sub>b</sub>	0.77	g DBO/g biomasa*día
Tasa de desnitrificación	63	%
Concentración de Nitrógeno total	35.08	g/m <sup>3</sup>

Tabla 204 Resumen de resultados de diseño para sistema colocado después de laguna de estabilización anaeróbica

TRATAMIENTO DESPUÉS DE LAGUNA ESTABILIZACIÓN ANAERÓBICA		
Caudal	1520	(m <sup>3</sup> /d)
	ZONA AIREADA	
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Oxígeno requerido	830.79	kg/d
Volumen	427	m <sup>3</sup>
tiempo retención	7	h
F/M	0.23	g DBO/g VSS*día
alto	5	m
ancho	9	m
profundidad	9	m
	ZONA ANÓXICA	
Volumen	189.97	m <sup>3</sup>
Tiempo retención	3	h
F/M <sub>b</sub>	1.17	g DBO/g biomasa*día
Tasa de desnitrificación	0.69	%
Concentración de Nitrógeno total	29.62	g/m <sup>3</sup>

## 12. Cálculo de concentración de nitrógeno de salida con la mezcla de tratamiento anóxico/aireado y enzimas

Al obtener el porcentaje de remoción de nitratos en la zona anóxica del 54% para el tratamiento sin desviación de caudal del tratamiento primario. Se le agrega el 55% de remoción dada por el uso del producto Biozyme FS/AC asumiendo que la eficiencia de remoción se mantiene constante durante las 210 h de tratamiento. (basándose en el comportamiento observado de la Figura 144). Se realizó el siguiente cálculo:

$$[\text{Nitrógeno total}] = \left( \frac{94.16g}{m^3} - \left( \frac{94.16g}{m^3} * 54\% \right) + 0.5 \frac{g}{m^3} \right) = 43.88 \frac{gN_{total}}{m^3}$$

Con la remoción de las enzimas:

$$[\text{Nitrógeno total}] = 43.88 \frac{gN_{total}}{m^3} - \left( 43.88 \frac{gN_{total}}{m^3} * 55\% \right) = 20.0 \frac{gN_{total}}{m^3}$$

Tabla 205 Composición de la mezcla de nitrógeno de salida según cálculos teóricos

Concentración NH <sub>4</sub> -N	0.50 (g/m <sup>3</sup> )
Concentración de NO <sub>3</sub> -N	19..5 (g/m <sup>3</sup> )

13. Análisis de laboratorio realizados durante experimentación con Biozyme FS/AC

Figura 145 Proceso de medición de nitrógeno total utilizando HACH

Method 10072

**NITROGEN, TOTAL, HR, Test 'N Tube™ (10.0 to 150.0 mg/L N)**

---

**TNT Método de digestión con persulfato** **Para agua y agua residual**









- 1. Encender el reactor DRB 200, precalentar entre 103-106 °C. (el óptimo es 105°C).**

Nota: Para prueba de precisión correr un estándar de 125mL de NH<sub>3</sub>-N en un análisis completo.
- 2. Preparar un blanco:** Utilizando un embudo agregar el contenido de un sobre de Persulfato de nitrógeno total a un tubo de HR Nitrógeno total digestión por medio de hidróxido.

Nota: Limpiar todo el reactivo restante que quede en las paredes del tubo.
- 3. Agregar 0.5mL de agua desmineralizada al tubo, cerrar y agitar vigorosamente por 30 segundos.** Este será el blanco procesarlo de la misma manera que la muestra, incluyendo la digestión (seguir en el paso 6).

Nota: el agua debe ser libre de nitrógeno, el reactivo puede no disolverse todo, un blanco es suficiente para todos los análisis el blanco es estable durante 7 días guardandolo en la oscuridad.
- 4. Preparación de la muestra:** Usando un sobre agregar el contenido de un sobre de persulfato de nitrógeno total a un tubo de HR nitrógeno total digestión por medio de hidróxido.

Nota: Limpiar todo el reactivo que quede en las paredes o en la boquilla del tubo.

Tomado de (HACH, 2009)

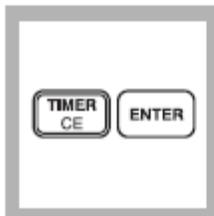
## NITROGEN, TOTAL, HR, Test <sup>3</sup>N Tube, continuación



13. Tapar e invertir lentamente para mezclar 10 veces. el tubo se calentará.

Nota: Para tener una recuperación adecuada la mezcla es importante. Sostener el tubo de la tapadera de manera vertical e invertir el tubo hasta que toda la solución fluya hacia el tapón, realizar una pausa y regresar el tubo a su posición original, esperar nuevamente hasta que todo el líquido fluya.

Esa será una inversión (realizar 10). (10 inversiones = 30 segundos).



14. La pantalla mostrará 05:00 timer 3

Presionar: **ENTER**

Una reacción de 5 minutos va a comenzar. No invertir el tubo durante este tiempo.

Nota: El color amarillo se intensificará



15. Insertar el adaptador COD/TNT al equipo, rotándolo hasta que se encuentre en posición. Luego presionarlo hasta que esté insertado por completo.

Nota: Para aumentar el desempeño no remover la banda difusora de luz.



16. Cuando suene el timer, limpiar la parte de afuera del tubo (el que contiene el blanco).

Colocar el tubo en el equipo con el logo viendo hacia enfrente. Insertarlo hasta que se encuentre sentado dentro del equipo. Cubrir el tubo con la tapadera del instrumento y no moverlo hacia los lados mientras se inserta.

Nota: De ser necesario limpiar con una toalla húmeda el tubo para remover huellas de los dedos o cualquier otra marca.

Tomado de (HACH, 2009)

## NITROGEN, TOTAL, HR, Test 'N Tube, continuación

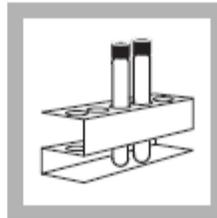


5. Agregar 0.5mL de la muestra en el tubo. Tapar y agitar vigorosamente durante 10s.

Nota: El persulfato puede no disolverse por completo después de agitar.



6. Colocar los tubos en el Reactor durante 30 minutos.



7. Usar guantes para remover los tubos calientes. Permitir que se enfríen a temperatura ambiente.

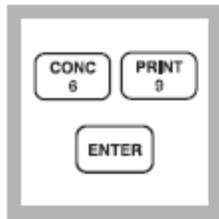
Nota: es importante remover los tubos exactamente después de los 30min.



8. Seleccionar el programa almacenado para el análisis "Test 'N Tube HR Total Nitrogen."

Presionar: **PRGM**

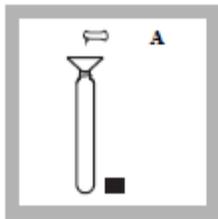
La pantalla mostrará **PRGM ?**



9. Presionar: **69 ENTER**

La pantalla mostrará **mg/L** y el ícono de **"ZERO"**.

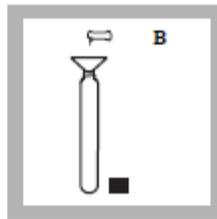
Nota: para medir concentraciones de  $\text{NH}_3$  o  $\text{NO}_3$  presionar la tecla **CONC**.



10. Agregar el contenido de una bolsa de reactivo A al tubo con el blanco o la muestra. agitar durante 15s.

Presionar **"TIMER ENTER"** luego de agitar.

Una reacción de 3 minutos va a comenzar.



11. Luego de sonar el cronómetro agregar una bolsa de reactivo B al tubo. Tapar y agitar durante 15s.

La pantalla mostrará: **"02:00 Timer 2"**  
Presionar: **ENTER** luego de agitar. Una reacción de 2 minutos comenzará.

Nota: El reactivo no se disolverá por completo La solución se tornará amarilla.



12. Luego de que suene el timer, remover la tapadera del tubo "Total Nitrogen Reagent C"

Agregar 2mL de 1 muestra tratada y digerida.

El tubo se calentará.

Tomado de (HACH, 2009)

## NITROGEN, TOTAL, HR, Test 'N Tube, Continuación

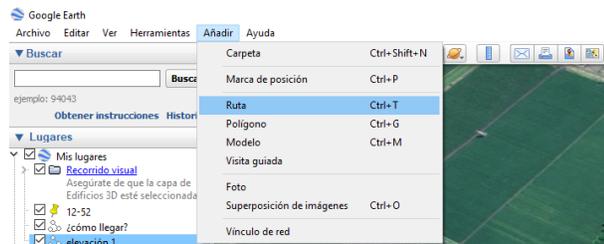
			
<b>17. Presionar "ZERO"</b> El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará en pantalla: <b>0 mg/L N</b>	<b>18. Limpiar el tubo con la muestra del reactivo C.</b> Nota: Remover las huellas y otras marcas en el tubo de ensayo.	<b>19. Colocar el tubo en el adaptador de la misma manera que el blanco</b> Nota: Múltiples muestras pueden leerse después de haber colocado el blanco la primera vez.	<b>20. Presionar "READ"</b> El resultado se mostrará en pantalla en mg/L N.

Tomado de (HACH, 2009)

### 14. Determinación de la elevación del terreno utilizando Google Earth ®

Las coordenadas del ingenio en cuestión se midieron en una visita realizada, a partir de ellas se ubicó el terreno en el programa. Una vez en el terreno se realizó una ruta dando click en añadir, ruta

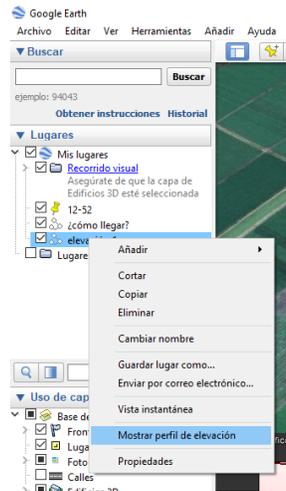
Figura 146 Trazado de la ruta a medirle perfil de elevación



Una vez seleccionada la opción ruta se le colocará un nombre (para este ejemplo se nombró como “elevación”) y se trazará en el terreno al que se le desea medir la elevación.

Al finalizar el trazado de la línea, dar click en aceptar y luego en la barra izquierda se mostrará una viñeta con el nombre “Elevación”. Esta vez dar click derecho y seleccionar “Mostrar perfil de elevación” como se observa en la Figura 147.

Figura 147 Ejemplificación de obtención del perfil de elevación del terreno.



Se mostrará una gráfica como la de la Figura 123 y una flecha roja se moverá a través de la ruta trazada donde indicará la elevación según la posición.

## 15. Cálculos intermedios relevantes para la memoria de cálculo del sistema de lodos activados aplicadas a todas las variantes de cálculo

Tabla 206 Determinación de los porcentajes de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en los sólidos suspendidos totales (SST)

TIPO DE AGUA	VSS	TSS	RELACIÓN
CONCENTRADA	315	400	78.75%
MODERADA	160	210	76.19%
DILUÍDA	95	120	79.17%
TOTAL			78.04%

Tabla 207 Determinación de la relación de sDBO en DBO

TIPO DE AGUA	DBO	SDBO	RELACIÓN
CONCENTRADA	530	140	26.42%
MODERADA	380	100	26.32%
DILUÍDA	230	60	26.09%
MUY DILUÍDA	150	40	26.67%
TOTAL			26.37%

Tabla 208 Determinación de la relación de sDQO en DQO

TIPO DE AGUA	DQO	SDQO	RELACIÓN
CONCENTRADA	740	300	40.54%
MODERADA	530	210	39.62%
DILUÍDA	320	130	40.63%
MUY DILUÍDA	210	80	38.10%
TOTAL			39.72%

Finalmente, se puede estimar la concentración de DBO en la salida, partiendo del valor teórico que en sistemas de lodos activados bien operados con tiempos de retención mayores a 4d la concentración de DBO es menor a  $3\text{g}/\text{m}^3$ . Según el parámetro obtenido del cálculo realizado en el sistema de aireación la concentración de salida es de  $0.50\text{ g}/\text{m}^3$ , no obstante, en la práctica se tienen valores entre  $2 - 4\text{ g}/\text{m}^3$  y teniendo una buena clarificación secundaria los sólidos suspendidos se encuentran en valores entre  $5 - 15\text{g}/\text{m}^3$ .

Utilizando las siguientes relaciones estequiométricas se llega a la concentración de DBO del efluente:

$$BOD_e = \frac{3\text{gDBO}}{\text{m}^3} + \left(\frac{1.61\text{gDBO}}{1\text{ g VSS}}\right)\left(\frac{0.68\text{gVSS}}{1\text{ gTSS}}\right)\left(\frac{10\text{gTSS}}{\text{m}^3}\right) = \frac{13.86\text{gDBO}_e}{\text{m}^3}$$

El mismo cálculo se realizó para el diseño del sistema ubicado después de la laguna de estabilización anaeróbica con un resultado de:  $11.47\text{gDBO}/\text{m}^3$ .

## 16. Datos iniciales para el cálculo de la propuesta del sistema de lodos activados

Tabla 209 Características principales del agua residual proveniente de una laguna de estabilización anaeróbica

Características del agua	Valor	Unidades
Sólidos suspendidos totales (SST)	37	$\text{g}/\text{m}^3$
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	109	$\text{g}/\text{m}^3$
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	344	$\text{g}/\text{m}^3$
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	28.87	$\text{g}/\text{m}^3$
Nitrógeno Total (N)	94.16	$\text{g}/\text{m}^3$
Caudal	1520	$\text{m}^3/\text{d}$

Tabla 210 Características principales del agua residual proveniente de un filtro anaeróbico de flujo ascendente

Características del agua	Valor	Unidades
Sólidos suspendidos totales (SST)	42	g/ m <sup>3</sup>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	75	g/ m <sup>3</sup>
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	119	g/ m <sup>3</sup>
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	32.78	g/ m <sup>3</sup>
Nitrógeno Total (N)	94.16	g/ m <sup>3</sup>
Caudal	1517	m <sup>3</sup> /d

## 17. Análisis de Error

Determinación de la incertidumbre del porcentaje de remoción de nitrógeno durante las pruebas realizadas del producto biozyme FS/AC. El instrumento de medición utilizado (Hach DR900) tiene una incertidumbre de  $\pm 3$  para la primera prueba realizada de 95h.

$$1 - \text{Porcentaje de remoción} = 72\% * \sqrt{\left(\frac{117g}{m^3}\right)^2 + \left(\frac{85g}{3g/m^3}\right)^2} = 35\%$$

$$\% \text{ de remoción} = \sqrt{(34.70)^2} * 27\% = 9\%$$

Determinación de la incertidumbre del porcentaje de remoción de nitrógeno durante las pruebas realizadas del producto biozyme FS/AC de 166h bajo las mismas condiciones de análisis

$$1 - \text{Porcentaje de remoción} = 57\% * \sqrt{\left(\frac{103.5g}{m^3}\right)^2 + \left(\frac{60g}{3g/m^3}\right)^2} = 23\%$$

$$\% \text{ de remoción} = \sqrt{(22.73)^2} * 42\% = 9\%$$

Figura 148 Composición de agua para determinación de cantidad de sDBO, sDQO.

Analysis parameters	Symbol	Unit <sup>1)</sup>	Wastewater type			
			Concentrated	Moderate	Diluted	Very diluted
Biochemical oxygen demand, BOD						
– infinite	$C_{BOD\infty}$	$g\ O_2/m^3$	530	380	230	150
– 7 days	$C_{BOD7}$	$g\ O_2/m^3$	400	290	170	115
– 5 days	$C_{BOD}$	$g\ O_2/m^3$	350	250	150	100
– dissolved	$S_{BOD}$	$g\ O_2/m^3$	140	100	60	40
– dissolved, very easily degradable	$S_{BOD}$	$g\ O_2/m^3$	70	50	30	20
– after 2h settling	$S_{BOD(2h)}$	$g\ O_2/m^3$	250	175	110	70
Chemical oxygen demand with dichromate, COD						
– total	$C_{COD}$	$g\ O_2/m^3$	740	530	320	210
– dissolved	$S_{COD}$	$g\ O_2/m^3$	300	210	130	80
– suspended	$X_{COD}$	$g\ O_2/m^3$	440	320	190	130
– after 2h settling	$C_{COD(2h)}$	$g\ O_2/m^3$	530	370	230	150
– inert, total	$C_I$	$g\ O_2/m^3$	180	130	80	50
– dissolved	$S_I$	$g\ O_2/m^3$	30	20	15	10
– suspended	$X_I$	$g\ O_2/m^3$	150	110	65	40
– degradable, total		$g\ O_2/m^3$	560	400	240	160
– very easily degradable	$S_{HAC,COD}$	$g\ O_2/m^3$	90	60	40	25
– easily degradable	$S_{S,COD}$	$g\ O_2/m^3$	180	130	75	50
– slowly degradable	$X_{COD}$	$g\ O_2/m^3$	290	210	125	85
– heterotrophic biomass	$X_H$	$g\ O_2/m^3$	120	90	55	35

(Henze & Harremoës, 2001)

## D. Módulo 4: Diseño del tratamiento cuaternario de una planta de tratamiento anaeróbico para reducir la concentración de coliformes fecales del agua residual de un ingenio azucarero

### 1. Datos originales

Tabla 211. Número más probable de Coliformes fecales por cada 100 mL en las tres fosas sépticas analizadas y su contribución al caudal total.

Baño	Contribución	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
Vestidores	19.783 %	540000
Tornos	6.492 %	49000
Bodega	3.129 %	94000

Tomado del módulo “Diseño del tratamiento preliminar y primario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, provenientes de 27 baterías de baños a partir de un caudal teórico”

Tabla 212. Parámetros de los afluentes al tanque de contacto para el proceso de desinfección, que provienen del clarificador

Parámetro	Valor FAFA	Valor laguna
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /d)	612.04	616.83
NH <sub>4</sub> – N (mg/L)	0.50	0.50
Nitrógeno Total (mg/L)	19.50	16.90
pH	7.5	7.5

Tomado del módulo “Diseño del sistema terciario de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de tipo ordinario”

### 2. Datos calculados

Tabla 213. Dosis inicial de cloro y tiempo para el proceso de desinfección a partir del valor Ct determinado

t (min)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C (mg/L)	Ct (mg min/L)
60	0.432	0.252	15.14
45	0.550	0.336	15.14
30	0.789	0.505	15.14
15	1.508	1.009	15.14

Tabla 214. Variación del caudal de la bomba dosificadora en base al cloro libre residual presente en los efluentes de la PTAR

Cloro libre residual (mg/L)	Solución NaOCl (L/d)
0.3	10.42
0.4	7.82
0.6	5.21
0.8	3.91
1.0	3.13
1.5	2.08
2.0	1.56

Tabla 215. Dosificación de NaOCl en función del valor de coliformes fecales que se desea alcanzar.

NMP/100 mL	Solución NaOCl (L/d)
9000	5.50
8000	5.73
7000	6.00
6000	6.34
5000	6.77
4000	7.33
3000	8.11
2000	9.37
1000	11.98

### 3. Memoria de Cálculo

a. Determinación de la concentración de cloro residual necesaria luego de un tiempo de contacto  $t$

A partir de la cantidad de coliformes encontrada en tres de las fosas se estimó la fracción de inactivación requerida si se busca alcanzar un valor de 9000 NMP/ 100 mL de coliformes.

$$\frac{N}{N_0} = \frac{9.00 * 10^3 \text{ NMP}/100 \text{ mL}}{3.84 * 10^5 \text{ NMP}/100 \text{ mL}} = 0.0234$$

Se utilizó la Ecuación 62 para determinar la cantidad de cloro residual, tomando los valores mostrados en la Tabla 25.

$$C = C_0[0.3 \exp(-1.00 \text{ min}^{-1} t) + 0.7 \exp(-0.003 \text{ min}^{-1} t)]$$

Esta ecuación se sustituyó en el modelo de Selleck Collins para determinar la concentración inicial necesaria a partir de la inactivación requerida de coliformes y distintos valores de tiempo de contacto.

$$0.0234 = (0.25 Ct)^{-2.82}$$

$$0.0234 = (0.25 C_0 [0.3 \exp(-1.00 \text{ min}^{-1} t) + 0.7 \exp(-0.003 \text{ min}^{-1} t)] t)^{-2.82}$$

Por ejemplo, para  $t = 30 \text{ min}$

$$0.0234 = (0.25 C_0 [0.3 \exp(-1.00 \text{ min}^{-1} (30 \text{ min})) + 0.7 \exp(-0.003 \text{ min}^{-1} (30 \text{ min}))]) (30 \text{ min})^{-2.82}$$

$$C_0 = 0.789 \text{ mg/L}$$

Al conocer la concentración de cloro activo inicial necesaria para el proceso de desinfección se calculó la concentración de cloro residual luego de 30 min de contacto, y con ello el valor Ct que corresponde al tratamiento

$$C = (0.789 \text{ mg/L}) [0.3 \exp(-1.00 \text{ min}^{-1} (30 \text{ min})) + 0.7 \exp(-0.003 \text{ min}^{-1} (30 \text{ min}))] = 0.505 \text{ mg/L}$$

$$Ct = \frac{0.505 \text{ mg}}{L} (30 \text{ min}) = \frac{15.14 \text{ mg min}}{L}$$

b. Determinación de la dosis de solución de NaOCl al 10 % que debe añadirse

Según la Tabla 20 se obtuvo el porcentaje m/m de cloro activo presente en la solución, que equivale al 8.8% (m/m), y una gravedad específica de 1.142.

Se estableció un periodo de almacenamiento de 30 días. Para conocer la concentración de cloro activo presente, luego de este tiempo, se utilizó la Ecuación 55. La constante de velocidad de reacción se obtuvo al extrapolar los datos de la Tabla 21 con una temperatura de 25 °C (298 K).

$$k_2 = 1.84 * 10^{-6} T - 0.52 * 10^{-3}$$

$$k_2 = 1.84 * 10^{-6} (298 \text{ K}) - 0.52 * 10^{-3} = 2.83 * 10^{-5} \text{ g OCl}^{-1} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

$$[\text{OCl}^{-1}]_t = \left( \left( \frac{9k_2}{2} \right) t + \frac{1}{[\text{OCl}^{-1}]_0} \right)^{-1}$$

$$[OCl^{-1}]_t = \left( \left( \frac{9}{2} \right) \left( 2.83 * 10^{-5} \frac{g OCl^{-}}{L d} \right) (30 d) + \frac{1}{72.56 g OCl^{-}/L} \right)^{-1} = 56.81 g OCl^{-}/L$$

$$[Cl_2] = [OCl^{-}] \left( \frac{70.91}{51.45} \right) = [56.81 g OCl^{-}/L] \left( \frac{70.91}{51.45} \right) = 78.30 g/L$$

Esta concentración de cloro activo equivale a 6.83 % (m/m) al interpolar con los valores mostrados en la Tabla 20.

Se tomó un valor promedio entre la concentración inicial y el valor al día número 30. Con estos valores, el caudal de agua residual y la concentración inicial de cloro requerida se determinó el flujo de solución de NaOCl necesario para el tratamiento.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{0.789 mg Cl_2}{1 L} \right) \left( \frac{612039 L}{1 d} \right) \left( \frac{1 kg Cl_2}{1 * 10^6 mg Cl_2} \right) \left( \frac{1 kg sol. NaOCl}{0.0779 kg Cl_2} \right) \left( \frac{1 m^3 sol. NaOCl}{1128 kg sol. NaOCl} \right) \left( \frac{1 d}{24 h} \right) \\ & = 2.29 * 10^{-4} m^3 sol NaOCl/h \end{aligned}$$

c. Determinación del volumen para el tanque de almacenamiento de la solución de NaOCl

A partir de la dosificación de cloro se calculó el volumen necesario para el tanque de almacenamiento tomando un tiempo de 30 días para almacenarlo

$$V_{efectivo} = 30 d \left( \frac{24 h}{1 d} \right) \left( \frac{2.29 * 10^{-4} m^3}{h} \right) = 0.165 m^3$$

Esto equivale a 43.5 galones, por lo que se propone adquirir un tanque con capacidad para 50 galones, lo que equivale a un factor de seguridad del 15%.

d. Dimensionamiento del tanque de contacto para el tratamiento de desinfección

Recordemos que (Davis, 2010) recomienda una relación de  $L/W_{ch} = 40$  y  $H/W_{ch} = 3$  para el diseño del tanque. Al calcular la concentración inicial de cloro se definió un tiempo de 30 min, pero este debe corregirse con un factor  $t_{10}/\tau$ , que se encuentra a de la Figura 13.

$$\begin{aligned} \left( \frac{t_{10}}{\tau} \right) &= 0.198 \ln(40) - 0.002 = 0.73 \\ \tau &= \frac{30 min}{0.73} = 41.19 min \end{aligned}$$

Una vez se conoce el tiempo puede calcularse el volumen que necesita el tanque y las dimensiones de este.

$$(41.19 \text{ min}) \left( \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) \left( \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \right) \left( \frac{612039 \text{ L}}{1 \text{ d}} \right) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) = 17.51 \text{ m}^3$$

$$V = (W)(L)(H) = (W)(40W)(3W) = 120W^3$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{V}{120}} = \sqrt[3]{\frac{17.51 \text{ m}^3}{120}} = 0.526 \text{ m}$$

$$L = 40 (0.5264 \text{ m}) = 21.06 \text{ m}; \quad H = 3(0.5458 \text{ m}) = 1.579 \text{ m}$$

Para facilitar el dimensionamiento se aproximaron los valores a las siguientes medidas:

$$L = 22.00 \text{ m}; \quad H = 1.60 \text{ m}; \quad W = 0.50 \text{ m}$$

$$V = (22.00 \text{ m})(1.60 \text{ m})(0.50 \text{ m}) = 17.60 \text{ m}^3$$

Por lo que se tiene un nuevo tiempo de retención hidráulica

$$\tau = 17.60 \text{ m}^3 \left( \frac{1 \text{ d}}{612.039 \text{ m}^3} \right) \left( \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right) \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) = 41.41 \text{ min}$$

Se debe verificar que el número de dispersión sea menor a 0.015 para que exista una buena desinfección

$$D_{eq} = 4r_H = 4 \frac{A_s}{\text{Perímetro mojado}}$$

(Ecuación 179)

Donde:

$D_{eq}$  es el diámetro equivalente, que se calcula cuando el área de flujo no es un círculo

$A_s$  es el área transversal de flujo, perpendicular a la dirección de este

Perímetro mojado es el perímetro del área transversal que se encuentra en contacto con el fluido

$$D_{eq} = \frac{4 (0.50 \text{ m})(1.60 \text{ m})}{0.50 \text{ m} + 1.60 \text{ m} + 1.60 \text{ m}} = 0.86 \text{ m}$$

$$Re = \frac{uD_{eq}}{\nu}$$

(Ecuación 180)

Donde:

$D_{eq}$  es el diámetro equivalente, que se calcula cuando el área de flujo no es un círculo

$u$  es la velocidad lineal del fluido

$\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido

$$Re = \frac{\left(\frac{22.0 \text{ m}}{41.41 \text{ min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) (0.86 \text{ m})}{8.93 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}} = 8576$$

$$D = 1.01(8.93 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})(8576)^{0.875} = 0.00249 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$d = \frac{0.00249 \text{ m}^2/\text{s}}{(0.00885 \text{ m/s})(22.0 \text{ m})} = 0.0128$$

La caída de presión en el tanque de contacto se da por la fricción que existe con el concreto con la Ecuación 51.

$$f = \frac{29 (0.015 \text{ m}^{1/6})^2}{(0.215 \text{ m})^{1/3}} = 0.0109$$

e. Determinación del diámetro de tubería

Para determinar la velocidad óptima en una tubería se utilizó una correlación experimental dada por (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

$$u_{opt} = \frac{12\dot{m}^{0.1}}{\rho^{0.36}}$$

(Ecuación 181)

Donde:

$u_{opt}$  es la velocidad lineal óptima a la que debe viajar el fluido en ft/s

$\dot{m}$  es el flujo másico en lb/s

$\rho$  es la densidad del fluido en lb/ft<sup>3</sup>

$$u_{opt} = \frac{12(15.58 \text{ lb/s})^{0.1}}{(62.16 \text{ lb/ft}^3)^{0.36}} = 3.571 \text{ ft/s} \left( \frac{1 \text{ m}}{3.28 \text{ ft}} \right) = 1.089 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{612.039 \text{ m}^3/\text{d} (1 \text{ d}/24 \text{ h})(1 \text{ h}/3600 \text{ s})}{1.089 \text{ m/s}} = 0.0065 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.0065 \text{ m}^2)}{\pi}} = 0.091 \text{ m}$$

Con ayuda de la Figura 128 se decide un diámetro nominal para la tubería

$$DN = 0.091 \text{ m} \left( \frac{39.37 \text{ in}}{1 \text{ m}} \right) = 3.583 \text{ in} \cong 4 \text{ in}$$

f. Dimensionamiento del agitador estático

Se calcula la fracción volumétrica a partir de los flujos volumétricos del agua y la solución de hipoclorito de sodio

$$C_v = \frac{0.005495 \text{ m}^3/\text{d}}{612.039 \text{ m}^3/\text{d} + 0.005495 \text{ m}^3/\text{d}} = 8.98 * 10^{-6}$$

Con la Ecuación 59 se determina el coeficiente de variación inicial para una muestra no mezclada

$$(CV)_0 = \left( \frac{1 - 8.98 * 10^{-6}}{8.98 * 10^{-6}} \right)^{0.5} = 333.74$$

Tomando como 0.05 el valor del coeficiente de variación estándar, se calcula el coeficiente de variación reducido

$$C_0V_r = \frac{0.05}{333.74} = 0.00015$$

Tomando de la Tabla 23 el valor de  $K_i$  correspondiente a un flujo turbulento para un agitador estático SMV, se puede encontrar el largo necesario para el agitador a partir de la Ecuación 58.

$$\frac{L}{D} = \frac{\log C_0V_r}{\log K_i} = \frac{\log 0.00015}{\log 0.33} = 7.943$$

$$L = 7.943(0.1016 \text{ m}) = 0.807 \text{ m}$$

Para determinar la caída de presión que se da en el mezclador se calculó la caída de presión que se daría en una tubería vacía con la misma relación L/D. Para ello se determinó el número de Reynolds en la tubería y se leyó el factor de fricción de Fanning con la Figura 130.

$$Re = \frac{(1.089 \text{ m/s})(0.1016 \text{ m})}{8.93 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.24 * 10^5$$

Se leyó un factor de fricción de Fanning de 0.0042

(Ecuación 182)

$$\Delta P_{pipe} = 4f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{u^2}{2g} \right)$$

Donde:

$\Delta P_{pipe}$  es la caída de presión que se da en la tubería

$f$  es el factor de fricción de Fanning

$L/D$  es la relación de largo/diámetro de la tubería

$u$  es la velocidad lineal del flujo

$g$  es la aceleración debido a la gravedad

$$\Delta P_{pipe} = 4(0.0042) \left( \frac{0.80 \text{ m}}{0.1016 \text{ m}} \right) \left( \frac{(1.089 \text{ m/s})^2}{2 (9.81 \text{ m/s}^2)} \right) = 0.008 \text{ m}$$

Ya con la caída de presión que se daría en una tubería vacía se multiplica por el factor adecuado, que se encuentra en la Tabla 9 para conocer la caída de presión que sufrirá el flujo pasar por el mezclador estático.

$$\Delta P_{sm} = 150 (0.008 \text{ m}) = 1.20 \text{ m}$$

g. Bomba centrífuga

Se planteó un balance de energía entre la superficie del agua en el clarificador y la salida del tanque de desinfección, tal como se muestra en la Figura 149.

(Ecuación 183)

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + W = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + h_f$$

Donde:

$P$  es la presión en el punto

$u$  es la velocidad lineal del flujo

$z$  es la altura del punto con relación a una referencia

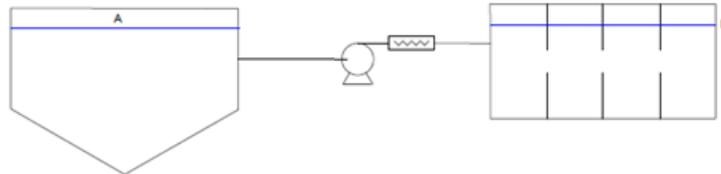
$W$  es la cabeza que debe proporcionar la bomba

$h_f$  es la caída de presión relacionada a pérdidas por fricción

$g$  es la aceleración debido a la gravedad

$\rho$  es la densidad del fluido

Figura 149. Representación de los puntos A y B utilizados para el planteamiento del balance de energía mecánica<sup>124</sup>



Se calcularon las pérdidas por fricción de los accesorios, expansión, contracción, y superficie. Para ello se determinaron los coeficientes de pérdidas por expansión, contracción y accesorios, que se utilizan como la constante de proporcionalidad entre la caída de presión y la carga de velocidad del fluido. Para las pérdidas ocasionadas por la rugosidad de la superficie se determinó el número de Fanning con la Figura 130 y luego la caída de presión con la Ecuación 184.

(Ecuación 184)

$$K_e = \left(1 - \frac{S_a}{S_b}\right)^2$$

Donde:

$K_e$  es el coeficiente de pérdidas por expansión

$S_a$  es el área transversal de la sección estrecha

$S_b$  es el área transversal de la sección más ancha

---

<sup>124</sup> Esta figura no esquematiza el proceso real de desinfección diseñado. Para ver un esquema del proceso diseñado ver la sección de Resultados, página 37.

(Ecuación 185)

$$K_c = 0.4 \left( 1 - \frac{S_b}{S_a} \right)$$

Donde:

$K_e$  es el coeficiente de pérdidas por expansión

$S_a$  es el área transversal de la sección estrecha

$S_b$  es el área transversal de la sección más ancha

Tabla 216. Accesorios colocados en la trayectoria del fluido y sus coeficientes de pérdidas por fricción

Accesorio	Cantidad	Kf <sup>a</sup>
Codo 90°	2	0.75
T	1	0.40
Válvula de bola	2	0.05
Válvula de cheque	2	10.0

Tomado de: (McCabe, Smith, & Harriott, 2007)

En la Tabla 217 se muestra un resumen de los valores obtenidos para las pérdidas por fricción

Caída de presión/ pérdidas por fricción (m)		
Superficie	Tubería	0.09
	Tanque de contacto	2.21*10 <sup>-6</sup>
Expansión	Tubería 0.1016 m (4") – tanque de contacto	0.06
	0.0508 m (2") – 0.1016 m (4")	0.58
Contracción	Clarificador – tubería 0.1016 m (4")	0.02
Accesorios		1.33
Agitador estático		1.20

La cabeza que debe superar la bomba sería entonces la siguiente:

$$W = z_2 - z_1 + h_f = 0.75 \text{ m} + 3.29 \text{ m} = 4.04 \text{ m}$$

Se debe verificar que la bomba seleccionada pueda operar con la carga neta de succión que se tiene disponible.

(Ecuación 186)

$$NPSH = \frac{(P_a - P_v)}{\rho g} - h_f - Z_a$$

Donde:

$NPSH$  es la carga neta de succión positiva

$P$  es la presión absoluta en el punto seleccionado

$P_v$  es la presión de vapor del fluido a esas condiciones

$z$  es la altura del punto con relación a una referencia

$h_f$  es la caída de presión relacionada a la superficie de la tubería

$g$  es la aceleración debido a la gravedad

$\rho$  es la densidad del fluido

$$NPSH = \frac{(101325 - 3170)Pa}{(997 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} - 2.15 \text{ m} = 7.88 \text{ m}$$

En la Figura 152 se determinó que el NPSH requerido es de 1.52 m, por lo que se tiene una carga neta de succión positiva disponible mayor y es posible utilizar la bomba para el sistema.

#### 4. Matriz cualitativa para selección del desinfectante

Tabla 217. Comparación pareada entre los factores que se tomaron en cuenta para la construcción de la matriz

Factor	Comparaciones pareadas						Suma de Preferencias	Ponderación
Mantenimiento	0	0	1	1			2	0.17
Tóxico/peligroso de operar	1			1	1	1	4	0.33
Complejidad del sistema		1		1		1 1	4	0.33
Formación de subproductos			0		0	0 1	1	0.08
Residuos en los efluentes				0	0	0 1	1	0.08
Total							12	1.00

Tabla 218. Matriz cualitativa para la selección del desinfectante.

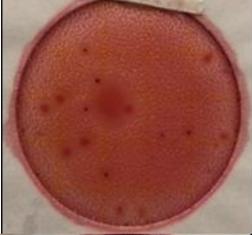
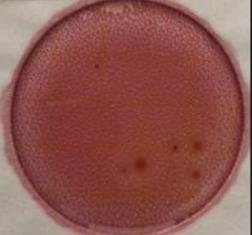
	Mantenimiento	Tóxico/peligroso de operar	Complejidad del sistema	Formación de subproductos	Residuos en los efluentes	Total
Cloro gaseoso	Calificación	1	3	2	3	3
	Ponderación	0.17	0.99	0.66	0.24	0.24
Hipoclorito de sodio	Calificación	1	1	1	3	3
	Ponderación	0.17	0.33	0.33	0.24	0.24
Hipoclorito de calcio	Calificación	1	1	1	3	3
	Ponderación	0.17	0.33	0.33	0.24	0.24
Dioxido de cloro	Calificación	2	3	3	3	3
	Ponderación	0.34	0.99	0.99	0.24	0.24
Ozono	Calificación	3	3	3	3	0
	Ponderación	0.51	0.99	0.99	0.24	0.00
Radiación UV	Calificación	3	1	3	2	0
	Ponderación	0.51	0.33	0.99	0.16	0.00
Ácido peracético	Calificación	2	3	1	3	3
	Ponderación	0.34	0.99	0.33	0.24	0.24
						<b>2.14</b>
						<b>2.80</b>
						<b>2.73</b>
						<b>1.99</b>
						<b>1.31</b>
						<b>2.30</b>
						<b>1.31</b>

## 5. Recuento de coliformes tras desinfección con hipoclorito

Figura 150. Recuento de coliformes fecales en una muestra de agua residual proveniente de una fosa séptica del ingenio azucarero a una dilución 1:100 (5500 UFC/mL)

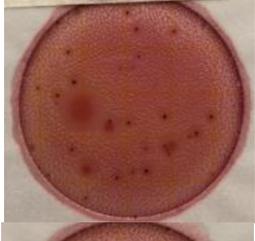


Tabla 219. Recuento de coliformes luego de un proceso de desinfección con hipoclorito de sodio en una muestra de agua residual proveniente de una fosa séptica del ingenio azucarero.

Tiempo (min)	Recuento	UFC/mL	Reducción porcentual
15		$16 \pm 2$	$99.72 \pm 0.03 \%$
30		$6 \pm 1$	$99.88 \pm 0.01 \%$
45		$1 \pm 1$	$99.98 \pm 0.01 \%$

Nota: Los valores mostrados en UFC/mL y de remoción porcentual son el resultado del promedio y desviación estándar de las mediciones en triplicado.

Tabla 220. Recuento de coliformes luego de un proceso de desinfección con hipoclorito de calcio en una muestra de agua residual proveniente de una fosa séptica del ingenio azucarero.

Tiempo (min)	Recuento	UFC/mL	Reducción porcentual
15		$27 \pm 2$	$99.50 \pm 0.04 \%$
30		$21 \pm 1$	$99.61 \pm 0.02 \%$
45		$14 \pm 2$	$99.75 \pm 0.03 \%$

Nota: Los valores mostrados en UFC/mL y de remoción porcentual son el resultado del promedio y desviación estándar de las mediciones en triplicado.

6. Parámetros establecidos en el Artículo 20 del Acuerdo 236-2006 “Reglamento de Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Tomado de: (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006)

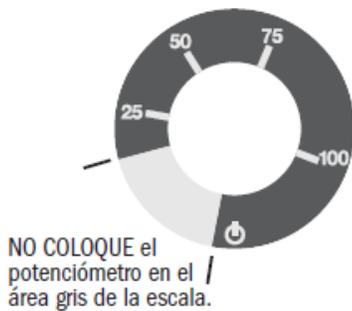
## 7. Bomba dosificadora

Figura 150 Caudales proporcionados por los distintos modelos de bombas dosificadoras marca Stenner®

### ECON VX

Prefijo del Número de Parte	Tubo de Bombeo	Conjunto de Rodillos	Galones por Día	Presión psi	Litros por Día	Presión bar
E10VXB	B	White	1.2 to 14.0	25	4.5 to 52.9	1.7
E10VXA	A	White	0.8 to 7.4	25	3.0 to 28.0	1.7
E20VXC	C	White	4.4 to 38.8	25	16.6 to 146.7	1.7
E20VXB	B	White	1.6 to 24.8	25	6.0 to 93.7	1.7
E10VXH	H	Black	1.7 to 14.0	80	6.4 to 52.9	5.5
E20VXH	H	Black	2.7 to 23.5	80	10.2 to 88.8	5.5

Caudales aproximados @ 50/60Hz



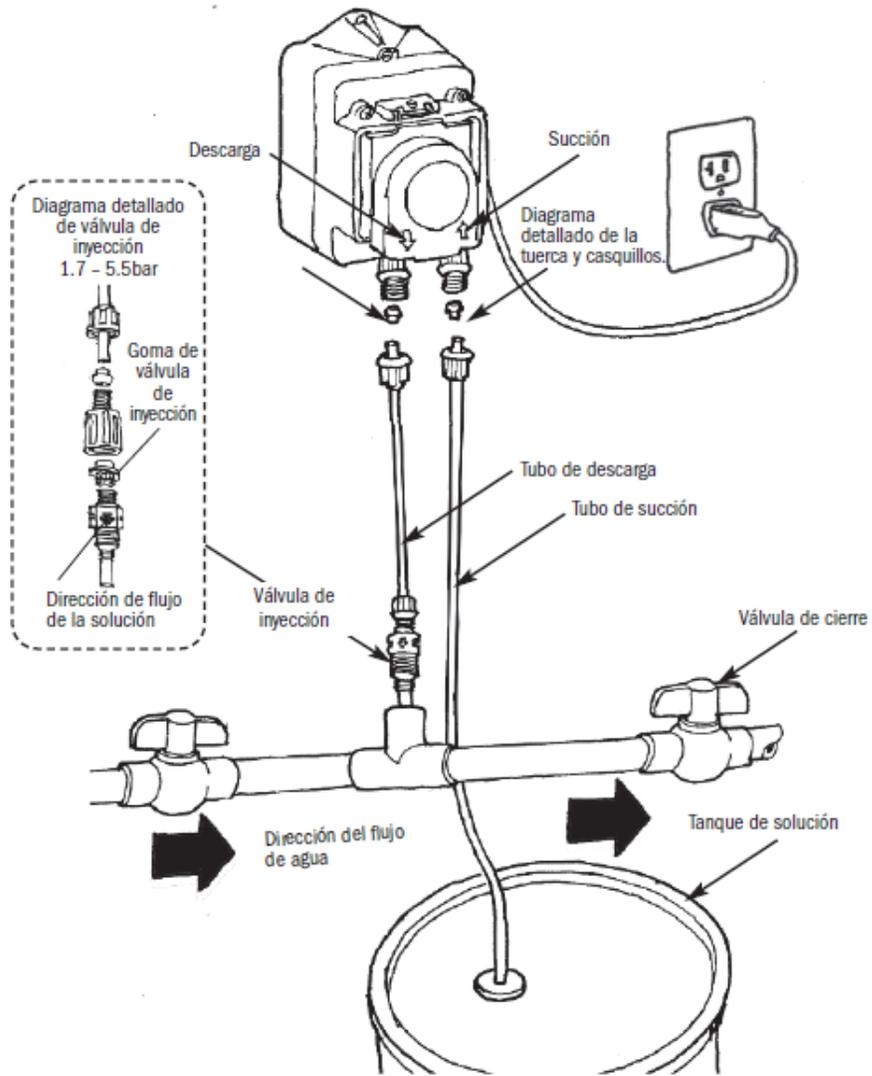
Al girar el potenciómetro contra las agujas del reloj en su totalidad, se apaga el dosificador.

Al girar el potenciómetro en sentido de las agujas del reloj, aumenta gradualmente la velocidad del motor, hasta llegar al 100%. Las graduaciones son aproximadas.

El caudal en dosificadores de caudal variable, puede ser ajustado mediante el potenciómetro.

Tomado de: (Stenner Pump Company)

Figura 151 Esquema de la bomba dosificadora



Tomado de: (Stenner Pump Company)

Figura 152 Guía para conocer la compatibilidad de los materiales de la bomba dosificadora

# CHEMICAL RESISTANCE GUIDE



**Ratings Key – Chemical Effect**

- A Fluid has minor or no effects
- B Fluid has minor to moderate effects
- C Fluid has severe effects
- \* No data available

**CAUTION** The information is provided ONLY as a guide to assist in determining chemical compatibility for wetted components. Testing under the specific conditions of the application is recommended. Stenner Pump Company assumes no responsibility for its accuracy. Outside factors including but not limited to temperature, pressure, mechanical stress, and solution concentration can affect material compatibility in a particular application. Stenner makes no warranty, expressed or implied, as to the accuracy of this guide or any materials' suitability for fitness or purpose for any application. User assumes all risk and liability for use of this guide.

Chemical / Solution	PP/ Santoprene®	Versilon®	PVC	LDPE	FKM	Silicone
Hydrogen Peroxide < 50%	A	B	A	B	A	A
Hydrogen Sulfide	A	A	B	A	C	•
Iodine	A	A	C	B	A	C
Lactic Acid	A	B	B	A	A	A
Lead Acetate	B	A	A	A	C	C
Linseed Oil	B	A	A	A	A	A
Limonene	C	B	B	B	•	•
Lubricating Oils	C	A	B	C	A	•
Magnesium Chloride	A	A	B	A	A	A
Magnesium Hydroxide	A	A	A	A	A	•
Magnesium Sulfate	A	A	A	A	A	A
Malic Acid	A	B	A	A	A	B
Manganese Salts	A	A	A	A	•	B
Mercuric Chloride	A	A	A	A	A	•
Methylene Chloride	C	C	C	C	B	•
Mineral Oil	B	A	B	B	A	•
Mineral Spirits	C	A	B	B	A	•
Muriatic Acid, 20° Baume	A	C	A	A	A	•
Nitric Acid < 10%	A	C	A	B	A	B
Nitric Acid 10-30%	B	C	A	C	A	C

Chemical / Solution	PP/ Santoprene®	Versilon®	PVC	LDPE	FKM	Silicone
Sea Water	A	A	A	A	A	•
Silicone Oil	C	A	A	B	A	C
Silver Nitrate	A	A	A	A	A	A
Soap Solutions	A	A	A	C	A	A
Sodium	A	A	A	A	•	•
Sodium Bisulfate	A	A	A	A	A	•
Sodium Bisulfite	A	A	A	A	A	A
Sodium Borate	A	A	A	A	A	A
Sodium Carbonate	A	A	A	A	A	A
Sodium Chlorate	A	A	A	A	A	C
Sodium Chloride	A	A	A	A	A	A
Sodium Dichromate 20%	A	•	B	•	A	•
Sodium Hydroxide < 20%	A	B	A	B	C	A
Sodium Hydroxide 20-46.5%	A	C	A	B	C	•
Sodium Hypochlorite 5%	A*	B	A	A	A	B
Sodium Hypochlorite 6-15%	A*	B	A	A	•	B
Sodium Nitrate	A	A	A	A	A	C
Sodium Silicate	A	A	A	A	A	A
Sodium Sulfide	A	A	A	A	A	A
Sodium Sulfite	A	A	A	A	A	A

Tomado de: (Stenner Pump Company)

8. Guía para conocer la resistencia química del HDPE frente a otras sustancias

HDPE Chemical Resistance Guide					
Reagent	70° F (21° C)	140° F (60° C)	Reagent	70° F (21° C)	140° F (60° C)
Pine oil	O	U	Sodium benzoate (35%)	S	S
Plating solutions			Sodium bicarbonate saturated	S	S
Brass	S	S	Sodium bisulfate saturated	S	S
Cadmium	S	S	Sodium bisulfite saturated	S	S
Chromium	S	S	Sodium borate	S	S
Copper	S	S	Sodium carbonate concentrated	S	S
Gold	S	S	Sodium chlorate saturated	S	S
Indium	S	S	Sodium chloride saturated	S	S
Lead	S	S	Sodium cyanide	S	S
Nickel	S	S	Sodium dichromate saturated	S	S
Rhodium	S	S	Sodium ferricyanide	S	S
Silver	S	S	Sodium ferricyanide concentrated	S	S
Tin	S	S	Sodium fluoride saturated	S	S
Zinc	S	S	Sodium hydroxide concentrated	S	S
Potassium bicarbonate saturated	S	S	Sodium hypochlorite	S	S
Potassium borate (1%)	S	S	Sodium nitrate	S	S
Potassium bromate (10%)	S	S	Sodium nitrite	S	S
Potassium bromide saturated	S	S	Sodium perborate	S	S
Potassium carbonate	S	S	Sodium phosphate	S	S
Potassium chlorate saturated	S	S	Sodium sulfide (25% to saturated)	S	S
Potassium chloride saturated	S	S	Sodium sulfite saturated	S	S
Potassium chromate (40%)	S	S	Sodium thiosulphate	S	S
Potassium cyanide saturated	S	S	Soybean oil	S	S
Potassium dichromate (40%)	S	S	Stannic chloride saturated	S	S
Potassium ferri / ferro cyanide	S	S	Stannous chloride saturated	S	S
Potassium nitrate saturated	S	S	Starch solution saturated	S	S
Potassium perborate saturated	S	S	Stearic acid (100%)	S	S
Potassium perchlorate (10%)	S	S	Styrene	U	U
Potassium permanganate (20%)	S	S	Sulfuric acid (0-50%)	S	S
Potassium persulfate saturated	S	S	Sulfuric acid (70%)	S	O
Potassium sulfate concentrated	S	S	Sulfuric acid (80%)	S	U
Potassium sulfide concentrated	S	S	Sulfuric acid (96%)	O	U
Potassium sulfite concentrated	S	S	Sulfuric acid (98% concentrated)	O	U
Propane gas	S	S	Sulfuric acid (fuming)	U	U
Propargyl alcohol	S	S	Sulfurous acid	S	S
Propyl alcohol	S	S	<b>T</b>		
Propylene glycol	S	S	Tannic acid (10%)	S	S
Pyridine	S	O	Tartaric acid	S	S
<b>R</b>			Tea	S	S
Rayon coagulating bath	S	S	Tetrahydrofuran	O	O
Resorcinol	S	S	Toluene	U	U
<b>S</b>			Tomato juice	S	S
Salicylic acid	S	S	Transformer oil	S	O
Seawater	S	S	Trichloroethylene	U	U
Shortening	S	S	Trisodium phosphate saturated	S	S
Silicic acid	S	S	Turpentine	O	U
Silver nitrate solution	S	S	<b>U</b>		
Soap solution concentrated	S	S	Urea	S	S
Sodium acetate saturated	S	S	Urine	S	S

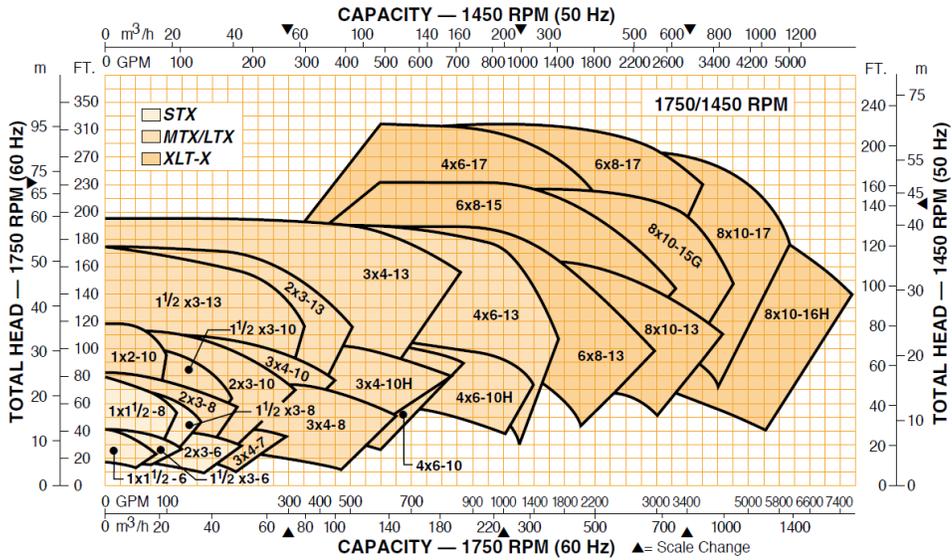
Legend: S = Satisfactory O = Some attack U = Unsatisfactory  
4 of 5

**INEOS**  
Olefins & Polymers USA

Tomado de: (INEOS Olefins & Polymers USA, 2012)

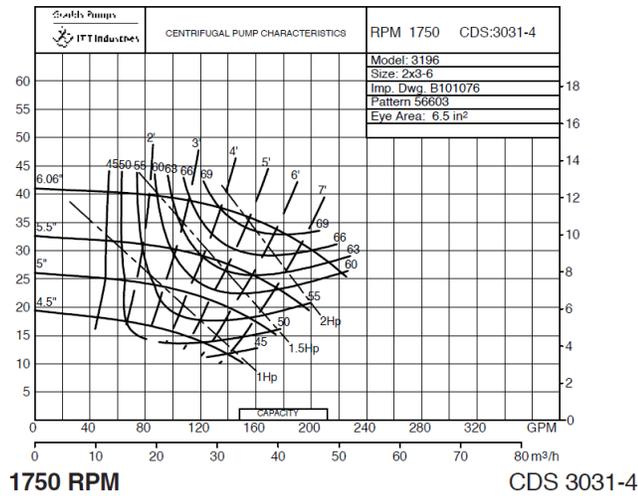
## 9. Familia de bombas y curva característica utilizada

Figura 151. Diagrama de familia de bombas utilizado para seleccionar la bomba centrífuga



Tomado de: (Goulds Pumps)

Figura 152. Curva característica de la bomba centrífuga seleccionada



Tomado de: (Goulds Pumps)

## 10. Procedimientos mencionados en la metodología

### a. Procedimiento para medir la concentración de cloro libre en muestras de agua

#### CHLORINE, FREE, Ultra-high Range (0.0–10.0 mg/L Cl<sub>2</sub>) Method 10069

##### DPD Method

USEPA accepted for reporting drinking water analyses  
For testing higher levels of free chlorine (hypochlorous acid  
and hypochlorite) in drinking water, cooling water,  
and industrial process waters

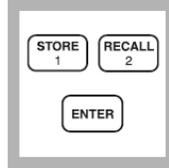
*Note: This product has not been evaluated to test for chlorine and chloramines in medical applications in the United States.*



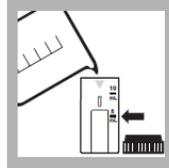
1. Enter the user program number for Chlorine, UHR.

Press: **PRGM**  
The display will show:  
**PRGM?**

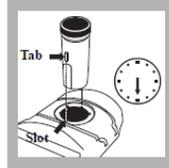
*Note: If the chlorine is typically less than 2.0 mg/L, use method 8021, program number 9.*



2. Press:  
**12 ENTER**  
The display will show  
**mg/L Cl<sub>2</sub>**  
then: **ZERO**

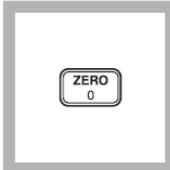


3. Fill the 10-mL/1-cm cell to the 5-mL line with sample.

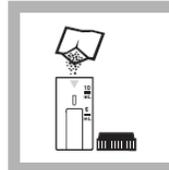


4. Place the cell into the instrument. Cover the sample cell tightly with the instrument cap.

*Note: Place the cell into the cell holder as illustrated. The sample cell tab should be at the 6 o'clock position and completely seated in the cell holder slot.*



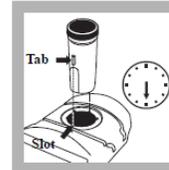
5. Press: **ZERO**  
The cursor will move to the right, then the display will show:  
**0.0 mg/L Cl<sub>2</sub>**



6. Remove the sample cell from the cell holder and add the contents of one 25-mL DPD Free Chlorine Reagent pillow to the sample. Cap and shake the sample cell about 20 seconds to dissolve.

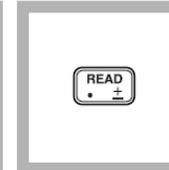
Proceed **immediately** to step 7.

*Note: A pink color will develop if chlorine is present.*



7. Place the sample cell into the instrument. Cover the sample cell tightly with the instrument cap.

*Note: Place the sample cell into the cell holder as illustrated. The sample cell tab should be at the 6 o'clock position and completely seated in the cell holder slot.*



8. Within one minute after reagent addition, press: **READ**.

The cursor will move to the right. The result in mg/L chlorine (as Cl<sub>2</sub>) will be displayed.

*Note: See "Interferences" on page 120 for samples with high monochloramine concentrations.*

Tomado de: (HACH, 2013)

b. Recuento de coliformes fecales Placas Petrifilm™ 3M™

**Almacenamiento**



**1** Almacene los paquetes cerrados a una temperatura  $\pm 8^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 46^{\circ}\text{F}$ ). Las placas deben usarse antes de su fecha de caducidad. En áreas de alta humedad, donde la condensación puede ser un inconveniente, es recomendable que los paquetes se atemperen al ambiente del lugar de trabajo antes de abrirlos. Las Placas Petrifilm tienen un tiempo de vida útil de 18 meses desde su fecha de elaboración. Observe la fecha de caducidad en la parte superior de la placa.



**2** Para cerrar un paquete abierto, doble el extremo y sellelo con cinta adhesiva para evitar el ingreso de humedad y, por lo tanto, la alteración de las placas.



**3** Mantenga los paquetes cerrados (según se indica en el punto 2) a temperatura  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 77^{\circ}\text{F}$ ) y una humedad relativa  $\pm 50\%$ . **No refrigere** los paquetes que ya hayan sido abiertos. Utilice las Placas Petrifilm máximo un mes después de abierto el paquete.

**Preparación de la muestra**



**4** Prepare una dilución de una muestra de alimento.\* Pese o pipete la muestra en un recipiente adecuado, como una bolsa Stomacher, una botella de dilución o cualquier otro contenedor estéril apropiado. \*Vea las indicaciones para Productos Lácteos y Jugos.



**5** Adicione la cantidad apropiada de uno de los siguientes diluyentes estériles: tampón Butterfield (tampón IDF fosfato, 0.0425 g/L de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  y con pH ajustado a 7.2); agua de peptonas al 0.1%; diluyente de sal peptonada (método ISO 6887); buffer de agua peptonada (método ISO 6579); solución salina (0.85 a 0.90%); caldo letheen libre de bisulfito o agua destilada.

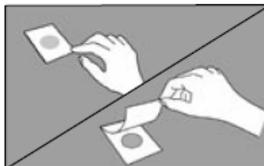


**6** Mezcle u homogenice la muestra mediante los métodos usuales.

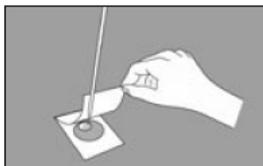
Ajuste el pH de la muestra diluida entre 6.6 y 7.2:  
 • Para productos ácidos: use solución 1N de NaOH.  
 • Para productos básicos: use solución 1N de HCl.

No utilice buffers que contengan citrato, bisulfito o tiosulfato de sodio, porque pueden inhibir el crecimiento.

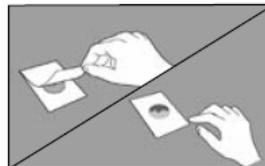
**Inoculación**



**7** Coloque la Placa Petrifilm en una superficie plana y nivelada. Levante la película superior.

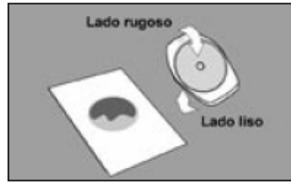


**8** Con la Pipeta Electrónica 3M™, o una pipeta equivalente **perpendicular** a la Placa Petrifilm, coloque 1 mL de la muestra en el centro de la película inferior.

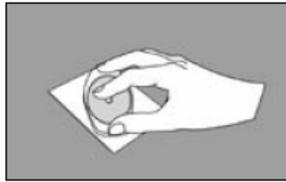


**9** Baje con cuidado la película superior para evitar que atrape burbujas de aire. **No** la deje caer.

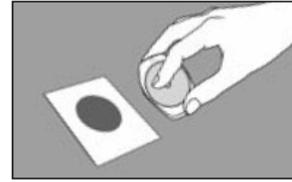
Tomado de: (3M, 2006)



10 Con el lado **liso** hacia abajo, coloque el dispensador en la película superior sobre el inóculo.

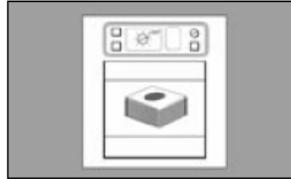


11 Presione **suavemente** el dispensador para distribuir el inóculo sobre el área circular. No gire. Ni deslice el dispensador.



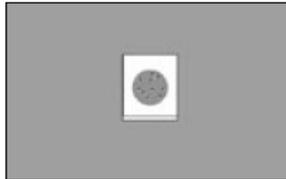
12 Levante el dispensador. Espere, por lo menos un minuto, a que solidifique el gel.

### Incubación



13 Incube las placas cara arriba en grupos de no más de 20 piezas. Puede ser necesario humectar el ambiente de la incubadora con un pequeño recipiente con agua estéril, para minimizar la pérdida de humedad.

### Interpretación



14 Las Placas Petrifilm pueden ser contadas en un contador de colonias estándar u otro tipo de lupa con luz. Consulte la Guía de Interpretación para leer los resultados.



15 Las colonias pueden ser aisladas para su posterior identificación. Levante la película superior y tome la colonia del gel.

El tiempo de incubación y la temperatura varían según el método.  
Los métodos aprobados más conocidos son:

• **AOAC método oficial 991.14**

Para coliformes:  
Incubar 24 h  $\pm$  2 h a 35 °C  $\pm$  1 °C.  
Para *E. coli*:  
Incubar 48 h  $\pm$  2 h a 35 °C  $\pm$  1 °C.

• **AOAC método oficial 998.08**

Para *E. coli* (carnes, aves, marinos):  
Incubar 24 h  $\pm$  2 h a 35 °C  $\pm$  1 °C.

• **Método NMKL (147.1993)**

Para coliformes:  
Incubar 24 h  $\pm$  2 h a 37 °C  $\pm$  1 °C.  
Para *E. coli*:  
Incubar 48 h  $\pm$  2 h a 37 °C  $\pm$  1 °C.

### Comentarios adicionales

- Nota: Recuerde inocular y poner el aplicador antes de pasar a la siguiente placa.
- Para contactar localmente a 3M Microbiología en Latinoamérica, visítenos en nuestra página de internet: [www.3M.com/microbiology](http://www.3M.com/microbiology)
- Para servicio técnico en Latinoamérica, contacte la dirección [serviciotecnomicro@mmm.com](mailto:serviciotecnomicro@mmm.com) o llame al 5255-5270-2223.

Tomado de: (3M, 2006)

## E. Módulo 5: Diseño del sistema de manejo y tratamiento de biogás y lodos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia de aguas residuales

### 1. Datos originales

Tabla 221. Flujo real y composición teórica de biogás, utilizada para el dimensionamiento de equipos y sistemas auxiliares en su manejo.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de biogás	463.84	m <sup>3</sup> /día
Composición de metano	65.00	% (v/v)
Composición de dióxido de carbono	34.99	% (v/v)
Composición de sulfuro de hidrógeno	0.01	% (v/v)

Tabla 222. Propiedades teóricas de los gases presentes en el biogás.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Metano</b>		
Densidad a 35 °C	0.635	kg/m <sup>3</sup>
Masa molar	16.04	g/mol
Capacidad calorífica	50.10	kJ/g
<b>Dióxido de carbono</b>		
Densidad a 0 °C	1.97	kg/m <sup>3</sup>
Masa molar	44.01	g/mol
<b>Sulfuro de hidrógeno</b>		
Densidad a 30 °C	1.36	kg/m <sup>3</sup>
Masa molar	34.10	g/mol

Figura 153. Especificaciones de microturbina encontrada para analizar posibilidad de generar energía eléctrica a partir del biogás producido en el tratamiento secundario de aguas residuales.

**CR30 MicroTurbine  
Renewable Fuels**



Achieve ultra-low emissions and reliable electrical generation from waste gas.

- Years of renewable experience
- Ultra-low emissions
- Operates on landfill or digester gas
- One moving part – minimal maintenance and downtime
- Patented air bearing – no lubricating oil or coolant
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities
- Integrated utility synchronization and protection<sup>(1)</sup>
- Small, modular design allows for easy, low-cost installation
- Reliable – tens of millions of run hours and counting



**CR30 MicroTurbine**

**Electrical Performance<sup>(2)</sup>**

Electrical Power Output	30kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz
Maximum Output Current	36A, grid connect operation
Electrical Efficiency LHV	26%

**Fuel/Engine Characteristics<sup>(2)</sup>**

Digester / Landfill Gas HHV	13.0–32.6 MJ/m <sup>3</sup> (350–875 BTU/scf)
H <sub>2</sub> S Content	< 70,000 ppmv
Inlet Pressure – HHV dependent	414–483 kPa gauge (60–70 psig)
Fuel Flow HHV	457 MJ/hr (433,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	13.8 MJ/kWh (13,100 BTU/kWh)

Figura 154. Propiedades fisicoquímicas del GLP.

	<b>Propano Comercial</b>	<b>Butano Comercial</b>
Presión de vapor en kPa ( presión absoluta) a:		
20°C	1.000	220
40°C	1.570	360
45°C	1.760	385
55°C	2.170	580
Peso específico	0,504	0,582
Punto de ebullición inicial a 1,00 atm de presión, °C	- 42	- 9
Peso por metro cúbico de líquido a 15,56°C, kg	504	582
Calor específico del líquido, kilojoules por kilogramo, a 15,56°C	1,464	1,276
Metros cúbicos de vapor por litro de líquido a 15,56°C	0,271	0,235
Metros cúbicos de vapor por kilogramo de líquido a 15,56°C	0,539	0,410
Peso específico del vapor (aire = 1) a 15,56°C	1,50	2,01
Temperatura de ignición en aire, °C	493-549	482-538
Temperatura máxima de llama en aire, °C	1.980	2.008
Límites de inflamabilidad en aire, % de vapor en la mezcla aire-gas:		
Inferior	2,15	1,55
Superior	9,60	8,60
Calor latente de vaporización en el punto de ebullición:		
Kilojoules por kilogramo	428	388
Kilojoules por litro	216	226
Cantidad de calor total luego de la vaporización:		
Kilojoules por metro cúbico	92.430	121.280
Kilojoules por kilogramo	49.920	49.140
Kilojoules por litro	25.140	28.100

(NFPA, 2004)

Tabla 223. Especificaciones de los lodos, utilizadas para propuesta de su tratamiento y manejo.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Lodos de tratamiento primario</b>		
Flujo	7.50	m <sup>3</sup> /día
Densidad	1020	kg/m <sup>3</sup>
Composición de sólidos secos totales	6.00	% (m/m)
Densidad de sólidos secos totales	1400	kg/m <sup>3</sup>
<b>Lodos de tratamiento secundario</b>		
Flujo	2.59	m <sup>3</sup> /día
Densidad	1025	kg/m <sup>3</sup>
Composición de sólidos secos totales	4.00	% (m/m)
Densidad de sólidos secos totales	1450	kg/m <sup>3</sup>
<b>Lodos de tratamiento terciario</b>		
Flujo	905.26	m <sup>3</sup> /día
Densidad	1002	kg/m <sup>3</sup>
Composición de sólidos secos totales	1.00	% (m/m)
Densidad de sólidos secos totales	1250	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 224. Datos utilizados para determinar el flujo de evaporación de agua en los patios de secado.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Radiación solar en Guatemala	5.50	kWh/m <sup>2</sup> /día
Tiempo diario de exposición al sol	12	horas
Entalpía de vaporización del agua a las condiciones ambientales de la ubicación del ingenio	2257.02	kJ/kg

(INCYT, 2016) (Meteocast, 2018)

Tabla 225. Coeficientes de pérdidas por fricción para distintos accesorios.

Tipo de conexión o válvula	Pérdida adicional por fricción, número equivalente de cabezas de velocidad, K
Codo 45°, estándar	0.35
Codo 45°, radio largo	0.2
Codo 90°, estándar	0.75
Radio largo	0.45
Cuadrado	1.3
Curva 180°, retorno cerrado	1.5
Tee, estándar, corrida a lo largo, rama tapada	0.4
Usada como codo, entrada corrida	1.0
Usada como codo, entrada en rama	1.0
Flujo de derivación	1
Acople	0.04
Unión	0.04
Válvula de compuerta, abierta	0.17
¾ abierta	0.9
½ abierta	4.5
¼ abierta	24.0
Válvula de diafragma, abierta	2.3
¾ abierta	2.6
½ abierta	4.3
¼ abierta	21.0
Válvula de globo	
Asiento biselado, abierta	6.0
½ abierta	9.5
Asiento de composición, abierta	6.0
½ abierta	8.5
Disco tapón, abierta	9.0
¾ abierta	13.0
½ abierta	36.0
¼ abierta	112.0
Válvula de ángulo, abierta	2.0
Y o válvula de escape, abierta	3.0
Válvula de tapón	
$\Theta = 5^\circ$	0.05
$\Theta = 10^\circ$	0.29
$\Theta = 20^\circ$	1.56
$\Theta = 40^\circ$	17.3
$\Theta = 60^\circ$	206.0
Válvula de mariposa	
$\Theta = 5^\circ$	0.24
$\Theta = 10^\circ$	0.52
$\Theta = 20^\circ$	1.54
$\Theta = 40^\circ$	10.8
$\Theta = 60^\circ$	118.0
Válvula de retención	2.0
Disco	10.0
Bola	70.0
Válvula antirretorno	15.0
Medidor de agua, disco	7.0
Pistón	15.0
Rotatorio	10.0
Rueda de turbina	6.0

(Perry; Green, 2008)

## 2. Cálculos de muestra

- a. Energía contenida en el flujo volumétrico diario de biogás obtenido en los filtros anaeróbicos de flujo ascendente.

$$\frac{463.84 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} * \frac{0.65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} * \frac{1000 \text{ L CH}_4}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} * \left( \frac{0.635 \text{ g CH}_4}{1 \text{ L CH}_4} * \frac{(273.15 + 35.00) \text{ K}}{(273.15 + 25.00) \text{ K}} \right) * \frac{50.10 \text{ kJ}}{1 \text{ g CH}_4} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 114.67 \text{ kW}$$

Se tomó al metano contenido en el flujo de biogás como el compuesto que posee energía calorífica aprovechable y a partir de sus propiedades, corregidas a la temperatura de operación de 25.00 °C, se determinó que la energía posible a utilizar es de 114.67 kW. El poder calorífico del metano se obtuvo de (Metcalf & Eddy Inc., 2003)

- b. Energía requerida por el ingenio para uso en la cocina industrial, según el consumo mensual de GLP, dato proporcionado por personal de la institución.

$$2400 \frac{\text{GLP}}{\text{mes}} * \frac{3.785 \text{ L}}{1 \text{ gal}} * \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ L}} * \frac{92430 \text{ kJ}}{1 \text{ m}^3 \text{ GLP}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0.32 \text{ kW}$$

Se tomó la capacidad calorífica del GLP según el Código del Gas Licuado de Petróleo, NFPA 58 – edición 2004.

- c. Flujo de biogás para suplir el requerimiento energético actual en cocina industrial

$$0.32 \text{ kW} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ g CH}_4}{50.100 \text{ kJ}} * \frac{1 \text{ kg CH}_4}{1000 \text{ g CH}_4} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{0.656 \text{ kg CH}_4} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{0.65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} = 1.31 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ biogás}$$

A partir de este dato se determinó que el flujo de biogás sobrante es de 462.53 m<sup>3</sup>/día.

- d. Requerimiento energético en cocina industrial, según datos teóricos de consumo de GLP por persona.

$$12.0 \frac{\text{kg GLP}}{\text{mes} * \text{hogar}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ hogar}}{3 \text{ personas}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ GLP}}{1.85 \text{ kg GLP}} * 1266 \text{ personas} * \frac{92430 \text{ kJ}}{1 \text{ m}^3 \text{ GLP}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 97.53 \text{ kW}$$

Los datos teóricos de consumo de GLP mensual por persona, según la cantidad promedio por hogar, se obtuvieron de (Kojima, 2011). La cantidad de personas (1266) en el ingenio, corresponde al período de zafra de 2017, dato proporcionado por personal de la institución.

- e. Flujo de biogás para suplir el requerimiento energético en cocina industrial calculado según datos teóricos de consumo de GLP por persona.

$$97.53 \text{ kW} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ g CH}_4}{50.100 \text{ kJ}} * \frac{1 \text{ kg CH}_4}{1000 \text{ g CH}_4} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{0.656 \text{ kg CH}_4} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{0.65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} = 394.52 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ biogás}$$

A partir de este dato se determinó que el flujo de biogás sobrante es 69.32 m<sup>3</sup>/día.

f. Cantidad de sulfuro de hidrógeno contenido en el biogás producido.

Base de cálculo: 1 día

$$463.84 \text{ m}^3 \text{ biogás} * \frac{0.0001 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{S}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} * \left( \frac{1.36 \text{ kg H}_2\text{S}}{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{S}} * \frac{(273.15 + 30.00) \text{ K}}{(273.15 + 25.00) \text{ K}} \right) = 0.0641 \text{ kg H}_2\text{S}$$

Se partió del flujo volumétrico de biogás producido y su composición de sulfuro de hidrógeno, así como de su densidad corregida a la temperatura de operación de 25.00 °C. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para los gases CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.

g. Concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás producido.

Base de cálculo: 1 día

$$0.0641 \text{ kg H}_2\text{S} * \frac{1.0 * 10^6 \text{ mg H}_2\text{S}}{1 \text{ kg H}_2\text{S}} * \frac{1}{\left( 463.84 \text{ m}^3 \text{ biogás} * \frac{1.060 \text{ kg biogás}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} \right)} = 130.44 \text{ ppm H}_2\text{S}$$

La cantidad másica total de biogás producido, utilizada en este cálculo, se determinó partiendo del flujo volumétrico del mismo y la densidad media ponderada de acuerdo a la fracción de los gases que lo componen.

h. Cantidad teórica de óxido férrico requerido para remover el sulfuro de hidrógeno del biogás, asumiendo una eficiencia de 100%.

Base de cálculo: 1 día

$$0.0641 \text{ kg H}_2\text{S} * \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{S}}{34.10 \text{ kg H}_2\text{S}} * \frac{1 \text{ kmol Fe}_2\text{O}_3}{3 \text{ kmol H}_2\text{S}} * \frac{159.69 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3}{1 \text{ kmol Fe}_2\text{O}_3} = 0.100 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3$$

Se realizó el mismo procedimiento de cálculo asumiendo un 90% de eficiencia, de acuerdo a las especificaciones de funcionamiento del filtro Puxin 250L descritas por proveedores comerciales.

i. Cantidad de sulfuro de hidrógeno que no se remueve en el con óxido férrico como medio filtrante, según la eficiencia de 90% correspondiente al filtro Puxin 250L.

Base de cálculo: 1 día

$$(0.100 - 0.0901) \text{ kg Fe}_2\text{O}_3 * \frac{1 \text{ kmol Fe}_2\text{O}_3}{159.69 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3} * \frac{3 \text{ kmol H}_2\text{S}}{1 \text{ kmol Fe}_2\text{O}_3} * \frac{34.10 \text{ kg H}_2\text{S}}{1 \text{ kmol H}_2\text{S}} = 6.41 * 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{S}$$

j. Concentración de sulfuro de hidrógeno en biogás, después de pasar por el filtro desulfurizador Puxin 250L.

Base de cálculo: 1 día

$$6.41 * 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{S} * \frac{1.0 * 10^6 \text{ mg H}_2\text{S}}{1 \text{ kg H}_2\text{S}} * \frac{1}{\left( 463.84 \text{ m}^3 \text{ biogás} * \frac{1.060 \text{ kg biogás}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} \right)} = 13.04 \text{ ppm H}_2\text{S}$$

La cantidad másica total de biogás producido, utilizada en este cálculo, se determinó partiendo del flujo volumétrico del mismo y la densidad media ponderada de acuerdo a la fracción de los gases que lo componen.

k. Diámetro interno teórico de tubería para transporte de biogás.

$$D_{int} = 2 * \sqrt{\frac{\left(\frac{463.84 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right)}{\pi * 3.00 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 0.048 \text{ m}$$

Se tomó una velocidad lineal teórica de flujo de 3.00 m/s. En base al resultado obtenido se eligió tubería comercial de PVC marca Durman con 0.050 m de diámetro nominal, 0.0525 m de diámetro interno, cédula 40, para los cálculos posteriores de caída de presión.

l. Número de Reynolds para el flujo de biogás a través de la tubería seleccionada.

$$N_{Re} = \frac{0.0525 \text{ m} * 3.00 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{1.060 \text{ kg biogás}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}}{\frac{0.0116 \text{ g}}{\text{m*s}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}} = 1.44 * 10^4$$

Se utilizó la densidad y viscosidad del biogás como el promedio ponderado de acuerdo a la fracción molar de los gases que lo componen.

m. Coeficiente de Fanning para el flujo de biogás a través de la tubería seleccionada.

$$f = 0.0014 + \frac{0.125}{14363.04^{0.32}} = 7.242 * 10^{-3}$$

Esta ecuación corresponde para el cálculo del Coeficiente de Fanning para el flujo de fluidos a través de tuberías lisas, dentro de las que se considera las de PVC.

n. Pérdidas de presión por fricción y efecto de accesorios en la conducción del biogás hacia la cocina industrial.

$$h_f = \left(4 * (7.242 * 10^{-3}) * \frac{228 \text{ m}}{0.0525 \text{ m}} + 20.73\right) * \frac{\left(3.00 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 658.19 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Se asume que no hay pérdidas por contracción o ensanchamiento brusco, ya que no hay cambio en el diámetro de tubería.

o. Caída de presión total en la conducción del biogás hacia la cocina industrial, previo a pasar por el regulador de presión.

$$\Delta P = \left(658.19 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} - 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1.5 \text{ m}\right) * 1.060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 682 \text{ Pa} = 0.682 \text{ kPa}$$

Se toma el nivel del suelo como punto de referencia de alturas, siendo este la salida del biogás de los filtros, que se conducirá hacia la cocina industrial, cuya entrada de tubería estará ubicada 1.5 m arriba.

p. Presión de llegada al regulador, previo a la entrada del biogás a los equipos de la cocina industrial.

$$P_b = (3.74 - 0.682 - (0.10 * 3.74)) \text{ kPa} = 2.68 \text{ kPa}$$

La presión manométrica del biogás a la salida de los filtros anaerobios de flujo ascendente se tomó según parámetros teóricos y se asumió una caída de presión de 10% correspondiente al filtro que provee el tratamiento químico para remoción de sulfuro de hidrógeno.

q. Flujo másico de sólidos secos totales contenidos en los lodos del tratamiento secundario.

$$\frac{2.59 \text{ m}^3 \text{ lodos}}{\text{día}} * \frac{1025 \text{ kg lodos}}{1 \text{ m}^3 \text{ lodos}} * \frac{0.04 \text{ kg sólidos secos}}{1 \text{ kg lodos}} = \frac{106.39 \text{ kg sólidos secos}}{\text{día}}$$

Se partió del flujo volumétrico de lodos producidos en los filtros, así como su densidad y composición másica teórica de sólidos secos totales. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el flujo másico de sólidos secos totales contenidos en los lodos de los tratamientos primario y terciario.

r. Área requerida por celda de secado para los lodos de los tratamientos primario y terciario.

$$\text{Área} = \frac{912.76 \text{ m}^3}{\text{celda}} * \frac{1 \text{ lecho lodos}}{1.00 \text{ m profundidad}} = 912.76 \frac{\text{m}^2}{\text{celda}}$$

El flujo de lodos a recibir en cada celda es proveniente del sedimentador primario y del clarificador terciario. Se asumió una profundidad de 1.00 m para el lecho de lodos y a partir del área requerida obtenida, se determinó un largo de celda de 90.00 m y un ancho de celda de 12.00 m. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el área requerida por los lodos del tratamiento secundario y establecer las dimensiones del patio respectivo.

s. Volumen real disponible por celda para lecho de lodos de los tratamientos primario y terciario.

$$V_{\text{real celda}} = 90.00 \text{ m} * 12.00 \text{ m} * 1.00 \text{ m} = 1080.00 \frac{\text{m}^3}{\text{celda}}$$

El exceso en el volumen provee de una altura de sobre diseño para soportar la precipitación pluvial. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el volumen real disponible por celda para los lodos del tratamiento secundario.

t. Altura de sobre diseño por celda en el patio de secado de los lodos del tratamiento primario y del terciario, para soportar la precipitación pluvial.

$$h_{sd \text{ celda}} = \frac{(1080.00 - 912.76) \text{ m}^3}{90.00 \text{ m} * 12.00 \text{ m}} = 0.15 \text{ m}$$

Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar la altura de sobre diseño en la celda del patio de secado de los lodos del tratamiento secundario.

u. Agua evaporada por celda en el patio de secado de lodos de los tratamientos primario y terciario, durante un ciclo de secado.

$$H_2O_{\text{evap}} = 5.50 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 * \text{día}} * \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}} * \frac{1 \text{ kg H}_2\text{O}}{2257.02 \text{ kJ}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}}{996.7 \text{ kg H}_2\text{O}} * \frac{1080.00 \text{ m}^3}{1 \text{ celda}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h de radiación}} * \frac{12 \text{ h de radiación}}{1 \text{ día de secado}} * \frac{20 \text{ días de secado}}{1 \text{ ciclo de secado}} = \frac{95.06 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O evaporada}}{\text{celda} * \text{ciclo de secado}}$$

Se partió del dato teórico de radiación y tiempo de exposición solar en Guatemala. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el agua evaporada por efecto de la radiación solar, en el patio de secado de lodos del tratamiento secundario.

- v. Agua lixiviada por celda en el patio de secado de lodos de los tratamientos primario y terciario, durante un ciclo de secado.

$$H_2O_{lix} = \frac{(7.37 + 898.01) m^3 H_2O}{celda * día} * 4.40\% * \frac{20 días}{1 ciclo de secado} = \frac{796.73 m^3 H_2O lixiviada}{celda * ciclo de secado}$$

A partir del flujo volumétrico de agua que contiene los lodos que entran al patio de secado, se estableció un 4.40% como lixiviados para obtener lodo con composición de sólidos secos totales dentro del rango teórico que va de 30% a 40% (m/m). Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el agua lixiviada en el patio de secado de lodos del tratamiento secundario.

- w. Lodo seco por celda en el patio de secado de lodos de los tratamientos primario y terciario, durante un ciclo de secado.

$$Lodo seco = \left( 912.76 m^3 lodo entrante - (95.06 m^3 H_2O evaporada + 796.73 m^3 H_2O lixiviada) \right) * \frac{1}{celda * ciclo de secado} = 20.97 \frac{m^3 lodo seco}{celda * ciclo de secado}$$

Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el volumen de lodo seco en el patio de secado de lodos del tratamiento secundario.

- x. Composición de sólidos secos contenidos en el lodo tratado en el patio de secado de lodos de los tratamientos primario y terciario.

$$\frac{(187.40 + 9067.52) kg sólido seco}{20.97 m^3 lodo seco} * \frac{1147.34 kg lodo seco}{1 m^3 lodo seco} * 100\% = \frac{38.46\% (m/m) sólido seco}{celda * ciclo de secado}$$

Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar la composición de sólidos secos en el lodo tratado en el patio de secado de lodos del tratamiento secundario.

- y. Cantidad de arena requerida como lecho para lixiviar el agua de los lodos primarios y terciarios en tratamiento.

$$m_{arena1,3} = \frac{90.00 m * 12.00 m * 0.25 m}{celda} * \frac{2000 kg arena}{1 m^3 arena} = \frac{540000 kg arena}{celda}$$

Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar la cantidad de grava requerida como lecho para lixiviar el agua de los lodos secundarios en tratamiento.

- z. Diámetro interno teórico de tubería para transporte de lodos del clarificador del tratamiento terciario hacia el patio de secado.

$$D_{int} = 2 * \sqrt{\frac{\left( \frac{905.26 m^3 lodos}{día} * \frac{1 día}{12 h} * \frac{1 h}{3600 s} \right)}{\pi * 1.30 \frac{m}{s}}} = 0.143 m$$

Se tomó un tiempo de 12 h y una velocidad lineal de 1.30 m/s para transportar los lodos. A partir del resultado obtenido se seleccionó tubería de PVC marca Durman, diámetro nominal 0.150 m y diámetro interno 0.1541 m, cédula 40. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el diámetro interno teórico de tubería para transportar lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

- aa. Número de Reynolds para el flujo de lodos del tratamiento terciario hacia el patio de secado, a través de la tubería seleccionada.

$$N_{Re} = \frac{0.1541 \text{ m} * 1.30 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1001.65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.0015 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 1.35 * 10^5$$

El valor de viscosidad 0.0015 kg/m\*s fue obtenido leyendo en la curva de la Figura 36 (pág.87), según una composición de sólidos secos totales de 1.00% de acuerdo al tipo de lodo. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el número de Reynolds para el flujo de lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

- bb. Número de Hedstrom para el flujo de lodos del tratamiento terciario hacia el patio de secado, a través de la tubería seleccionada.

$$N_{He} = \frac{(0.1541 \text{ m})^2 * 1001.65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.0479 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\left(0.0015 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}\right)^2} = 5.14 * 10^5$$

El valor del coeficiente de tensión 0.0479 N/m<sup>2</sup> fue obtenido leyendo en la curva de la Figura 36 (pág.87), según una composición de sólidos secos totales de 1.00% de acuerdo al tipo de lodo. A partir del N<sub>Re</sub> y el N<sub>He</sub> se determinó el coeficiente de Fanning, leyendo en la curva de la Figura 37 (pág.88), obteniendo un valor de 0.0040. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el número de Hedstrom y posteriormente el coeficiente de Fanning, para el flujo de lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

- cc. Coeficiente de pérdida de presión en la conducción de los lodos del tratamiento terciario hacia el patio de secado, debido a ensanchamiento brusco.

$$k_e = \left(1 - \frac{0.002 \text{ m}^2}{0.019 \text{ m}^2}\right)^2 = 0.794$$

En este caso se presenta un ensanchamiento al salir de la bomba. Se calculó de la misma forma los ensanchamientos bruscos en las conducciones de los lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

- dd. Coeficiente de pérdida de presión en la conducción de los lodos del tratamiento terciario hacia el patio de secado, debido a contracción brusca.

$$k_c = 0.4 * \left(1 - \frac{0.019 \text{ m}^2}{0.002 \text{ m}^2}\right) = 0.400$$

Aquí se presenta contracción en la succión de la bomba. Se calculó de la misma forma las contracciones bruscas en las conducciones de los lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

ee. Pérdidas de presión por fricción y efecto de accesorios en la conducción de los lodos del tratamiento terciario hacia el patio de secado.

$$h_f = \left( 4 * 0.0040 * \frac{158.70 \text{ m}}{0.1541 \text{ m}} + 0.794 + 0.756 + 28.95 \right) * \frac{\left( 1.30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 39.67 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Se tomó la mayor distancia lineal de tubería requerida para bombear lodos hacia la última celda del patio. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar las pérdidas de presión por fricción y efecto de accesorios en la conducción de lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

ff. Potencia del motor para funcionamiento de la bomba que transporta los lodos del tratamiento terciario hacia el patio de secado.

$$W_p = \frac{1}{0.50} * \left( \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.15 \text{ m} \right) + \left( 1 * \frac{\left( 1.30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} \right) + 39.67 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) = 83.97 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$W_p = 83.97 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} * \left( \frac{905.26 \text{ m}^3 \text{ lodos}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{12 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1001.65 \text{ kg lodos}}{1 \text{ m}^3 \text{ lodos}} \right) = 1762 \text{ W}$$

Se tomó un tiempo de bombeo de 12 h diarias y una eficiencia teórica de la bomba de 50.00%. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para determinar el trabajo a realizar por el motor para funcionamiento de las bombas que transportan lodos de los tratamientos primario y secundario hacia el patio de secado.

### 3. Datos calculados

Tabla 224. Parámetros referentes a la composición del biogás y sus flujos.

Parámetro	Unidades	Metano	Dióxido de Carbono	Sulfuro de Hidrógeno
Fracción volumétrica en biogás	% (v/v)	65.00	34.99	0.01
Densidad a 25°C	kg/m <sup>3</sup>	0.6559	1.8110	1.3828
Flujo volumétrico	m <sup>3</sup> /día	301.50	162.30	0.05
Flujo másico	kg/día	197.75	293.91	0.06
Fracción másica en biogás	% (m/m)	40.37	59.62	0.01
Viscosidad	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1.04*10 <sup>-5</sup>	1.39*10 <sup>-5</sup>	1.24*10 <sup>-5</sup>

\*Calculados con base en el flujo de biogás de 463.84 m<sup>3</sup>/día.

Tabla 225. Especificaciones de la conducción de biogás.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de biogás	0.005	m <sup>3</sup> /s
Velocidad lineal	3.00	m/s
Densidad de biogás	1.06	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad de biogás	1.16*10 <sup>-5</sup>	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Diámetro interno teórico de tubería	0.048	m
Diámetro interno real de tubería	0.0525	m
Número de Reynolds	1.44*10 <sup>4</sup>	---
Coefficiente de Fanning	7.24*10 <sup>-3</sup>	---

\*Calculados con base en el flujo de biogás de 463.84 m<sup>3</sup>/día.

Tabla 226. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de biogás hacia la cocina industrial.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Coefficiente total de pérdida por fricción debido a accesorios	20.73	---
Distancia lineal de tubería hacia cocina industrial	228	m
Pérdidas totales por fricción	658.19	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Caída de presión total	0.68	kPa

\*Calculados con base en el flujo de biogás de 463.84 m<sup>3</sup>/día.

\*Los accesorios seleccionados fueron: 10 codos a 90° cuadrados, 6 tee, 37 acoples, 5 válvulas de bola; con los coeficientes detallados en la Tabla 225 (pág. 479)

Tabla 227. Datos referentes al flujo de lodos y los sólidos secos totales que contiene, según cada tratamiento generador.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Lodos de tratamiento primario</b>		
Flujo volumétrico de lodos	7.50	m <sup>3</sup> /día
Flujo másico de lodos	3123.32	kg/día
Flujo volumétrico de sólidos secos totales	0.13	m <sup>3</sup> /día
Flujo másico de sólidos secos totales	187.40	kg/día
Flujo volumétrico de agua	7.37	m <sup>3</sup> /día
<b>Lodos de tratamiento secundario</b>		
Flujo volumétrico de lodos	2.59	m <sup>3</sup> /día
Flujo másico de lodos	2659.77	kg/día
Flujo volumétrico de sólidos secos totales	0.07	m <sup>3</sup> /día
Flujo másico de sólidos secos totales	106.39	kg/día
Flujo volumétrico de agua	2.52	m <sup>3</sup> /día
<b>Lodos de tratamiento terciario</b>		
Flujo volumétrico de lodos	905.26	m <sup>3</sup> /día
Flujo másico de lodos	906752.40	kg/día
Flujo volumétrico de sólidos secos totales	7.25	m <sup>3</sup> /día
Flujo másico de sólidos secos totales	9067.52	kg/día
Flujo volumétrico de agua	898.01	m <sup>3</sup> /día

Tabla 228. Cantidades de arena y grava para las camas en los patios de secado de lodos.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Patio mayor (lodos del tratamiento primario y del tratamiento terciario)</b>	<b>Patio menor (lodos del tratamiento secundario)</b>
Volumen de arena	m <sup>3</sup> /celda	270	22.50
Volumen de grava	m <sup>3</sup> /celda	270	22.50
Masa de arena	kg/celda	540000	45000
Masa de grava	kg/celda	475200	39600

Tabla 229. Especificaciones de la conducción de lodos del tratamiento primario hacia patio de secado mayor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de lodos	0.004	m <sup>3</sup> /s
Velocidad lineal	1.30	m/s
Densidad	1020	kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de rigidez	0.03	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Coefficiente de tensión	7.00	N/m <sup>2</sup>
Diámetro interno teórico de tubería	0.0640	m
Diámetro interno real de tubería	0.0779	m
Número de Reynolds	3.44*10 <sup>3</sup>	---
Número de Hedstrom	4.81*10 <sup>4</sup>	---
Coefficiente de Fanning	2.30*10 <sup>-2</sup>	---

\*Calculados con base en el flujo de lodos de 7.50 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 30 minutos.

Tabla 230. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de lodos del tratamiento primario hacia patio de secado mayor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Coefficiente total de pérdida por fricción debido a accesorios	33.54	---
Distancia lineal de tubería hacia patio de secado mayor	213	m
Pérdidas totales por fricción	144.46	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Potencia de bomba	0.62	kW

\*Calculados con base en el flujo de lodos de 7.50 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 30 minutos.

\*Los accesorios seleccionados fueron: 4 codos a 90° cuadrados, 3 tee, 11 cruces, 33 acoples, 12 válvulas de bola; con los coeficientes detallados en la Tabla 225 (pág. 479); contracción brusca a la salida del sedimentador primario, contracción brusca en la succión de la bomba (0.0508 m de diámetro) y expansión brusca en la descarga de la bomba.

Tabla 231. Especificaciones de la conducción de lodos del tratamiento secundario hacia patio de secado.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de lodos	0.014	m <sup>3</sup> /s
Velocidad lineal	1.30	m/s
Densidad	1025	kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de rigidez	0.015	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Coefficiente de tensión	6.00	N/m <sup>2</sup>
Diámetro interno teórico de tubería	0.1190	m
Diámetro interno real de tubería	0.1541	m
Número de Reynolds	1.37*10 <sup>4</sup>	---
Número de Hedstrom	6.49*10 <sup>5</sup>	---
Coefficiente de Fanning	9.00*10 <sup>-3</sup>	---

\*Calculados con base en el flujo de lodos de 77.85 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 1.5 horas.

Tabla 232. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de lodos del tratamiento secundario hacia patio de secado menor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Coefficiente total de pérdida por fricción debido a accesorios	12.21	---
Distancia lineal de tubería hacia patio de secado menor	111	m
Pérdidas totales por fricción	32.21	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Potencia de bomba	0.438	kW

\*Calculados con base en el flujo de lodos de 77.85 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 1.5 horas.

\*Los accesorios seleccionados fueron: 7 codos a 90° cuadrados, 1 tee, 14 acoples; con los coeficientes detallados en la Tabla 225 (pág. 479); contracción brusca a la salida del filtro digestor, contracción brusca en la succión de la bomba (0.0508 m de diámetro) y expansión brusca en la descarga de la bomba.

Tabla 233. Especificaciones de la conducción de lodos del tratamiento terciario hacia patio de secado.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de lodos	0.021	m <sup>3</sup> /s
Velocidad lineal	1.30	m/s
Densidad	1001.65	kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de rigidez	0.0015	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Coefficiente de tensión	0.0479	N/m <sup>2</sup>
Diámetro interno teórico de tubería	0.1430	m
Diámetro interno real de tubería	0.1541	m
Número de Reynolds	1.35*10 <sup>5</sup>	---
Número de Hedstrom	5.14*10 <sup>5</sup>	---
Coefficiente de Fanning	4.00*10 <sup>-3</sup>	---

\*Calculados con base en el flujo de lodos de 905.26 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 12 horas.

Tabla 234. Datos referentes a la pérdida de presión en la conducción de lodos del tratamiento terciario hacia patio de secado mayor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Coefficiente total de pérdida por fricción debido a accesorios	30.45	---
Distancia lineal de tubería hacia patio de secado mayor	159	m
Pérdidas totales por fricción	39.63	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Potencia de bomba	0.880	kW

\*Calculados con base en el flujo de lodos de 905.26 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 12 horas.

\*Los accesorios seleccionados fueron: 3 codos a 90° cuadrados, 11 cruces, 2 tee, 10 acoples; con los coeficientes detallados en la Tabla 225 (pág. 479); contracción brusca a la salida del clarificador, contracción brusca en la succión de la bomba (0.0508 m de diámetro) y expansión brusca en la descarga de la bomba.

Tabla 235. Especificaciones de la extracción de lixiviados del patio de secado mayor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de lixiviados	0.020	m <sup>3</sup> /s
Velocidad lineal	1.20	m/s
Densidad	996.70	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	0.001	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Diámetro interno teórico de tubería	0.1470	m
Diámetro interno real de tubería	0.1541	m
Número de Reynolds	1.84*10 <sup>5</sup>	---
Coefficiente de Fanning	3.98*10 <sup>-3</sup>	---

\*Calculados con base en el flujo de lixiviados de 876.40 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 12 horas.

Tabla 236. Datos referentes a la pérdida de presión en la extracción de lixiviados del patio mayor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Coefficiente total de pérdida por fricción debido a accesorios	0.546	---
Distancia lineal de tubería hacia patio de secado mayor	140	m
Pérdidas totales por fricción	10.81	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Potencia de bomba	0.63	kW

\*Calculados con base en el flujo de lixiviados de 876.40 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 12 horas.

\*Se tiene contracciones y expansiones bruscas en la succión y descarga de la bomba (diámetro 0.1016 m).

Tabla 237. Especificaciones de la extracción de lixiviados del patio de secado menor.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de lixiviados	0.012	m <sup>3</sup> /s
Velocidad lineal	1.20	m/s
Densidad	996.70	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	0.001	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Diámetro interno teórico de tubería	0.1140	m
Diámetro interno real de tubería	0.1541	m
Número de Reynolds	1.84*10 <sup>5</sup>	---
Coefficiente de Fanning	3.98*10 <sup>-3</sup>	---

\*Calculados con base en el flujo de lixiviados de 66.57 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 1.5 horas.

Tabla 238. Datos referentes a la pérdida de presión en la extracción de lixiviados del patio menor.

Parámetro	Valor	Unidades
Coefficiente total de pérdida por fricción debido a accesorios	0.546	---
Distancia lineal de tubería hacia patio de secado mayor	21	m
Pérdidas totales por fricción	1.96	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Potencia de bomba	0.27	kW

\*Calculados con base en el flujo de lixiviados de 66.57 m<sup>3</sup>/día bombeados durante 1.5 horas.

\*Se tiene contracciones y expansiones bruscas en la succión y descarga de la bomba (diámetro 0.1016 m).

## F. Módulo 7: Análisis económico

### 1. Cotizaciones materiales PTAR

Tabla 239. Cotización accesorios

Nombre	Descripción	Tamaño	Unidad	Precio	Proveedor
Abrazadera metálica	Abrazadera (2")	0.05	m	Q54.10	Amazon
Accesorio PVC	Acoples (2")	0.0508	m	Q2.78	Durman, COD 2005906
Accesorio PVC	Acoples (3")	0.0762	m	Q14.34	Durman, COD 2012277
Accesorio PVC	Acoples (6")	0.1524	m	Q101.13	Durman, COD 9004239
Accesorio PVC	Codo liso de 90 (15")	0.381	m	Q4,286.80	Amanco, COD 909813
Accesorio PVC	Codo liso de 90 (2")	0.0508	m	Q4.33	Durman, COD 2005880
Accesorio PVC	Codo liso de 90 (3")	0.0762	m	Q21.59	Durman, COD 2005884
Accesorio Hg	Codo liso de 90 (4")	0.1016	m	Q121.25	FFACSA
Accesorio PVC	Codo liso de 90 (4")	0.1016	m	Q26.52	Durman, COD 2005885
Accesorio PVC	Codo liso de 90 (6")	0.1524	m	Q126.01	Durman, COD 2005886
Accesorio PVC	Codo liso de 90 (8")	0.2032	m	Q661.20	Amanco, COD 909805
Accesorio PVC	Cruz (6")	0.1524	m	Q155.64	Durman, COD 9004240
Accesorio Hg	Tee lisa (4")	0.1016	m	Q210.90	FFACSA
Accesorio PVC	Tee lisa PVC (15")	0.381	m	Q1,476.95	Durman, COD 2014534
Accesorio PVC	Tee lisa PVC (2")	0.0508	m	Q6.01	Durman, COD 2005893
Accesorio PVC	Tee lisa PVC (3")	0.0762	m	Q24.67	Durman, COD 2005896
Accesorio PVC	Tee lisa PVC (4")	0.1016	m	Q40.98	Durman, COD 2005897
Accesorio PVC	Tee lisa PVC (6")	0.1524	m	Q253.81	Durman, COD 2005899
Accesorio PVC	Válvula de bola (2")	0.0508	m	Q43.18	Durman COD 9004127
Accesorio PVC	Válvula de bola (3")	0.0762	m	Q143.95	Durman COD 9013703
Accesorio PVC	Válvula de bola (4")	0.1016	m	Q316.71	Durman, COD 9021480
Accesorio PVC	Válvula de bola (4")	0.1016	m	Q316.71	Durman COD 9021480
Accesorio PVC	Válvula de bola (6")	0.1524	m	Q1,312.00	FFACSA

Tabla 240. Cotización reductores PVC

Nombre	Descripción	Precio	Proveedor
Accesorio PVC	Reductor (3" a 2")	Q14.52	Durman, COD 2005866
Accesorio PVC	Reductor (4" a 3")	Q23.12	Durman, COD 2005870
Accesorio PVC	Reductor de campana (6" a 3")	Q78.92	Durman, COD 9013112
Accesorio PVC	Reductor de campana (8" a 3")	Q277.47	Durman, COD 9004143
Accesorio PVC	Reductor de campana (8" a 4")	Q277.47	Durman, COD 9004349
Accesorio PVC	Reductor excentrico (6" a 4")	Q78.92	Durman, COD 2005874
Accesorio PVC	Reductor excentrico (8" a 4")	Q277.47	Durman, COD 9004349
Accesorio PVC	Reductor excentrico (8" a 6")	Q277.47	Durman, COD 9004350

Tabla 241. Cotización tubería<sup>125</sup>

Nombre	Tratamiento	Tamaño	Unidad	Precio	Proveedor
Tubería PVC (4")	Tratamiento cuaternario	0.10	m	Q94.78	Durman COD 2012813
Tubería PVC (2")	Tratamiento de lodos y biogás	0.05	m	Q65.43	Valtubgua COD V
Tubería PVC (3")	Tratamiento de lodos y biogás	0.08	m	Q37.39	Durman COD 2012704
Tubería PVC (3")	Tratamiento de lodos y biogás	0.15	m	Q197.41	Durman COD 2019945
Tubería PVC (15")	Tratamiento preliminar y primario	0.38	m	Q2,289.00	AMANCO COD 916246
Tubería PVC (15")	Tratamiento preliminar y primario	0.38	m	Q2,289.00	AMANCO COD 916246
Tubería PVC (1")	Tratamiento secundario	0.03	m	Q9.58	Durman, COD 2012771
Tubería hierro galvanizado (4")	Tratamiento terciario	0.10	m	Q986.62	Valtubgua COD 20PBM04020
Tubería PVC (6")	Tratamiento terciario	0.15	m	Q197.41	Durman COD 2019945
Tubería PVC (8")	Tratamiento terciario	0.20	m	Q342.76	Durman COD 2012814
Tubería PVC (4")	Tratamiento terciario	0.10	m	Q286.82	Valtubgua COD V

<sup>125</sup> Consultar más detalle de equipos en módulo del tratamiento primario y preliminar, secundario, terciario, cuaternario y tratamiento de lodos y biogás.

Tabla 242. Cotización accesorios varios PTAR<sup>126</sup>

Nombre	Descripción/ Tratamiento	Tamaño	Unidad	Precio
Piezómetro	Medidor de presión hidráulica	0.0254	N/A	Q766.26
Obra gris block	Metro cuadrado de obra gris	1	m2	Q300.00
Obra gris	Metro cubico de obra gris	0.0254	m3	Q940.89
Transporte de arena y grava	Precio de transporte de arena y grava			Q1,200.00
Agitador estático de PVC	Tratamiento cuaternario	0.1016	m	Q2,190.42
Hipoclorito de sodio (NaOCl)	Tratamiento cuaternario	1.016	gal	Q1,440.00
Kit para medir cloro residual	Tratamiento cuaternario	0.0254		Q1,764.00
Tanque de HDPE	Tratamiento cuaternario	5.28	litros	Q3,312.72
Arena	Tratamiento de lodos y biogás	0.0254	m3	Q110.00
Filtro desulfurador y deshidratador	Tratamiento de lodos y biogás	2.88036	kg	Q17,492.40
Geomembrana	Tratamiento de lodos y biogás	N/A		Q26,600.00
Grava	Tratamiento de lodos y biogás	0.0254	m3	Q210.00
Manómetros	Tratamiento de lodos y biogás	12.7	kPa	Q35.00
Quemador de biogás	Tratamiento de lodos y biogás	0.0254		Q7,740.00
Barras de acero al carbono (1/2")	Tratamiento preliminar y primario	0.0127	m	Q44.93
Agitador	Tratamiento terciario	0.1397	kW	Q43,080.84
Sopladores (15 psi)	Tratamiento terciario	2626.8934	Pa	Q139,320.00
Difusor de disco, cerámica (9")	Tratamiento terciario	0.2286	m	Q329.00
Bioenzymas	Tratamiento terciario	0.01143	kg	Q340.00
Timer para bombas (4")	Tratamiento terciario	0.1016	m	Q1,380.00
Varillas de acero carbón	Tratamiento preliminar y primario	0.002	m	Q9.87

<sup>126</sup> Consultar más detalle de equipos en módulo del tratamiento primario y preliminar, secundario, terciario, cuaternario y tratamiento de lodos y biogás.

Tabla 243. Cotización válvulas<sup>127</sup>

Nombre	Tratamiento	Tamaño	Unidad	Precio	Proveedor
Válvula cheque (6")	Tratamiento terciario	0.15	m	Q3,785.00	Valtubgua COD V
Válvula cheque (8")	Tratamiento terciario	0.20	m	Q7,240.00	Valtubgua
Válvula compuerta (6")	Tratamiento terciario	0.15	m	Q2,960.00	Valtubgua COD V
Válvula compuerta (8")	Tratamiento terciario	0.20	m	Q4,260.00	Valtubgua
Válvula compuerta (4")	Tratamiento terciario	0.10	m	Q1,945.00	Valtubgua COD V
Válvula compuerta (15")	Tratamiento terciario	0.38	m	Q17,435.20	Valtubgua

Tabla 244. Cotización bombas centrífugas<sup>128</sup>

Nombre	Tratamiento	Cantidad	Potencia	Unidad	Precio	Proveedor
Bomba centrífuga (1 hp)	Limpieza y mantenimiento	3	0.75	kW	Q3,395.00	Sta-Rite
Bomba centrífuga (1 hp)	Tratamiento de lodos y biogás	1	1.12	kW	Q4,985.00	Hidrosumer
Bomba centrífuga (1.5 hp)	Tratamiento secundario	1	1.12	kW	Q4,985.00	Hidrosumer
Bomba centrífuga (2 hp)	Tratamiento terciario	1	1.49	kW	Q5,210.00	Hidrosumer
Bomba centrífuga (5 hp)	Tratamiento terciario	1	3.73	kW	Q9,835.00	Hidrosumer
Bomba centrífuga (15 hp)	Tratamiento terciario	1	11.19	kW	Q32,020.38	Grainger

<sup>127</sup> Consultar más detalle de equipos en módulo del tratamiento primario y preliminar, secundario, terciario, cuaternario y tratamiento de lodos y biogás.

<sup>128</sup> Consultar más detalle de equipos en módulo del tratamiento primario y preliminar, secundario, terciario, cuaternario y tratamiento de lodos y biogás.

Tabla 245. Cotización bombas desplazamiento positivo<sup>129</sup>

Nombre	Tratamiento	Cantidad	Tamaño	Unidad	Precio	Proveedor
Bomba de desplazamiento positivo (1.3 hp)	Tratamiento de lodos y biogás	1	0.97	kW	Q108,360.00	Alibaba
Bomba de desplazamiento positivo (1.2 hp)	Tratamiento de lodos y biogás	1	0.89	kW	Q100,620.00	Alibaba
Bomba de desplazamiento positivo (2.5 hp)	Tratamiento de lodos y biogás	1	1.86	kW	Q116,100.00	Alibaba

Tabla 246. Cotización equipos varios<sup>130</sup>

Nombre	Tratamiento	Cantidad	Tamaño	Unidad	Precio	Proveedor
Agitador	Tratamiento Terciario	2	5.5	kW	Q43,080.84	Mix Direct
Bomba dosificadora de sólidos	Tratamiento Cuaternario	1	0.12	kW	Q2,950.00	EWS
Sopladores	Tratamiento Terciario	1	0.46	kW	Q139,320.00	Olmstead

<sup>129</sup> Consultar más detalle de equipos en módulo del tratamiento primario y preliminar, secundario, terciario, cuaternario y tratamiento de lodos y biogás.

<sup>130</sup> Consultar más detalle de equipos en módulo del tratamiento primario y preliminar, secundario, terciario, cuaternario y tratamiento de lodos y biogás.

## 2. Cotización válvulas

Figura 155. Cotización válvulas de compuerta y cheque

VALVULAS INDUSTRIALES DE GUATEMALA / VAINGUA					
11 Calle 19-15, Zona 15, Vista Hermosa III					
Tel-Fax-PBX: 2326-7900 e-mail: ventas@valtubgua.com corpovalgua@yahoo.es					
				COTIZACION No.:	34,005
				Fecha:	13 de Noviembre de 2018
# cliente:	972				
N.I.T.:	1751758-3				
Nombre:	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA				
Direccion:	11 CALLE 15-79 ZONA 15 VISTA HERMOSA III, CIUDAD DE GUATEMALA, C. A.				
Fax:	364-0503				
Atencion a:	SRITA. ALEJANDRA				
Referencia:	COMPRAS				
Sometemos a su consideracion nuestra cotizacion por lo siguiente:					
Codigo	Cantidad	Descripcion del articulo	Precio Uni.	Valor línea	
30IP-CRAF12080	1	VALV COMPUERTA H.F. 125SWP 200WOG FLG VF AS/RES B	4,260.00	4,260.00	
30IP-KHAF12080	1	VALV CHEQUE HOR H.F. 125SWP 200WOG FLG T-VIS B	7,240.30	7,240.30	
30IP-CF4F12140	1	VALV COMPUERTA H.F. 125SWP 200WOG FLG VF I.P.M. 14	17,435.20	17,435.20	

### 3. Cotización Bomba Centrífuga 1HP, Ingenio Santa Ana.

Figura 156. Cotización Ingenio Santa Ana, BOMBA 1HP

Corporativo:	120543	Cod.Anterior:	120543	Clasificación:	84 - 19 - 01 - 1943	Ubicación:	0-0-0
Descripción:	BOMBA CENTRIFUGA 1 FASE						
No. Parte:	PD2HE	Medida:	1 HP.				
Marca:	STA-RITE	Presentación:					

Apertura	Ultimo Ingreso	Ultima Salida			
Fecha:	13/12/2015	Fecha:	24/01/2017	Fecha:	01/02/2017
Precio:	2,836.43	Precio:	3,031.25	Cto/Promedio:	3,031.25000000
Cantidad:	3.00	Cantidad:	2.00	Cantidad:	1.00

Matriz Gasto:	227	Dias Sin Movimiento:	0	<b>ZAFRA</b>		
Cuenta Contable Activo:	101050101			Duracion en días:	0	
Indice Rotacion(Unidades):	0.000000			Punto Pedido:	0.00 * PEDIR *	
Indice Rotacion(Valor):	0.000000			Minimo:	0.00 * ACTIVAR *	
Existencia:	0.000	C/U	AI	11/10/2018	<b>REPARACION</b>	
Reservado:		Disponible:			Duracion en días:	0
Pdte.Dspacho:					Punto Pedido:	0.00 * PEDIR *
					Minimo:	0.00 * ACTIVAR *

#### 4. Cotización sopladores, Olmstead

Figura 157. Cotización soplador, Olmstead

 <p><b>OLZTAD, S.A.</b></p>	<p><b>OLZTAD, S.A.</b>          Olmstead Compresores          Calzada Aguilar Batres 43-27          zona 12, Guatemala          Tel: 2490 5959 / Fax: 24773120</p>	
<p><b>Para:</b> Compañía Agrícola Industrial Santa Ana, S.A.  <b>Atención:</b> Ing. Alejandra Valladares  <b>Teléfono:</b> (+502) 5865 2102  <b>Correo:</b> <a href="mailto:val15386@uvg.edu.gt">val15386@uvg.edu.gt</a></p>	<p><b>COTIZACIÓN NO. 32428</b>           Fecha: 18 / 10 / 2018</p>	

Cant.	Descripción	Precio Uni	Precio Total
2	<b>Paquete soplador trilobular con cabina modelo RB-IQ 35/2P-7.5hp. Incluye:</b> - Soplador trilobular RBS 35/2P. - Gabinete para reducción de ruido (73dBa). - Indicador de restricción de filtro. - Motor Inverter Duty. - Válvula de presión de alivio. - Válvula checke en la descarga. - Filtro de entrada con carcasa y silenciador ajustable. - Visor de nivel de aceite. - Indicador de presión diferencial. - Motor 460V/60Hz TEFC - Ventilador 115V/60Hz	\$ 18,000.00	\$ 36,000.00
<p><b>Estamos sujetos al régimen de retención definitiva.</b></p>			
<p><b>Total</b></p>			<p><b>\$ 36,000.00</b></p>

**Notas:**

- Precios incluyen IVA.
- Tiempo de entrega: 6-14 semanas. Sujetos a disponibilidad de fábrica al momento de colocar la orden.
- Incluye entrega en sus instalaciones y arranque del equipo.
- No incluye instalación eléctrica o de tubería de aire.

## 5. Cotización kit de cloro

Figura 158. Cotización kit de cloro

Encargado :  
 Extension :  
 No. del Telefax :  
 E-Mail :  
 Dpto. de Venta :  
 Cuenta No. : 40028954



Universidad del Valle  
 de Guatemala  
 Zona 15 Vista Hermosa III  
 15-79 11 calle  
 01011 Ciudad Guatemala

Página 1 / 1

### Oferta No.: 4011104929 del 16.10.2018 valida hasta 30.11.2018

Según nuestras condiciones generales de venta y suministro, les ofrecemos sin compromiso como sigue:

Su Solicitud del 16.10.2018

Pos.	Numero+Nombre del Artículo Numero Unidad	Precio por Unidad	Cantidad	Valor GTQ
<b><u>Fecha de envío aprox. 05.12.2018</u></b>				
1	1.14801.0001 Test Cloro 0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.6 - 0.8 - 1.0 - 1.5 - 2.0 mg/l Cl2 MQuant® Su artículo: ENTREGA A 45 DÍAS			
	1 X 400 TESTS	1,764.00 por	1 UN	1 UN 1,764.00
	Precio sin IVA	1,575.00 por	1 UN	1 UN 1,575.00
	Cond.de acumulación	1,764.00 por	1 UN	1 UN 1,764.00
	Valor total			1,764.00
	Precio Unitario			1,764.00
	TOTAL			1,764.00
	Precio sin IVA			1,575.00
	<b><u>Condiciones de entrega:</u></b>			
	CIP Porte pagado y seguro .			
	<b><u>Condiciones de pago:</u></b>			
	30 días fecha de factura			

## 6. Cotización bombas centrífugas

Figura 159. Cotización bombas centrífugas



**HIDROSUMER**  
 5ta. Calle 14-41, zona 1  
 Tel (s): 2253-83-44; 2253-9268; 5293-5042  
 NIT: 5051751-1

<b>FECHA:</b> Guatemala, 16 de octubre del 2018	<b>Proforma</b> <b>NO. 2208</b>
<b>CLIENTE:</b> Sr. Enrique Valladares	
<b>Atención</b>	
<b>OBRA:</b>	
<b>Correo:</b> <a href="mailto:val15386@urg.edu.gt">val15386@urg.edu.gt</a>	
<b>CANT.</b>	<b>IMPORTE</b>

Cordial saludo:

Detallamos presupuesto solicitado:

1	Bomba centrífuga americana marca Myers 1 HP 115/230 Volts. 1 F	Q	2,755.00
1	Bomba centrífuga americana marca Myers 1.5 HP 230 Volts. 3 F	Q	4,985.00
1	Bomba centrífuga americana marca Myers 2 HP 230 Volts. 3 F	Q	5,210.00
1	Bomba centrífuga americana marca Myers 3 HP 230 Volts. 3 F	Q	9,170.00
1	Bomba centrífuga americana marca Myers 5 HP 230 Volts. 3 F	Q	9,835.00

\*\* FORMA DE PAGO: PAGO CONTADO EFECTIVO ( AGRADECEREMOS REALIZAR DEPOSITO BANCARIO A NOMBRE DE HIDROSUMER)

\*\* ENTREGA DE MERCADERIA: INMEDIATA AL ESTAR CONFIRMADO PAGO CORRESPONDIENTE DE MERCADERIA.

\*\* PRESUPUESTO VALIDO MIENTRAS DUREN EXISTENCIAS.

\*\* PRECIOS APLICA UNICAMENTE PAGO EN EFECTIVO.

## 7. Cotización bomba dosificadora

Figura 160. Cotización EWS bomba dosificadora de sólidos

### DOSIFICADORA STENNER ECON VX

**Código:** BOM012

✓ Consulte por Disponibilidad

**Precio:** GTQ. 2,950.00  
\* IVA INCLUIDO

🔔 Recuerde que debe ingresar a su cuenta para poder agregar productos a su Cotización.

Dosificador ECON VX, sistema dosificador peristáltico con motor variable, no pierde ceba, repuestos baratos, capacidad de inyectar desde 2.7 GPD hasta 23 GPD con hasta 80 psi de contrapresión. Fácil de instalar  
El mejor precio del mercado con excelente calidad.  
VIDEO <https://youtu.be/dqKD3SQJxxw>



**🛒 Agregar a Mi Cotización**

## 8. Cotización concreto CEMEX, Ingenio Santa Ana

Figura 161. Cotización Concreto Cemex, Ingenio Santa Ana



COMPANIA AGRICOLA INDUSTRIAL SANTA ANA, S. A.  
12 Calle 1-25, Zona 10, Edificio Geminis 10,  
Torre Norte 15o. Nivel  
N.I.T 72959-0

TELEFONO: PBX 78793000  
FAX: 78793089  
FECHA IMPRESION: 08/10/2018 09:51:05  
PAGINA: 1 de 2  
FECHA ORDEN: 27 de Septiembre de 201

### ORDEN PARA CONTRATACION DE SERVICIOS PROFESIONALES I-15030

<b>SR. (ES)</b> CEMEX GUATEMALA, S. A. 3A AVENIDA 13-78 ZONA 10, TORRE CITIBANK 7 NIVEL OF. 701 CIUDAD, GUATEMALA TELEFONOS 22045601-24275612 CONTACTO: JESSICA CORDON CEL 4210-4008 / 2204-5600 Tel: 22045601 Fax: 2427-5615 E-MAIL: jessicamagali.cordon@cemex.com; omargiovanni.quinonez@cem	<b>COD. PROV.:</b> 85447 <b>N. I. T.:</b> 2960731-0
<b>LUGAR DE PRESTACION DEL SERVICIO:</b> ALMACEN CAISA-INGENIO KM 64.5 CARRETERA A SANTA ANA <b>PERIODO DE PRESTACION DEL SERVICIO:</b> 24/07/2018 AL 24/07/2018 <b>RESPONSABLE DE LA RECEPCION DEL SERVICIO:</b> MARCO ROMERO CORTEZ	<b>PRESUPUESTADO</b>

AGRADECEMOS SE SIRVA PROPORCIONAR CON CARGO A ESTA EMPRESA EL SERVICIO QUE SE DETALLA A CONTINUACION:

ITEM	CANT.	DATOS DEL SERVICIO	TOTAL
1)	45.00	<b>UNIDAD ADMINISTRATIVA:</b> SECCION 2 CENTRIFUGAS <b>SOLICITANTE:</b> MARCO ROMERO CORTEZ <b>MOTIVO DE LA CONTRATACION:</b> Analitico: 107005 USO: REPARACION 2018 0708-9023 OBSERVACIONES: CONTRATACION DE SERVICIO PARA EL SUMINISTRO DE CONCRETO REQ: I - 149238 <b>DETALLE DEL SERVICIO:</b> Cuenta Empresa99: (17180002) FUNDICION DE 45 DE CONCRETO DE 4,000 PSIG (280 KG/CM2) 4000PSI (280KG/CM2), TMA 1"(25MM), REV.5" (12CM), EDAD: 28 DIAS PRECIO Q 940.89 POR METRO CUBICO	Q. 37,803.56

## 9. Cotización gas propano, Ingenio Santa Ana

Figura 162. Cotización gas propano, Ingenio Santa Ana



SERVICIOS CANEROS, S. A.  
12 Calle 1-25, Zona 10, Edificio Geminis 10,  
Torre Norte 15o. Nivel  
N.I.T 486418-2

### ORDEN DE COMPRA S - 7865

TELEFONO: PBX 78793000  
FAX: 78793089  
FECHA IMPRESION: 11/10/2018 15:55:48  
PAGINA: 1 de 2  
FECHA ORDEN: 05 de Octubre de 2018 14:06:42

<b>SR. (ES)</b> TROPIGAS DE GUATEMALA, S.A. AV. PETAPA 21-03, ZONA 12 CIUDAD, GUATEMALA GUATEMALA CONTACTO: EDDY AMILCAR VELASQUEZ KEGEL CEL 31867177 Tel: 2419-7402 Fax: 2473-0386 FECHA DE ENTREGA: 30/03/2019 LUGAR DE ENTREGA: KM 64.5 CARRETERA A SANTA LUCIA COITZ INTERIOR FCA. CERRITOS	2294 283911-3	<b>CONDICIONES DE PAGO</b> CREDITO 30 DIAS Nuestros pagos se estar/En realizando electrónicamente, por medio de Banco Industrial, si aun no se ha registrado, le agradeceremos comunicarse al Departamento Financiero, PBX 2379 5100, Ext. 1620, con el Lic. Robert Marroquin.
		<b>PRESUPUESTADO</b>

AGRADECEMOS SE SIRVA PROPORCIONAR CON CARGO A ESTA EMPRESA LA MERCADERIA QUE SE DETALLA A CONTINUACION:

ART.	CANTIDAD	DESCRIPCION	P/UNITARIO	TOTAL
1)	12,600	DEPARTAMENTO DE SERVICIOS GENERALES SOLICITANTE: WILDER DUBON ARRIAGA Jefe: ESDRAS SOLORZANO GIRON USO: ZAFRA 2018 2019 COCINA INDUSTRIAL REQ: S - 27681 (50017) GLS GAS PROPANO COMPRA SEGUN DETALLE SEMANA FECHA CANTIDAD UNIDAD MEDIDA 1 02/11/2018 600 GALONES 2 08/11/2018 600 GALONES 3 15/11/2018 600 GALONES 4 22/11/2018 600 GALONES 5 29/11/2018 600 GALONES 6 06/12/2018 600 GALONES 7 13/12/2018 600 GALONES 8 20/12/2018 600 GALONES 9 27/12/2018 600 GALONES 10 03/01/2019 600 GALONES 11 10/01/2019 600 GALONES 12 17/01/2019 600 GALONES 13 24/01/2019 600 GALONES 14 31/01/2019 600 GALONES	Q. 12.053571	Q. 151,874.99

## 10. Cotización hipoclorito de sodio 10%

Figura 163. Cotización hipoclorito de sodio, Merck

Encargado : Helen Morales  
 Extension :  
 No. del Telefax :  
 E-Mail : HELEN.MORALES@MERCKGROUP.COM  
 Dpto. de Venta :  
 Cuenta No. : 40028954



Universidad del Valle  
 de Guatemala  
 Zona 15 Vista Hermosa III  
 15-79 11 calle  
 01011 Ciudad Guatemala

Página 1 / 2

### Oferta No.: 4011038313 del 20.03.2018 valida hasta 30.04.2018

Según nuestras condiciones generales de venta y suministro, les ofrecemos sin compromiso como sigue:

Su Solicitud del 20.03.2018

Pos.	Numero+Nombre del Artículo Numero Unidad	Precio por Unidad	Cantidad	Valor GTQ
<b>*** La fecha entrega sigue. ***</b>				
1	1.05614.9025 SODIO HIPOCLORITO EN SOLUCION (6-14 % DE CLORO ACTIVO) Su artículo: ENTREGA EN 45 DÍAS			
	1 X 25.000 L	2,925.44 por	1 UN	1 UN 2,925.44
	Precio sin IVA	2,612.00 por	1 UN	1 UN 2,612.00
	Cond.de acumulación	2,925.44 por	1 UN	1 UN 2,925.44
<b>*** La fecha entrega sigue. ***</b>				
2	8.41799.0100 CALCIO HIPOCLORITO PARA SINTESIS Su artículo: ENTREGA EN 45 DÍAS			
	1 X 100.000 G	431.20 por	1 UN	1 UN 431.20
	Precio sin IVA	385.00 por	1 UN	1 UN 385.00
	Cond.de acumulación	431.20 por	1 UN	1 UN 431.20
<b>Fecha de envío aprox. 21.03.2018</b>				
3	8.41799.0500 CALCIO HIPOCLORITO PARA SINTESIS Su artículo: ENTREGA EN 45 DÍAS			
	1 X 500.000 G	691.04 por	1 UN	1 UN 691.04
	Precio sin IVA	617.00 por	1 UN	1 UN 617.00
	Cond.de acumulación	691.04 por	1 UN	1 UN 691.04

## 11. Cotización bioenzimas

Figura 164. Cotización bioenzimas



No.	Cantidad de sobres a utilizar/día	Cantidad de Libras al mes	Precio por libra	Total a utilizar
1	1.5	1	Q 340.00	Q 340.00
2	Dependerá del uso y resultados que desean obtener en su investigación.	100	Q320.00	Q 32,000.00
3	Dependerá del uso y resultados que desean obtener en su investigación.	220	Q 320.00	Q 70,400.00

Fecha:

\_\_\_\_\_

Firma de aceptada:

**Forma de pago propuesto en ambas modalidades:**

- Al realizar pago o depósito a la cuenta de la empresa se procederá a programar envío.

**E. TIEMPO DE EJECUCION DE OBRA**

**\*\*Le recordamos que nuestro trabajo se encuentra garantizado, además de asegurarle que esta es la solución que usted necesita, con la cual estaríamos muy gustosos de ayudarle, dándole siempre a usted el mejor servicio.\*\***

## 12. Cotización difusores de aire, EWS.

Figura 165. Cotización difusores de aire

COMERRSA,S.A.  
 KM. 26.5 CARRETERA A EL SALVADOR CRUCE A SANTA ELENA BARILLAS  
 NIT: 191639-4  
 TEL: 66342727





**CLIENTE:** ALEJANDRA VALLADARES **PROFORMA No.:** **GT2018297**  
**CONTACTO:** DIFUSORES DE AIRE  
**referencia**  
**FECHA** 23 de agosto de 2018 **TELÉFONO**

Cant.	Descripción	Precio Unitario	Total
10	Difusor de burbuja fina de 9"	Q 329.00	Q 3,290.00
10	Jet Air Seal Difuser	Q 282.00	Q 2,820.00
			Q -
			Q -
			<b>Q 6,110.00</b>

Tiempo de entrega: Inmediato  
 Pago: 100% anticipado con acreditación a cuenta

## 13. Cotización agitador de palas, Mix Direct

Figura 166. Agitador, Mix Direct



**5 HP Top Entry Flange Mount Mixer 15:1 Gearbox 38" High Efficiency Impeller**

Lead Time: 3 weeks \$5,566

+  
-

Customize Item

Add To Cart

---

>
★ Add to Compare
|
Share

## 14. Cotización geomembranas

Figura 167. Cotización geomembranas



**Geosistemas R&M**  
 Avenida Petapa 50-60 Zona 12  
 Tels: 4234-6261 / 2479-3045  
[gabrielramirez.geo84@gmail.com](mailto:gabrielramirez.geo84@gmail.com)  
[www.geosistemasgt.com](http://www.geosistemasgt.com)



Nombre:	<b>Ramiro Wong</b>	Cotización: No.		18-347
Dirección:	Sin definir	NIT:		
Dirección de Entrega:	Proyecto	Tel:		2261-0908
Fecha: 18/10/18	Transporte: Cliente	X	Otro	Contacto:
<b>CANT.</b>	<b>DESCRIPCION</b>			<b>P.U</b>
	<b>BIODIGESTOR TIPO BOLSA</b>			<b>TOTAL</b>
<b>750</b>	<b>Mt2 suministro de Geomembrana HDPE 1.0 mm</b>		<b>Q24.50</b>	<b>Q18,375.00</b>
<b>750</b>	<b>Mt2 de instalación de Geomembrana</b>		<b>Q6.50</b>	<b>Q4,875.00</b>
	Soldadura de Extrusión y Termofusión			
<b>02</b>	<b>Acoples con rosca interna de 2"</b>		<b>Q250.00</b>	<b>Q500.00</b>
	<b>ULTIMA LINEA</b>			
	<b>ULTIMA LINEA</b>			
	<b>OBSERVACIONES:</b>			
	<b>IVA INCLUIDO</b>			
			<b>Sub total</b>	<b>Q23,750.00</b>
			<b>IVA</b>	<b>Q2,850.00</b>
Tiempo de Entrega Instalación:	2 Días hábiles		<b>Total</b>	<b>Q26,600.00</b>
Forma de pago:	70% PAGO ANTICIPADO Y 30% AL FINALIZAR			
Vigencia:	1 semana	Tiempo de entrega materiales:	Inmediata	
Autorizado por:	Gabriel Ramírez	Firma:	GR84	

(F) \_\_\_\_\_  
 Autorización Cliente

(F) Gabriel Ramírez  
 Geosistemas R&M

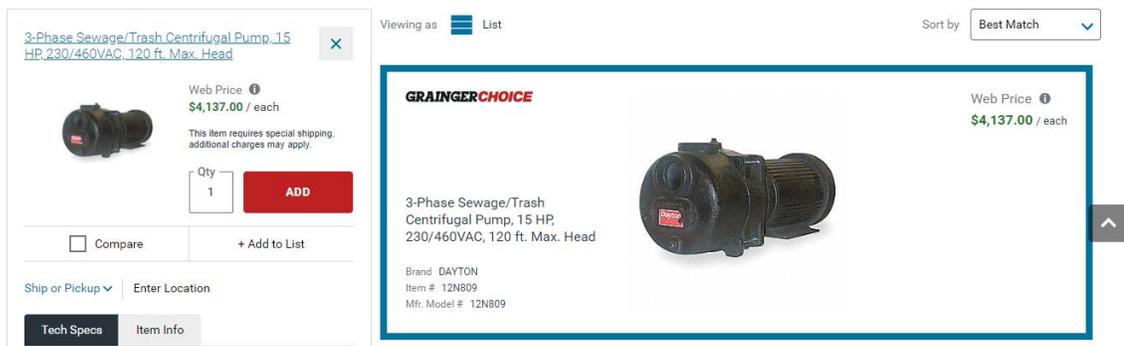
## 15. Bomba desplazamiento positivo, NETZSCH

Figura 168. Bomba desplazamiento positivo NETZSCH



## 16. Cotización bomba centrífuga (15 hp)

Figura 169. Bomba centrífuga 15hp<sup>131</sup>



<sup>131</sup> (Grainger, 2018)

## 17. Cálculos ahorro en gas propano por la utilización de biogás

### Biogás

Producción: 463.8 m<sup>3</sup> / día

Poder calorífico: 6 kWh / kg

Densidad biogás: 1.2 kg / m<sup>3</sup>

Ecuación 187. Poder calorífico por m<sup>3</sup>

$$6 \frac{kWh}{kg} * 1.2 \frac{kg}{m^3} = 7.20 \frac{kWh}{m^3}$$

Ecuación 188. Producción de energía al día con biogás

$$463.80 \frac{m^3}{día} * 7.2 \frac{kWh}{m^3} = 3,339.36 \frac{kWh}{día}$$

Ecuación 189. Producción de energía al mes

$$3,339.36 \frac{kWh}{día} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = \mathbf{100,180.8 \frac{kWh}{mes}}$$

### Gas propano

Consumo: 0.2985 m<sup>3</sup> / día, (2,400 gal)

Costo galón: Q12.05<sup>132</sup>

Costo litro: Q3.18

Poder calorífico: 12 kWh / kg

Densidad: 2.01 kg / m<sup>3</sup>

Ecuación 190. Poder calorífico por m<sup>3</sup> de gas propano

$$12 \frac{kWh}{kg} * 2.01 \frac{kg}{m^3} = 24.12 \frac{kWh}{m^3}$$

---

<sup>132</sup> Precio sin IVA.

Ecuación 191. Consumo de energía al día con gas propano

$$0.2985 \frac{m^3}{día} * 24.12 \frac{kWh}{m^3} = 7.20 \frac{kWh}{día}$$

Ecuación 192. Consumo de gas propano al mes

$$7.20 \frac{kWh}{día} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = 215.08 \frac{kWh}{mes}$$

Ecuación 193. Gasto mensual en gas propano

$$9085 \text{ litros (2,400 gal)} * Q 3.18 \text{ litro}^{133} = Q28,890.30 \frac{\text{litros}}{mes}$$

Ecuación 194. Gasto anual en gas propano

$$Q28,890.30 \frac{\text{litros}}{mes} * 12 \text{ meses} = Q346,683.60 \frac{\text{litros}}{año}$$

## 18. Cálculos comercialización y producción de compost

### Compost

Producción: 21 m<sup>3</sup> / día

Densidad: 700 kg / m<sup>3</sup>

Peso saco de compost: 45.36 kg

Precio de venta: Q55.00

Costo de producción (100 kg): Q17.00

Ecuación 195. Producción diaria de compost

$$21 \frac{m^3}{día} * 700 \frac{kg}{m^3} = 14,700.00 \frac{kg}{día}$$

---

<sup>133</sup> Precio mercado por galón de Q12.05.

Ecuación 196. Capacidad de producción en sacos de compost (45.36kg) al día

$$\frac{14,700 \frac{kg}{día}}{45.36 \frac{kg}{saco}} = 324.00 \frac{sacos}{día}$$

Ecuación 197. Ventas de sacos al día

$$324.00 \frac{sacos}{día} * Q55.00 \frac{precio}{saco} = Q17,820.00 \text{ diario}$$

Ecuación 198. Ventas mensuales sacos de compost<sup>134</sup>

$$Q17,820.00 \frac{ventas}{día} * 30 \text{ días} = Q534,600.00 \text{ mensual}$$

Ecuación 199. Ventas anuales sacos de compost

$$Q534,600.00 \frac{ventas}{mensuales} * 12 \text{ meses} = Q6,415,200.00 \text{ anuales}$$

Ecuación 200. Costo de producción por cada 100kg de compost

$$14,700 \frac{kg}{día} * \frac{Q17.00}{100 \text{ kg}} = Q2,499.00 \text{ diario}$$

Ecuación 201. Costo de producción mensual

$$Q2,499.00 \frac{\text{costo producción}}{día} * 30 \frac{días}{1 \text{ mes}} = Q 74,970.00 \text{ mensual}$$

Ecuación 202. Costo de producción anual

$$Q74,940.00 \frac{\text{costo producción}}{\text{mensual}} * 12 \frac{\text{meses}}{1 \text{ año}} = \mathbf{Q 899,640.00 \text{ anuales}}$$

---

<sup>134</sup> Se asumió que se vende todo lo que se produce.

19. Flujo de efectivo de inversión, Escenario 1 Pesimista

Tabla 247. Escenario FNE No. 1, Pesimista

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Escenario 1, Pesimista - FAFA - Ley de aguas (en Q miles)																
<b>Ingresos (+)</b>																
Ahorro en incumplimiento de ley		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Egresos (-)</b>																
Trámites/Licencias (0.5%)	59.5															
Movimiento de tierras (0.3%)	35.7															
COP (6%)	713.9	678.2	644.3	612.1	581.5	552.4	524.8	498.6	473.6	450.0	427.5	406.1	385.8	366.5	348.2	
Salarios Operarios	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0
Mantenimiento especial (2.5%)	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5
Imprevistos	35.7	28.6	21.4	14.3	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Energía	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4
Depreciación	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8
<b>Utilidad</b>	-2037.3	-1994.4	-1953.4	-1914.0	-1876.3	-1840.1	-1812.4	-1786.2	-1761.3	-1737.6	-1715.1	-1693.7	-1673.4	-1654.1	-1635.8	
Impuestos (25%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Depreciación (+)	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8
Inversión inicial	11898.8															
<b>FNE</b>	<b>-11994.0</b>	<b>-1554.5</b>	<b>-1511.7</b>	<b>-1470.6</b>	<b>-1431.2</b>	<b>-1393.5</b>	<b>-1357.3</b>	<b>-1329.7</b>	<b>-1303.4</b>	<b>-1278.5</b>	<b>-1254.8</b>	<b>-1232.3</b>	<b>-1210.9</b>	<b>-1190.6</b>	<b>-1171.4</b>	<b>-1153.0</b>

20. Flujo de efectivo de inversión, Escenario 2 Biogás, Más Probable

Tabla 248. Escenario FNE No. 2, Más probable

Años	Escenario 2, Más Probable - FFA - Biogas (en Q.miles)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Ingresos (+)</b>																
Ahorro en cumplimiento de ley	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Ahorro en gas propano	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04	347.04
<b>Egresos (-)</b>																
Trámites/Licencias (0.5%)	59.5															
Movimiento de tierras (0.3%)	35.7															
COP (6%)	713.9	678.2	644.3	612.1	581.5	552.4	524.8	498.6	473.6	450.0	427.5	406.1	385.8	366.5	348.2	
Salarios Operarios	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0
Mantenimiento especial (2.5%)	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5
Inprevisos	35.7	28.6	21.4	14.3	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Energía	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4
Depreciación	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8
<b>Utilidad</b>	-1690.2	-1647.4	-1606.3	-1567.0	-1529.2	-1493.0	-1465.4	-1439.2	-1414.2	-1390.6	-1368.1	-1346.7	-1326.4	-1307.1	-1288.8	
Impuestos (25%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Depreciación (+)	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8
Inversión inicial	11898.8															
<b>FNE</b>	<b>-11994.0</b>	<b>-1207.4</b>	<b>-1164.6</b>	<b>-1123.6</b>	<b>-1084.2</b>	<b>-1046.5</b>	<b>-1010.2</b>	<b>-982.6</b>	<b>-956.4</b>	<b>-931.5</b>	<b>-907.8</b>	<b>-885.3</b>	<b>-863.9</b>	<b>-843.6</b>	<b>-824.3</b>	<b>-806.0</b>

21. Flujo de efectivo de inversión, Escenario 2 Comercialización Compost, Más Probable

Tabla 249. Escenario FNE No. 2, Más probable

Años	Escenario 2, Más Probable - FAFA - Compost (en Q miles)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Ingresos (+)</b>																
Ahorro en incumplimiento de ley		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Venta compost	1283.6	2246.3	2567.1	2888.0	3208.9	3529.8	3850.7	4171.6	4492.5	4813.4	5134.3	5455.2	5455.2	5455.2	5455.2	5455.2
<b>Egresos (-)</b>																
Trámites (0.5%)	594.9	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
Movimiento de tierras (0.3%)	35.7															
Costo de producción compost	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6
COP (6%)	713.9	678.2	644.3	612.1	581.5	552.4	524.8	498.6	473.6	450.0	427.5	406.1	385.8	366.5	348.2	348.2
Salarios Operarios	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0
Mantenimiento especial (2.5%)	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5
Imprevistos (5%)	35.7	33.9	32.2	30.6	29.1	27.6	26.2	24.9	23.7	22.5	21.4	20.3	19.3	18.3	17.4	17.4
Energía	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4
Depreciación	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8
<b>Utilidad</b>	-1698.3	-698.2	-341.7	13.1	366.1	717.5	1074.4	1415.9	1762.9	2108.7	2453.2	2796.5	2817.9	2838.1	2857.4	2857.4
Impuestos (25%)	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	91.5	179.4	266.9	354.0	440.7	527.2	613.3	699.1	704.5	709.5	714.3
Depreciación (+)	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8
Inversión inicial	11898.8															
<b>FNE</b>	<b>-12529.4</b>	<b>-1215.5</b>	<b>-215.4</b>	<b>141.1</b>	<b>492.6</b>	<b>757.4</b>	<b>1020.9</b>	<b>1283.3</b>	<b>1544.7</b>	<b>1805.0</b>	<b>2064.3</b>	<b>2322.7</b>	<b>2580.2</b>	<b>2596.2</b>	<b>2611.4</b>	<b>2625.8</b>

22. Flujo de efectivo de inversión, Escenario 3

Tabla 250. Escenario FNE No. 3, Optimista

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Escenario 3. Optimista - FAFA - Ley de aguas, biogas y compost (en Qmiles)</b>																
<b>Ingresos (+)</b>																
Ahorro en incumplimiento de ley	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Venta compost	1,283.6	2,246.3	2,567.1	2,888.0	3,208.9	3,529.8	3,850.7	4,171.6	4,492.5	4,813.4	5,134.3	5,455.2	5,455.2	5,455.2	5,455.2	5,455.2
Ahorro en gas propano	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0
<b>Egresos (-)</b>																
Tarifes (0.5%)	594.9	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
Movimiento de tierras (0.3%)	35.7															
Costo de producción compost	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6	899.6
COP (6%)	713.9	678.2	644.3	612.1	581.5	552.4	524.8	498.6	473.6	450.0	427.5	406.1	386.8	366.5	348.2	329.9
Salarios Operarios	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0
Mantenimiento especial (2.5%)	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5
Imprevistos	35.7	33.9	32.2	30.6	29.1	27.6	26.2	24.9	23.7	22.5	21.4	20.3	19.3	18.3	17.4	16.4
Energía	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4
Depreciación	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8	482.8
<b>Utilidad</b>	-1,361.3	-361.1	5.4	360.1	713.1	1,064.6	1,414.5	1,762.9	2,110.0	2,456.7	2,800.2	3,143.6	3,164.9	3,186.1	3,204.4	3,222.7
Impuestos (25%)	-	-	-	1.3	90.0	178.3	266.1	353.6	440.7	527.5	613.9	700.1	785.9	791.2	796.3	801.1
Depreciación (+)	-	482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8	-482.8
Inversión inicial	11,898.8															
<b>FNE</b>	<b>-12,529.4</b>	<b>-868.5</b>	<b>131.7</b>	<b>486.8</b>	<b>752.9</b>	<b>1,017.6</b>	<b>1,281.2</b>	<b>1,543.6</b>	<b>1,805.0</b>	<b>2,065.3</b>	<b>2,324.6</b>	<b>2,583.0</b>	<b>2,840.5</b>	<b>2,856.5</b>	<b>2,871.6</b>	<b>2,886.1</b>

### XIII. GLOSARIO

(bDQO) Demanda química de oxígeno biodegradable: se divide en dos fracciones importantes, la de DQO fácilmente biodegradable es la fracción que se asimila con mayor facilidad por la biomasa mientras que la fracción particulada debe disolverse primero con enzimas para luego ser asimilada.

(DBO) Demanda bioquímica de oxígeno: Es la cantidad de oxígeno requerido por bacterias para la descomposición de materia orgánica en el agua.

(DQO) Demanda química de oxígeno: Cantidad de oxígeno requerido para la oxidación completa de la materia orgánica por agentes químicos oxidantes como permanganato de potasio en ambientes ácidos.

(iSST) Sólidos suspendidos totales inertes: La diferencia entre las concentraciones de sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos volátiles

(nbDQO) Demanda química de oxígeno no biodegradable: Contribuye a la producción total de lodos en el proceso de lodos activados.

(nbSSV) Sólidos suspendidos volátiles no biodegradables: Concentración estimada a partir de mediciones de DBO, DQO, SSV, y sus solubles asumiendo una tasa constante de DQO/VSS en el agua.

Nitrógeno total (NT): es la suma de nitratos y amonio excluyendo el nitrógeno orgánico.

Nitrógeno de kjendahl (TKN): Es la medida de la suma de la cantidad de amonio y nitrógeno orgánico presente en el agua residual.

(sDBO) Demanda bioquímica de oxígeno soluble: Simbolizada por la S, indica que la corriente está formada por compuestos carbonosos en disolución.

(sDQO) Demanda química de oxígeno soluble: es la suma de la demanda química de oxígeno fácilmente biodegradable, DQO soluble no biodegradable y una pequeña porción de DQO coloidal.

(MLSS) Sólidos suspendidos en el licor mixto: son la suma de los sólidos suspendidos volátiles más los sólidos en suspensión no volátiles del licor mixto.

(MLVSS) Sólidos en suspensión volátiles del licor mixto: suspensión microbiológica en el tanque de aireación de un proceso de lodos activados.

(SST) Sólidos suspendidos totales: La cantidad de sólidos en suspensión que se encuentra en el flujo de aguas residuales.

(SSV) Sólidos suspendidos volátiles: En régimen estacionario, es la concentración de lodo biológico en el reactor que se mantiene constante en todo momento.