

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



Megaproyecto

“Tercera fase de la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala”

Trabajo de graduación presentado por Bernardo Kummerfeldt Manzanera, Luis Fernando Ruiz Herrera para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Electrónica; Julio Alberto Espinoza Obregón, Irving Alejandro López Robles, María Alejandra Molina Solís, Juan José Paiz Marroquín para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química y Catherine Aneliss Mancilla de León para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Industrial

GUATEMALA

2011

Megaproyecto
“Tercera fase de la automatización del Laboratorio de
Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala”

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



Megaproyecto

“Tercera fase de la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala”

Trabajo de graduación presentado por Bernardo Kummerfeldt Manzanera, Luis Fernando Ruiz Herrera para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Electrónica; Julio Alberto Espinoza Obregón, Irving Alejandro López Robles, María Alejandra Molina Solís, Juan José Paiz Marroquín para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química y Catherine Aneliss Mancilla de León para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Industrial

GUATEMALA

2011

Vo.Bo.:

(f) _____
(MSc. Gamaliel Zambrano)

Tribunal:

(f) _____
(MSc. Gamaliel Zambrano)

(f) _____
(M.Sc. Carlos Esquit.)

(f) _____
(Inga. Ma. André Destarac)

Fecha de aprobación: 27 de enero de 2011

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	x
RESUMEN	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	5
A. Generales	5
B. Específicos	5
III. MARCO TEÓRICO.....	6
A. Planta de biodiesel.....	6
B. Columna de extracción líquido-líquido	15
C. Torre de enfriamiento	21
D. Lenguaje de programación	35
IV. ANTECEDENTES.....	49
V. DELIMITACIÓN E IMPACTO DEL TEMA.....	50
A. Planta de producción de biodiesel	50
B. Columna de extracción líquido – líquido.....	51
C. Torre de enfriamiento	52
VI. METODOLOGÍA.....	54
A. Fase 1: Investigación	54
B. Fase 2: Diseño.....	54
C. Fase 3: Determinación de equipo y cotizaciones.....	54
D. Fase 4: Instalación	55
E. Fase 5: Elaboración del programa e interfaz gráfica	55
F. Fase 6: Pruebas de puesta en marcha	55
VII. PLANTA DE BODIESEL.....	56
A. Pruebas de laboratorio.....	56
B. Diseño de la planta	58

C. Montaje de planta.....	63
D. Resultados	64
E. Discusión	95
VIII. COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO	103
A. Diseño	103
B. Resultados.....	104
C. Discusión	114
VIII. TORRE DE ENFRIAMIENTO	118
A. Diseño	118
B. Resultados.....	127
C. Discusión	162
IX. COSTO Y VENTAJAS DE LA AUTOMATIZACIÓN	166
A. Costos	166
B. Ventajas de la automatización	167
X. CONCLUSIONES.....	172
XI. RECOMENDACIONES.....	174
XII. BIBLIOGRAFÍA.....	176
XIII. APÉNDICE	178
A. Modelos de la planta piloto de biodiesel en Autocad.....	178

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 . Diagrama de módulos de trabajo megaproyecto <i>Tercera fase de la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala</i>	4
Ilustración 2. Reacción global de la producción de biodiesel	8
Ilustración 3. Reacciones consecutivas en la producción de biodiesel.....	12
Ilustración 4. Proceso de producción de biodiesel	13
Ilustración 5. Equipo de destilación para laboratorios	16
Ilustración 6. Equipo de destilación industrial por lotes	17
Ilustración 7. Equilibrio triangular para el sistema agua-éter isopropílico-ácido acético .	21
Ilustración 8. Carta psicométrica mezcla agua-aire a condiciones de operación estándares.....	22
Ilustración 9. Tabla de información de termocoplas de diferentes materiales	26
Ilustración 10 . Gráfica donde se muestran las curvas de varios tipos de termocopla....	27
Ilustración 11. Gráfica de la variación de temperatura de un RTD de platino.....	28
Ilustración 12. Gráfica de la variación de un termistor con un NTC contra un RTD.....	29
Ilustración 13. Diagrama de un sensor de presión capacitivo	30
Ilustración 14: Ejemplo de un sensor de fibra óptica para presión	30
Ilustración 15. Ejemplo de un dispositivo de alambre resonante.....	31
Ilustración 16: Caudalímetro de Coriolis	32
Ilustración 17. Sensor de nivel de tipo ultrasónico colocado en un tanque	34
Ilustración 18. Lazo de control cerrado	37
Ilustración 19. Lazo cerrado utilizando un PLC.....	37
Ilustración 20. IEC 1131-3 símbolo estándar	38
Ilustración 21. Representación de válvula de control	39
Ilustración 22. Medidores de capacidades en fluidos conductores. A) Fluido no conductor. B) Fluido conductor. C) Puente de capacidades	42
Ilustración 23. Termopar.....	43
Ilustración 24. Diagrama de flujo de equipo del proceso de producción de biodiesel.....	66
Ilustración 25. Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel	67
Ilustración 26. Planta de biodiesel montada.....	89
Ilustración 27. Filtro prensa de planta de biodiesel	89
Ilustración 28. Bombas y agitadores de la planta de biodiesel.....	90
Ilustración 29. Instrumentación en el tanque de calentamiento de materia prima	90
Ilustración 30. Instrumentación en el reactor y en el tanque de metanol.....	91
Ilustración 31. Válvulas e instrumentación en el tanque de tratamiento de biodiesel	91

Ilustración 32. Pantalla de inicio y presentación de proyecto	92
Ilustración 33. Pantalla de configuración de proceso	92
Ilustración 34. Pantalla de tratamiento de materia prima	93
Ilustración 35. Pantalla de tratamiento de materia prima	93
Ilustración 36. Pantalla de tratamiento de productos	94
Ilustración 37. Pantalla en la que se especifican los integrantes del equipo de trabajo..	94
Ilustración 38. Características de las entradas digitales del controlador	110
Ilustración 39. Características del controlador seleccionado.....	110
Ilustración 40. Características de la base del controlador seleccionado.	111
Ilustración 41. Módulos de expansión elegidos.....	111
Ilustración 42 . Carta psicométrica corregida a la altura y presión de operación del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	128
Ilustración 43. Diagrama detallado de la torre de enfriamiento	129
Ilustración 44. Procedimiento del funcionamiento torre de enfriamiento tanto manual como electrónico	130
Ilustración 45. Tubería de la torre antes de la instalación de retorno de agua	138
Ilustración 46. Modificación realizada sobre tubería de salida de agua.....	139
Ilustración 47. Sensores de nivel colocados en el tanque de agua de la torre	139
Ilustración 48. Sensor RTD colocado en la entrada de agua de la torre	140
Ilustración 49. Sensor de humedad y temperatura (derecha) junto al tubo donde se obtiene la presión del aire de la torre en la entrada frontal	140
Ilustración 50. Sensores de humedad y temperatura y velocidad de aire colocados en la entrada trasera de la torre.....	141
Ilustración 51. Ubicación de los sensores de presión	141
Ilustración 52. Estructura del nuevo Manifold que controla la torre de enfriamiento.....	142
Ilustración 53. Rotámetro de la torre de enfriamiento	142
Ilustración 54. Tubo de Venturi con sus respectivos sensores de presión de vapor.....	143
Ilustración 55. Instalación de rieles y canaletas en el gabinete	144
Ilustración 56. Puntos de entrada y salida de cables al PLC y sensores.....	144
Ilustración 57. Exterior del gabinete mostrando el botón de paro de emergencia	145
Ilustración 58. Gabinete instalado en la torre de enfriamiento.....	145
Ilustración 59. Sensor RTD instalado en la salida de agua de la torre	146
Ilustración 60. Transmisor de un RTD de 3 hilos implementado.	147
Ilustración 61. Rotámetro con display utilizado en el proceso	147
Ilustración 62. Transmisor del rotámetro usado	148
Ilustración 63. Interior del sensor de nivel de agua utilizado	148
Ilustración 64. Transmisor de presión utilizado para la medición de presión del aire ...	149

Ilustración 65. Interior del Sensor de velocidad de Aire con las conexiones en bornera.....	149
Ilustración 66. Interior del sensor de temperatura y humedad de aire mostrando las conexiones en bornera.....	150
Ilustración 67. Válvula ON-OFF utilizado para la entrada de agua a la torre.....	150
Ilustración 68. Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado PID usado para el control del variador de frecuencia	151
Ilustración 69. Algoritmo del proceso a implementar en la automatización de la torre de enfriamiento	153
Ilustración 70. Curva de operación a flujo de agua constante igual a una vuelta de apertura de llave, en operación con tiro inducido en modalidad manual	154
Ilustración 71. Curva de operación a flujo de agua constante igual a tres vueltas de apertura de llave de entrada, en operación con tiro inducido en modalidad manual	155
Ilustración 72 . Curva de operación a flujo de agua constante de válvula de entrada totalmente abierto en operación con tiro inducido en modalidad manual	156
Ilustración 73 . Curva de operación promedio para enfriamiento de agua con torre de enfriamiento de tiro inducido en modalidad manual	157
Ilustración 74 . Curva de operación a flujo de agua constante igual a una vuelta de apertura de llave de entrada, en operación con tiro forzado en modalidad manual.....	158
Ilustración 75 . Curva de operación a flujo de agua constante igual a tres vueltas de apertura de llave, en operación con tiro forzado en modalidad manual	159
Ilustración 76 . Curva de operación a flujo de agua constante igual a válvula de entrada totalmente abierta, en operación con tiro forzado en modalidad manual.....	160
Ilustración 77 . Curva de operación promedio para enfriamiento de agua con torre de enfriamiento de tiro forzado en modalidad manual	161
Ilustración 78. Vista de planta del modelo de la planta piloto.....	178
Ilustración 79. Vista frontal del modelo de la planta piloto.....	179
Ilustración 80. Vista lateral izquierda del modelo de la planta piloto	179
Ilustración 81. Vista isométrica derecha del modelo de la planta piloto.....	180
Ilustración 82. Vista isométrica posterior del modelo de la planta	181

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del biodiesel según la ASTM	7
Tabla 2. Propiedades físicas del éter isopropílico	18
Tabla 3. Riesgos inherentes del éter isopropílico.....	18
Tabla 4. Propiedades físicas del ácido acético	19
Tabla 5. Riesgos inherentes del ácido acético.....	19
Tabla 6. Propiedades físicas del agua	20
Tabla 7. Datos en el equilibrio para el sistema a 20°C.....	20
Tabla 8. Rangos de operación de RTDs de diferentes materiales	28
Tabla 9. Condiciones de operación óptimas	64
Tabla 10. Tratamiento de biodiesel y glicerina.....	64
Tabla 11. Equipo utilizado en el diagrama de flujo de equipo de la planta de biodiesel .	65
Tabla 12. Asignación de colores a tubería según la especie que transporta.....	65
Tabla 13. Balance de masa para la conversión de las diferentes catálisis	74
Tabla 14. Especificaciones de los equipos necesarios	74
Tabla 15. Especificaciones de la tubería a utilizar en el proceso de producción de biodiesel	75
Tabla 16. Especificaciones para cada bomba de la planta de producción de biodiesel .	76
Tabla 17. Especificaciones de las válvulas automáticas necesarias para el proceso de producción de biodiesel	76
Tabla 18. Características generales de las válvulas solenoides	78
Tabla 19. Características de la válvula proporcional adquirida	78
Tabla 20. Instrumentación necesaria en cada equipo de la planta de biodiesel.....	79
Tabla 21. Descripción de los sensores de temperatura	80
Tabla 22. Descripción de los sensores de presión.....	81
Tabla 23. Descripción de los sensores de humedad.....	81
Tabla 24. Descripción del analizador de conductividad y pH	82
Tabla 25. Descripción general de la celda de conductividad.....	83
Tabla 26. Descripción general de la celda de conductividad.....	83
Tabla 27. Descripción del transmisor de nivel capacitivo	84
Tabla 28. Descripción del medidor de nivel puntual.....	85
Tabla 29. Inventario de señales digitales de salida	85
Tabla 30. Inventario de señales digitales de entrada	86
Tabla 31. Inventario de señales analógicas de entrada	86
Tabla 32. Inventario de señales analógicas de salida	86

Tabla 33. Carga de fuente de alimentación de MicroLogix 1200 – Cálculo de corriente del sistema	87
Tabla 34. Corriente de carga máxima del MicroLogix 1200	88
Tabla 35. Ecuación de calibración para cada sensor	88
Tabla 36. Clasificación de las variables del proceso	107
Tabla 37. Entradas del proceso	107
Tabla 38. Salidas del proceso.....	108
Tabla 39. Resumen de entradas y salidas del proceso.....	108
Tabla 40. Cálculo de potencia de los módulos seleccionados	111
Tabla 41. Cálculos de validación de la configuración elegida	112
Tabla 42. Cableado del proceso	112
Tabla 43. Dimensiones de empaque torre de enfriamiento	121
Tabla 44. Listado de variables no constantes a controlar	122
Tabla 45. Listado de variables constantes a controlar	125
Tabla 46. Parámetros de la torre de enfriamiento a monitorear en el proceso	131
Tabla 47. Equipo a controlar en el proceso de la torre de enfriamiento.	131
Tabla 48. Parámetros del agua en la tubería de la torre de enfriamiento	132
Tabla 49. Información sobre el tanque de almacenamiento de agua de la torre	133
Tabla 50. Información sobre el aire circulante de la torre.....	133
Tabla 51. Información del tubo de Venturi utilizado en la torre.....	134
Tabla 52. Listado de los diferentes sensores a utilizar	134
Tabla 53. Listado de sensores de entrada al proceso y el tipo de señal	135
Tabla 54. Listado de salidas del PLC a implementar en la torre de enfriamiento	136
Tabla 55. Lista de módulos de expansión a utilizar con el PLC instalado en la torre ...	136
Tabla 56. Lista de módulos utilizados y la corriente calculada por módulo	137
Tabla 57. Consumo de corriente y de potencia del PLC seleccionado usando los módulos definidos.....	137
Tabla 58. Características de transferencia de masa de la torre de enfriamiento	153
Tabla 59. Costos de automatización	166

RESUMEN

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) cuenta con equipo especializado utilizado por los estudiantes para realizar prácticas de laboratorio e investigación. En el año 2007 se inició el proyecto de automatizar el Laboratorio de Operaciones Unitarias que consiste en la actualización del equipo para facilitar las operaciones que se realizan con ellos. El proyecto inició con la torre de absorción en su primera fase. En la segunda fase se automatizó la torre de destilación y una serie de variadores de frecuencia. Ambas fases fueron proyectos multidisciplinarios e involucraron estudiantes de Ingeniería Química, Electrónica, Industrial y Ciencias de la Computación. La tercera fase inició el año 2009 con estudiantes de Ingeniería Electrónica, Química e Industrial para automatizar la torre de enfriamiento, la planta de biodiesel y la columna de extracción líquido-líquido.

Se dividió el proyecto en módulos y cada módulo tenía sus actividades y tareas para la ejecución del proyecto, además de tener sub módulos asignados a cada estudiante. Los estudiantes de Ingeniería Química aportaron la asesoría técnica a la automatización, mientras que los estudiantes de Ingeniería Electrónica elaboraron la implementación de los sensores y actuadores en el equipo. Una estudiante de Ingeniería Industrial aportó un análisis costo beneficio, así como el seguimiento de tareas y la elaboración del presupuesto del proyecto.

La torre de enfriamiento se utiliza para enfriar agua que proviene de otros equipos en el laboratorio. Se instalaron sensores, válvulas y un PLC en el equipo, para monitorear y activar funciones de la operación desde una computadora en el laboratorio. Para la selección de los sensores se hizo una profunda investigación con el fin de poder tener el mejor control de la torre.

La automatización de la columna de extracción líquido-líquido consistió en una investigación del proceso para la selección de variables críticas que se debían controlar

durante el proceso de extracción. Esto se utilizó para la implementación de sensores y del PLC para el control y monitoreo del proceso.

En la planta de biodiesel, primero se realizó un diseño de una planta piloto para la producción de Biodiesel por catálisis básica y el tratamiento de glicerina (subproducto). Con el diseño del equipo a utilizar se procedió a la selección e implementación de sensores y actuadores a usar, para el proceso automatizado.

Gracias a la automatización, existe un mejor aprovechamiento de materia prima porque se colocan las cantidades exactas de reactivos en la planta de biodiesel y columna de extracción. En el caso de la torre de enfriamiento, toda la tubería está recirculada, por lo que el agua puede utilizarse nuevamente. Por otro lado, se evitan accidentes dentro del laboratorio, ya que se pueden realizar las mediciones automáticas evitando la manipulación de sustancias dañinas. Asimismo, se protegen los sensores, válvulas y tuberías, ya que existe un sistema de control para evitar sobrepasar los parámetros críticos que puedan ocasionar daños en los equipos. Finalmente, facilita el aprendizaje de los estudiantes porque existe mayor flexibilidad y exactitud en los procesos.

I. INTRODUCCIÓN

En los años 2008 y 2009 se desarrollaron la primera y segunda fase de automatización, respectivamente, del Laboratorio de Operaciones Unitarias. En estos proyectos se realizó la automatización de la torre de absorción (2008) y la torre de destilación (2009), convirtiéndose en proyectos multidisciplinarios que involucraron a estudiantes de Ingeniería Química, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Industrial e Ingeniería en Ciencias de la Computación.

En dichos proyectos se llevaron a cabo instalaciones de instrumentos electrónicos de control y medición, con los cuales se crearon lazos de control para lograr una mejora notable en la obtención de resultados y control de las variables críticas en la operación de los equipos de los megaproyectos antes mencionados.

Las operaciones unitarias, esencialmente, son operaciones que evidentemente constituyen la trama de la industria y las líneas de producción, se unifican y simplifican el tratamiento de todos los procesos. Aunque las operaciones unitarias son una rama de la Ingeniería Química y se basan de igual manera en la ciencia y la experiencia, se debe combinar la teoría y la práctica para diseñar el equipo, construirlo, ensamblarlo, hacerlo operar y darle mantenimiento.

Es importante comprender que las operaciones unitarias son métodos muy convenientes para organizar la materia de estudio que abarca la Ingeniería Química y se basa en dos hechos: primero, aunque el número de procesos individuales es grande, cada uno puede ser fragmentado en una serie de etapas denominadas operaciones, que se repiten a lo largo de los diferentes procesos. Y segundo, las operaciones individuales tienen técnicas comunes y se basan en los mismos principios científicos. Sumado a esto, es vital entender todos los fenómenos físico-químicos que comprenden los procesos industriales en Guatemala. De igual manera, es importante comprender el uso de equipos industriales que realizan una operación unitaria esencial para el desarrollo de un proceso. Entre estos equipos se puede mencionar la columna de extracción líquido-líquido, una planta productora de biodiesel y una torre de enfriamiento, entre otros.

Con el pasar del tiempo, las operaciones unitarias han dejado de ser una rama únicamente de la Ingeniería Química, pues el desarrollo electrónico y mecánico se volvió indispensable en el apoyo y desarrollo de otras ramas de la ingeniería para hacer de los equipos y procesos más eficientes. Así pues, ramas como la Ingeniería Electrónica e Ingeniería Industrial han ido desarrollando y mejorando los procesos y equipos para estar a la vanguardia de la tecnología. Una de las ramas que ha nacido de la mezcla de estas disciplinas es la automatización industrial.

La automatización industrial en Guatemala es uno de los campos de innovación tecnológica de mayor importancia en la actualidad, debido a todas las ventajas que ofrece. Entre las mejoras que ofrece la automatización están el aumento de productividad y el incremento de la seguridad industrial en las plantas donde se han implementado sistemas de automatización y control industrial. El objetivo principal de la automatización es encomendar las tareas realizadas por humanos a máquinas automatizadas, ordenadores y sistemas informáticos, que procesan la información con mayor rapidez que el ser humano y utilizan modelos matemáticos para describir las acciones reguladoras y analíticas del hombre.

La implementación y desarrollo de un sistema de automatización constituye principalmente tres tecnologías: la mecánica, electrónica e informática. Esta implementación puede incluir otra rama, la química, la cual puede ayudar a desarrollar un sistema de automatización de un equipo utilizado en la industria química. En este trabajo se hace mención a un proyecto de automatización industrial aplicado a tres equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG, estos son la columna de extracción líquido-líquido, la torre de enfriamiento y la planta productora de biodiesel. En este trabajo se muestra la información para la implementación de un proyecto de automatización industrial, abarcando todos los pasos del proyecto de automatización, desde la definición del proyecto, la determinación de las actividades a realizar, el esquema del proceso y la descripción de las mejoras cualitativas.

Con base a los resultados y mejoras que se desean obtener en el equipo a automatizar, se especificaron y seleccionaron los dispositivos electrónicos a utilizar y se realizó la programación de dispositivos lógicos programables (PLC), para crear los lazos de control en el equipo. La propuesta incluye comparar los resultados de los procesos

en la operación manual, de los equipos antes mencionados, con los resultados obtenidos en la operación de los equipos ya automatizados. Con este trabajo se muestra la importancia de la automatización de equipos industriales y de laboratorio, permitiendo la obtención de resultados más exactos y homogéneos, y mejorando la seguridad industrial en la operación de equipos que operan con sustancias tóxicas. Además se resalta la ventaja económica que puede ofrecer un proyecto de automatización, reduciendo pérdidas, maximizando el uso de recursos y realizando más rápida y eficientemente acciones repetitivas de producción.

Se presentan también, como vital importancia para el proyecto de automatización, el diseño y programación de los lazos de control. La arquitectura y desarrollo del sistema electrónico en un equipo industrial, es la base para lograr el control remoto del mismo. Las mejoras electrónicas desarrolladas en los equipos del laboratorio brindarán la oportunidad a futuros estudiantes de diversas carreras de manipular, dar mantenimiento y mejorar los sistemas electrónicos y equipos químicos que en este proyecto se desarrollaron, con el fin de mantener la UVG a la vanguardia en tecnologías y equipos industriales utilizados en la formación de futuros profesionales. Se incluirá en esta entrega, el detalle de los diseños y sistemas electrónicos implementados en los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG.

El equipo de trabajo de megaproyecto de la tercera fase de automatización de la UVG, es un proyecto multidisciplinario que incluye a 8 estudiantes de diversas carreras entre las que están Ingeniería Química, Electrónica e Industrial, esto puede apreciarse en la Ilustración 1.

Ilustración 1 . Diagrama de módulos de trabajo megaproyecto *Tercera fase de la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala*



II. OBJETIVOS

A. Generales

- Continuar con la Automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, desarrollando la tercera fase de automatización que comprende la planta de biodiesel, la columna de extracción líquido-líquido y la torre de enfriamiento.

B. Específicos

- Modificar la planta piloto de producción de biodiesel del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para obtener biodiesel y glicerina puros de forma automática, aumentando el rendimiento y la calidad de éstos.
- Controlar por medio de sensores y dispositivos electrónicos el funcionamiento de la columna de extracción líquido-líquido del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Automatizar la torre de enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para permitir que los usuarios controlen el funcionamiento de la torre de una forma más efectiva y así obtener resultados más eficientes.

III. MARCO TEÓRICO

A. Planta de biodiesel

1. Generalidades del biodiesel. Biodiesel es un término utilizado para nombrar a los aceites y grasas transesterificadas para ser usados como combustible. Está compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, es decir, es un combustible de origen orgánico producido a partir de aceites vegetales o grasas animales. (Acosta, 2008; Demirbas, 2008)

El biodiesel puede producirse a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como soya, maní y otros aceites vegetales, tales como el aceite para cocinar usado, o incluso, excremento animal. (Acosta, 2008)

Actualmente es utilizado como: (Miliarium, 2004)

- Combustible en su forma pura; sin embargo, tiene menor contenido energético, lo que implica un mayor requerimiento de combustible.
- Combustible mezclado en cualquier proporción con diesel regular, para su uso en motores de ignición a compresión. Sin embargo, se recomienda limitar las mezclas a un máximo de 5% en motores diesel más antiguos.
- Aditivo lubricante en combustibles diesel sin azufre.

La ASTM (American Society for Testing and Material Standard) ha especificado distintas pruebas que se deben realizar a los combustibles para asegurar su calidad y correcto funcionamiento. En la Tabla 1, se enumeran las especificaciones establecidas para el biodiesel y el método de ensayo correspondiente. (Wearcheck Ibérica, 2004)

Tabla 1. Especificaciones del biodiesel según la ASTM

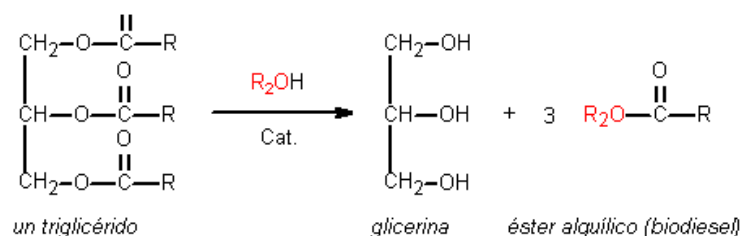
Propiedad	Unidad	Límites		Método de ensayo
		Mínimo	Máximo	
Contenido de éster	% (m/m)	96.5	-	EN 14103
Densidad a 15°C	Kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C	cSt	3.50	5.00	EN ISO 3104
Punto inflamación	°C	120	-	prEN ISO 3679
Contenido de azufre	ppm	-	10.0	prEN ISO 20840 prEN ISO 20884
Residuo de carbón (en 10% de residuo destilado)	% (m/m)	-	0.30	EN ISO 10370
Índice de cetano		51.0	-	EN ISO 5165
Cenizas sulfatadas	% (m/m)	-	0.02	ISO 3987
Contenido de agua	ppm	-	500	EN ISO 12937
Contaminación total	ppm	-	24	EN 12662
Corrosión al cobre (3h a 50°C)	Clasificación	Clase 1		EN ISO 2160
Estabilidad a oxidación 110°C	Horas	6.0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg KOH/g	-	0.50	EN 14104
Índice de yodo	g yodo/100g	-	120	EN 14111
Éster de metilo de ácido linoléico	% (m/m)	-	12.0	EN 14103
Ésteres de metilo poli- insaturados	% (m/m)	-	1	
Metanol	% (m/m)	-	0.20	EN 14110
Monoglicéridos	% (m/m)	-	0.80	EN 14105
Diglicéridos	% (m/m)	-	0.20	EN 14105

Continuación Tabla 1

Propiedad	Unidad	Límites		Método de ensayo
		Mínimo	Máximo	
Triglicéridos	% (m/m)	-	0.20	EN 14105
Glicerina libre	% (m/m)	-	0.02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% (m/m)	-	0.25	EN 14105
Metales del grupo I (Na + K)	ppm	-	5.0	EN 14108 EN 14109
Metales grupo II (Ca + Mg)	Ppm		5.0	prEN 14538
Fósforo	Ppm		10.0	EN 14107

2. Insumos de la producción de biodiesel. Los aceites vegetales y grasas animales pueden ser convertidos en ésteres de metilo o etilo por medio de un proceso de transesterificación en presencia de un catalizador, como alcóxidos de sodio y/o potasio. La reacción general se muestra a continuación:

Ilustración 2. Reacción global de la producción de biodiesel



Los insumos de este proceso son los siguientes:

a. Aceite y grasas. El aceite es el principal insumo para la producción de biodiesel. Puede utilizarse cualquier aceite o grasa de origen orgánico, incluyendo aceites residuales ya usados o recuperados de trampas de grasas. Sin embargo, de la calidad de este insumo dependerá la necesidad de un pretratamiento más o menos complejo, que hará el proceso más o menos caro. No es posible elaborar biodiesel a partir de aceites minerales como los lubricantes. (Acosta, 2008)

Los aceites y grasas animales y vegetales son mezclas de triglicéridos diferentes, los cuales a su vez están compuestos frecuentemente por ácidos grasos diferentes. Sus propiedades físicas y químicas están relacionadas directamente con el número y estructura química de los ácidos grasos unidos al glicerol, así como con el grado de saturación de los ácidos grasos y su longitud de cadena. (Castro, 2008)

Además de los triglicéridos, las grasas y aceites contienen cantidades variables de otras sustancias como ácidos grasos libres, entre otros. Estas sustancias aportan colores, sabores y olores extraños, inestabilidad y formación de espuma y humo durante la fritura de alimentos. (Castro, 2008)

El índice de acidez es una medida que determina la cantidad de ácidos grasos libres. Los aceites crudos y los usados, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres alto. Es preferible que los aceites y grasas a utilizar tengan un bajo contenido de ácidos grasos libres, ya que éstos dificultan el proceso de obtención del biodiesel. (Castro, 2008; Miliarium, 2004)

A continuación se presentan algunos tipos de materia prima utilizadas para la producción de biodiesel, con su respectivo rango de porcentaje de acidez: (Van Gerpen, 2004)

- Aceites vegetales refinados < 0.05%
- Aceites vegetales crudos 0.3 – 0.5%
- Aceite y grasa usada de cocina 2 – 7%
- Grasa animal 5 – 30%

El contenido de agua en un aceite es importante porque el agua favorece la hidrólisis de los triglicéridos, produciendo ácidos grasos libres, mono y diglicéridos y glicerol. Por esta razón es recomendable que la materia prima a utilizar tenga bajo contenido de agua. (Castro, 2008; Miliarium, 2004)

b. Alcohol. De acuerdo a la ecuación química (Ilustración 2) se requieren 3 moléculas de alcohol y una de triglicérido para producir 3 moléculas de biodiesel y una de glicerina. Sin embargo, debido a que esta es una reacción reversible, se necesita un exceso de alcohol para asegurar la mayor conversión del triglicérido a biodiesel. Si la

razón de alcohol no es suficiente, la conversión a biodiesel no se dará completamente; esto quiere decir que el producto final contendrá mono y diglicéridos, los cuales cristalizan muy fácil en el biodiesel y pueden causar problemas al utilizarse como combustible. Por el contrario, un valor muy alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad. Cuando la glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción revierta, disminuyendo el rendimiento de los ésteres. (Miliarium, 2004)

El alcohol se emplea en una cantidad aproximadamente del 10 al 20% del volumen del aceite a procesar. Generalmente se emplea metanol de 95% de pureza, pero también se puede utilizar etanol, siempre y cuando sea anhidro o tenga una pureza de 99.5%. (Acosta, 2008)

Como se mencionó, es necesario utilizar un exceso de alcohol para aumentar el rendimiento de la reacción. Para una catálisis básica, es recomendable utilizar una relación molar de metanol y aceite de 3:1. En el caso de una catálisis ácida se utiliza metanol en un 2.25 veces la cantidad en gramos de ácidos grasos libres. (Van Gerpen, 2004)

c. Catalizador. Para la transesterificación de triglicéridos se pueden utilizar algunos de los siguientes tipos de catalizadores: alcalinos, ácidos, enzimáticos y heterogéneos. El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos. Generalmente se utiliza hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) de grado industrial, en escamas o perlas. La cantidad de catalizador a utilizar depende de la acidez del aceite a tratar. (Castro, 2007)

Si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es la apropiada porque se daría una neutralización, formando jabones. En este caso se pueden utilizar catalizadores ácidos para un pretratamiento de los ácidos grasos libres, seguido de la transesterificación alcalina para convertir los triglicéridos restantes. Los catalizadores ácidos pueden ser utilizados directamente pero la reacción es muy lenta y requiere mayor cantidad de alcohol. (Castro, 2007; Van Gerpen, 2004)

Según VarGerpen, para la catálisis ácida como pretratamiento, se utiliza la siguiente relación de ácido sulfúrico:

Ecuación 1

$$\text{ácido sulfúrico} = 0.05 * \frac{\text{cantidad de ácidos grasos libres}}{\text{densidad ácido sulfúrico}} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

y para los alcoholes,

Ecuación 2

$$\text{metanol} = 2.25 * \text{cantidad de ácidos grasos libres} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Para la catálisis básica se utiliza las siguientes relaciones:

Ecuación 3

$$\text{metanol} = 3 * \text{cantidad de metanol teórica} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Ecuación 4

$$\text{hidróxido de potasio} = 0.1 * \text{mol AGC} * \text{Peso molecular} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Según SpringBoard Biodiesel, las relaciones óptimas para la catálisis ácida, para un estándar de 15% de acidez:

Ecuación 5

$$\text{ácido sulfúrico} = \frac{1\text{mL ácido}}{1\text{L aceite}} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Ecuación 6

$$\text{metanol} = \frac{0.08\text{L metanol}}{1\text{L aceite}} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Y para la catálisis básica,

Ecuación 7

$$\text{metanol} = \frac{0.12\text{L metanol}}{1\text{L aceite}} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Ecuación 8

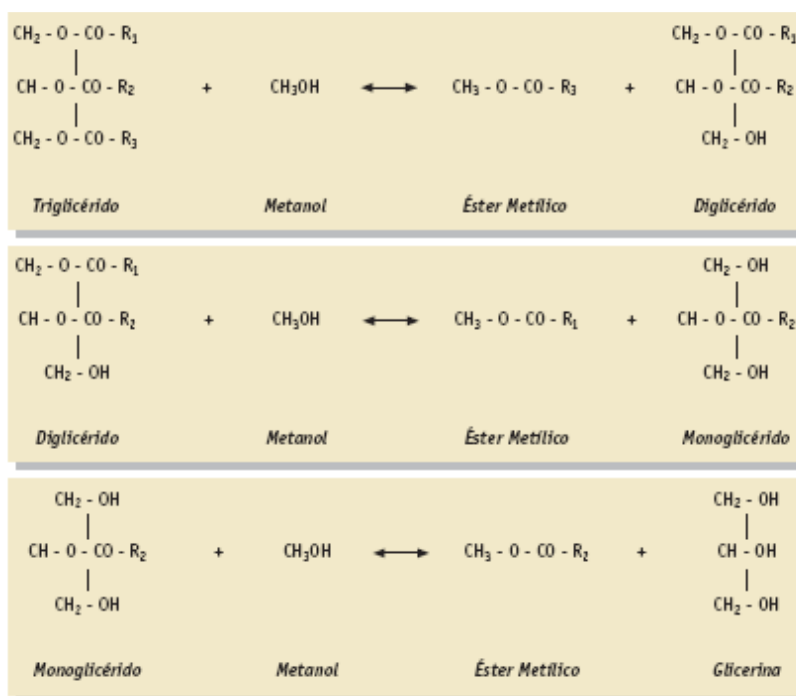
$$\text{hidróxido de potasio} = \frac{11.25\text{g}}{1\text{L aceite}} * \frac{100}{\text{pureza}}$$

Los catalizadores enzimáticos presentan ciertas ventajas con respecto a los alcalinos y ácidos. Entre éstas se puede mencionar que el glicerol puede ser removido fácilmente, los ácidos grasos libres pueden ser convertidos totalmente en ésteres y la presencia de agua no es problemática. Sin embargo los costos de producción son más altos. (Castro, 2007)

Los catalizadores heterogéneos son sólidos y por lo tanto son fácilmente recuperables al final de la reacción. Estos permiten superar algunos problemas de los catalizadores homogéneos como la purificación el biodiesel y el tratamiento de efluentes contaminados con los catalizadores. (Castro, 2007)

3. Proceso de producción de biodiesel. La producción de biodiesel se logra por medio de la transesterificación, que consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción, un mol de éster metílico o etílico es liberado. Las reacciones se llevan a cabo como sigue: (Miliarium, 2004)

Ilustración 3. Reacciones consecutivas en la producción de biodiesel



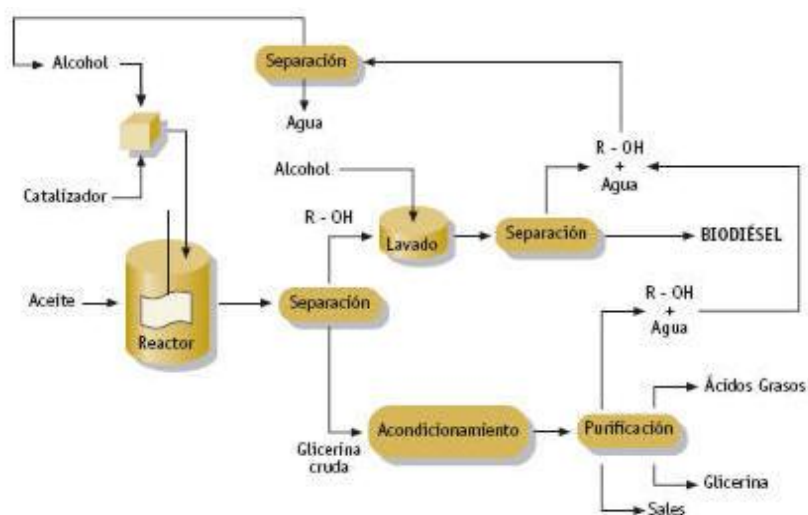
El proceso comienza por el calentamiento y purificación del aceite a utilizar. El calentamiento se realiza para que la materia prima tenga la suficiente fluidez para luego ser filtrada. La temperatura de calentamiento no puede exceder los 90°C para evitar acidificar la materia prima. La purificación consiste en la filtración de partículas gruesas que se encuentran en suspensión en el aceite. Estos sólidos pueden destinarse al compostaje o alimentación animal. (Acosta, 2008)

Para el proceso de conversión, se debe determinar el contenido de ácidos grasos libres para elegir la catálisis más apropiada. Si el contenido de acidez es hasta de 1%, se puede realizar una catálisis básica pero se debe agregar mayor cantidad de catalizador. La desventaja de este procedimiento es la pérdida de materia prima, ya que no se está aprovechando. Si se tienen aceites con más del 1% de ácidos grasos libres, se debe proceder a neutralizarlos o a una esterificación ácida. La esterificación ácida, al contrario de la neutralización, permite aprovechar los ácidos grasos libres para producir biodiesel. Las desventajas que se presentan son la formación de agua y el mayor requerimiento de alcohol. Luego, se sigue con la catálisis alcalina para convertir los triglicéridos restantes a biodiesel. (Acosta, 2008; Castro, 2007)

Además, se debe determinar la humedad del aceite, ya que si tiene agua se debe secar antes de comenzar el proceso de producción en sí. La presencia de agua disminuye el rendimiento de la reacción debido a la consecuente formación de espuma. (Castro, 2007)

El proceso en sí se muestra en la Ilustración 4:

Ilustración 4. Proceso de producción de biodiesel



El proceso de conversión comienza con el calentamiento del aceite. De acuerdo a la determinación del contenido de acidez y la elección del tipo de catálisis a utilizar, se preparan y agregan el catalizador y el alcohol en las proporciones adecuadas. Se debe dejar reaccionar con agitación, manteniendo la temperatura constante. Se ha reportado que para una catálisis básica se requiere un tiempo de reacción de 1 hora a 60°C. (Castro, 2007; Miliarium, 2004)

En una catálisis ácida, la acumulación del agua puede llegar a detener la reacción antes de que se complete. Por esta razón, si se trabaja con aceites o grasas con un contenido de acidez muy alto, es necesario realizar la conversión en varias etapas para ir separando el agua conforme se vaya formando. (Castro, 2007)

Es necesaria una agitación rápida para una correcta mezcla del aceite, el catalizador y el alcohol. Hacia el fin de la reacción, la agitación debe ser menor para permitir a la glicerina separarse de la fase éster. De esta forma se han publicado resultados entre 85 y 94% de rendimiento. Sin embargo, con procesos semicontinuos se podría obtener un rendimiento superior al 95%. (Acosta, 2008)

Al finalizar la reacción, se debe dejar reposar para que se separe el biodiesel y la glicerina, por decantación, o ya sea utilizar algún otro método de separación. A partir de este proceso, se separan dos líneas: una para purificar el biodiesel y otra para recuperar y purificar la glicerina. (Acosta, 2008)

La purificación de biodiesel se lleva a cabo con una o varias etapas de lavado y otra de secado. La etapa de lavado puede llevarse a cabo por el método de burbujeo o de niebla. En ambos casos se utiliza agua pero el principio es diferente. En el método de burbujeo, se tiene agua en el fondo del tanque y se hace atravesar burbujas de agua desde el fondo a la superficie y vuelta abajo, llevando retenidas impurezas. En el método de niebla, se agrega agua y se deja reposar hasta que el agua atraviese el biodiesel, arrastrando las impurezas. En la etapa de secado, el biodiesel se calienta manteniendo una temperatura constante de 90°C, evitando llegar a temperaturas mayores a 100°C pues el biodiesel se degrada y acidifica. Mientras se va calentando, hay que purgar poco a poco el secador abriendo la válvula para eliminar el agua que se vaya acumulando en la base. (Acosta, 2008)

Luego de separar la glicerina del biodiesel formado en el reactor, se obtiene una glicerina con una pureza de 50%, la cual contiene impurezas como metanol, catalizador y jabones. La glicerina con este grado de pureza tiene poco uso, por lo que su valor de venta es prácticamente cero.

El primer paso para refinar la glicerina es agregar ácido, de esta forma se destruyen los jabones formados. Los ácidos grasos libres no son solubles en la glicerina, por lo que se forman dos capas, correspondiendo la capa superior a los ácidos grasos libres. En este punto se puede realizar una separación por decantación. Las sales formadas precipitan y se pueden obtener en el fondo del tanque. Después de este punto, se obtiene glicerina con metanol como impureza. Nuevamente el metanol se remueve por calentamiento a una temperatura aproximada de 65°C. Luego del calentamiento, se obtiene glicerina con una pureza de 85%, la cual ya puede ser vendida. (Van Gerpen & Knothe, 2005)

B. Columna de extracción líquido-líquido

1. Recuperación del disolvente. Debido a que la diferencia de puntos de ebullición entre el éter isopropílico y el ácido acético es muy grande, se puede realizar a la destilación simple a una temperatura entre los 70 °C y 75 °C. De esta manera el único compuesto que cambiará a la fase de vapor es el éter y utilizando el equipo de destilación simple unido a la columna de extracción líquido-líquido, se podrá recuperar una gran cantidad de éter isopropílico para su reutilización. Además, se logrará separar el ácido acético.

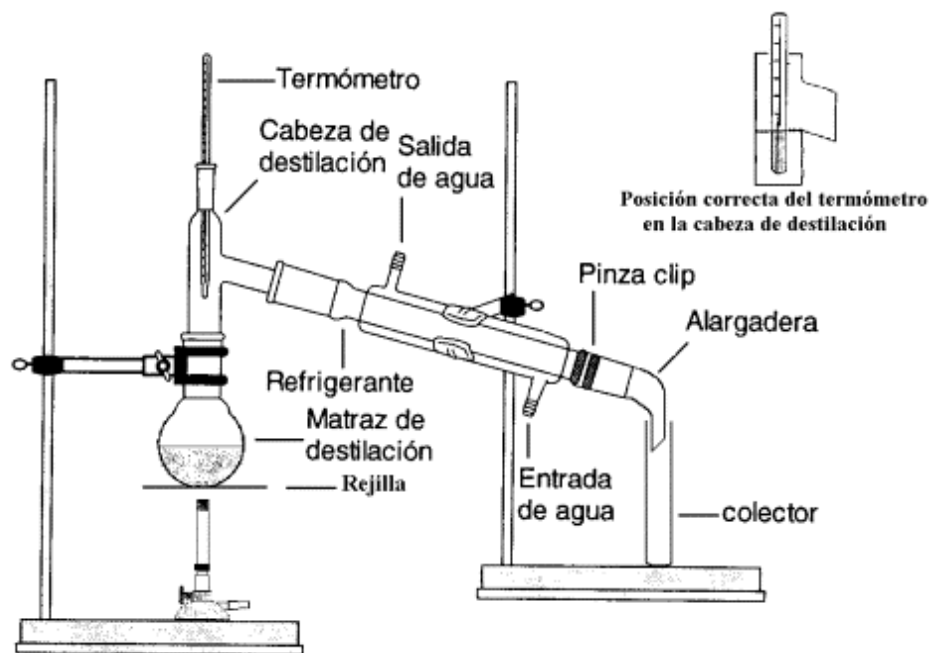
Para la comprensión de la operación de extracción líquido-líquido se debe conocer el principio de la destilación diferencial o sencilla. Este principio consiste en que si durante un número infinito de evaporaciones instantáneas sucesivas de un líquido, solo se evapora instantáneamente una porción infinitesimal del líquido cada vez, el resultado neto sería equivalente a una destilación diferencial o sencilla (Treybal, 2007).

El equipo de extracción líquido-líquido es básicamente una réplica a gran escala del matraz y refrigerante de destilación ordinario de laboratorio, como se muestra en la Ilustración 5. Un lote de líquido se carga en una caldera o destilador equipado con

algún tipo de dispositivo de calentamiento; por ejemplo, con una chaqueta de vapor. La carga se hierve lentamente y los vapores se descargan en un condensador tan pronto como se forman; aquí se licúan y el condensado (destilado) se almacena en el colector. La primera porción del destilado será la más rica en la sustancia más volátil; conforme continúa la destilación el producto evaporado se va empobreciendo. Por lo tanto, el destilado puede recolectarse en varios lotes separados, llamados “fracciones”; se obtiene así, una serie de productos destilados de diferente pureza (Treybal, 2007).

Por ejemplo, si una mezcla ternaria contiene una pequeña cantidad de una sustancia muy volátil A, una sustancia principal de volatilidad intermedia y una pequeña cantidad de C de baja volatilidad, la primera fracción, que será pequeña, contendrá la mayor parte de A. La segunda fracción contendrá la mayor parte de B razonablemente puro, aunque contaminado con A y C; el residuo que queda en la caldera será principalmente C. Aun cuando las tres fracciones contendrán las tres sustancias, se habrá logrado cierta separación (Treybal, 2007).

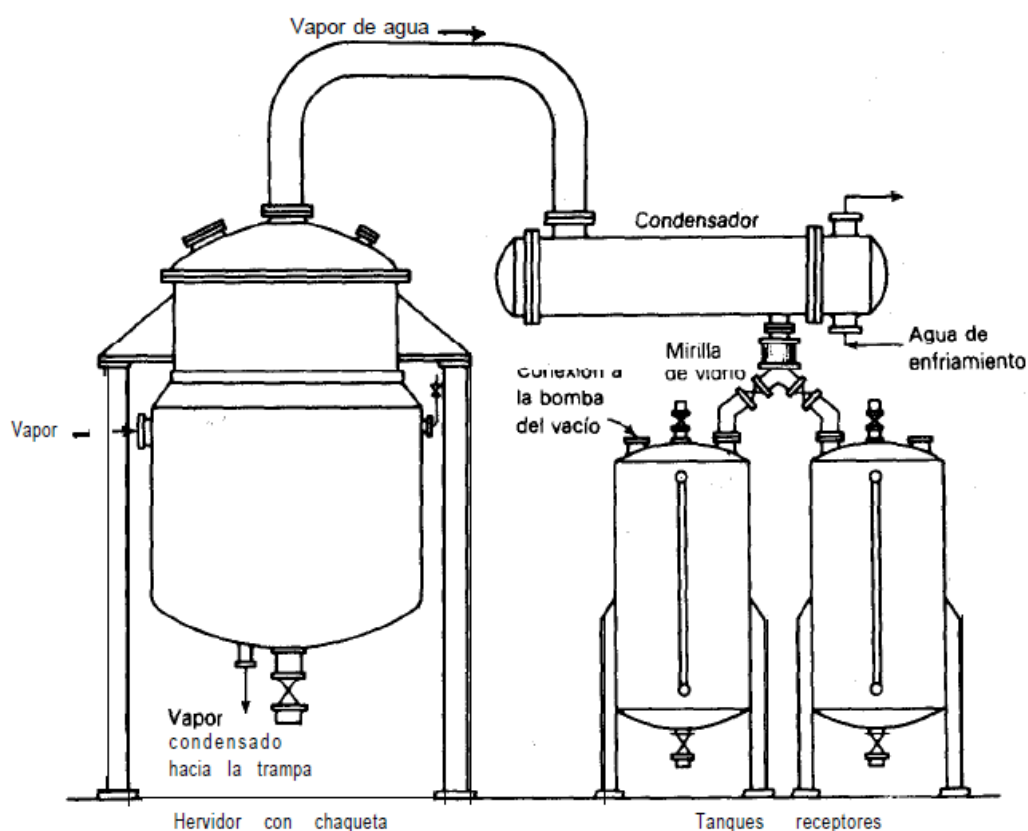
Ilustración 5. Equipo de destilación para laboratorios



(Treybal 2007)

Si con una operación de este tipo se quiere lograr obtener, aun cuando sea aproximado, las características teóricas de una destilación diferencial, se tendrá que proceder en forma infinitamente lenta, para que el vapor desprendido del líquido esté en cualquier momento en equilibrio con dicho líquido. Debe eliminarse todo arrastre y no debe existir enfriamiento ni condensación del vapor antes de que entre en el condensador. Estas condiciones son básicamente imposibles de obtener, no obstante, es útil estudiar los resultados que produce una destilación diferencial, para utilizarlos como estándar de comparación. (Treybal, 2007).

Ilustración 6. Equipo de destilación industrial por lotes



(Treybal 2007)

2. Sustancias utilizadas en la operación

a. Disolvente. Es el líquido con el cual se pone en contacto la alimentación y que realiza la extracción del compuesto deseado en la mezcla. En el proceso de extracción llevado a cabo en la Universidad del Valle de Guatemala, se utiliza el éter isopropílico como disolvente, el cual es inmisible con el agua.

Tabla 2. Propiedades físicas del éter isopropílico

Éter isopropílico	
Peso molecular	102.18 g/mol
Fórmula	$(\text{CH}_3)_2\text{CHOCH}(\text{CH}_3)_2$
Punto de ebullición	69 °C
Punto de fusión	-60 °C
Densidad de vapor (agua = 1)	3.5
Presión de vapor a 20 °C	15.9 kPa
Densidad relativa (agua = 1)	0.7

(INSHT, 1994)

Existen diversos riesgos al trabajar con esta sustancia, por lo cual es necesario tomar algunas consideraciones:

Tabla 3. Riesgos inherentes del éter isopropílico

Tipos de peligro/exposición	
Estado físico, aspecto	Líquido incoloro, con olor característico.
Peligros físicos	El vapor es más denso que el aire y puede extenderse al ras del suelo, posible ignición.
Peligros químicos	Puede formar fácilmente peróxidos explosivos si se desestabiliza y estallar por sacudidas.
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor o por ingestión.
Efectos exposición de corta duración	La sustancia puede irritar la piel, los ojos y el tracto respiratorio.

(INSHT, 1994)

b. Soluta. Es el líquido o compuesto disuelto en agua u otro líquido insoluble con el disolvente a utilizar en el proceso. El soluto que se utiliza en el proceso es el ácido acético.

Tabla 4. Propiedades físicas del ácido acético

Ácido acético	
Peso molecular	60.1 g/mol
Fórmula	CH ₃ COOH
Punto de ebullición	110 °C
Punto de fusión	16 °C
Densidad de vapor (agua = 1)	2.07
Presión de vapor a 20 °C	1.6 kPa
Densidad relativa (agua = 1)	1.05

(INSHT, 1994)

Existen diversos riesgos al trabajar con ácidos, por lo cual es necesario tomar algunas consideraciones, para evitar accidentes:

Tabla 5. Riesgos inherentes del ácido acético

Tipos de peligro/exposición	
Estado físico, aspecto	Líquido incoloro, con olor acre.
Peligros físicos	No presenta riesgos de explosión o ignición.
Peligros químicos	Reacciona violentamente con oxidantes y bases fuertes, ataca metales formando hidrógeno.
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor o por ingestión.
Efectos exposición de corta duración	Es muy corrosivo para piel, ojos y tracto respiratorio. Puede causar edema pulmonar.

(INSHT, 1994)

c. Solución. Es el líquido en el cual se disuelve el soluto, esta solución no debe ser miscible con el disolvente. En el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG, se trabaja una solución acuosa.

Tabla 6. Propiedades físicas del agua

Agua	
Peso molecular	60.1 g/mol
Fórmula	H ₂ O
Punto de ebullición	100 °C
Punto de fusión	0 °C
Densidad de vapor (agua = 1)	1
Presión de vapor a 20 °C	2.27 kPa
Densidad relativa (agua = 1)	1

(INSHT, 1994)

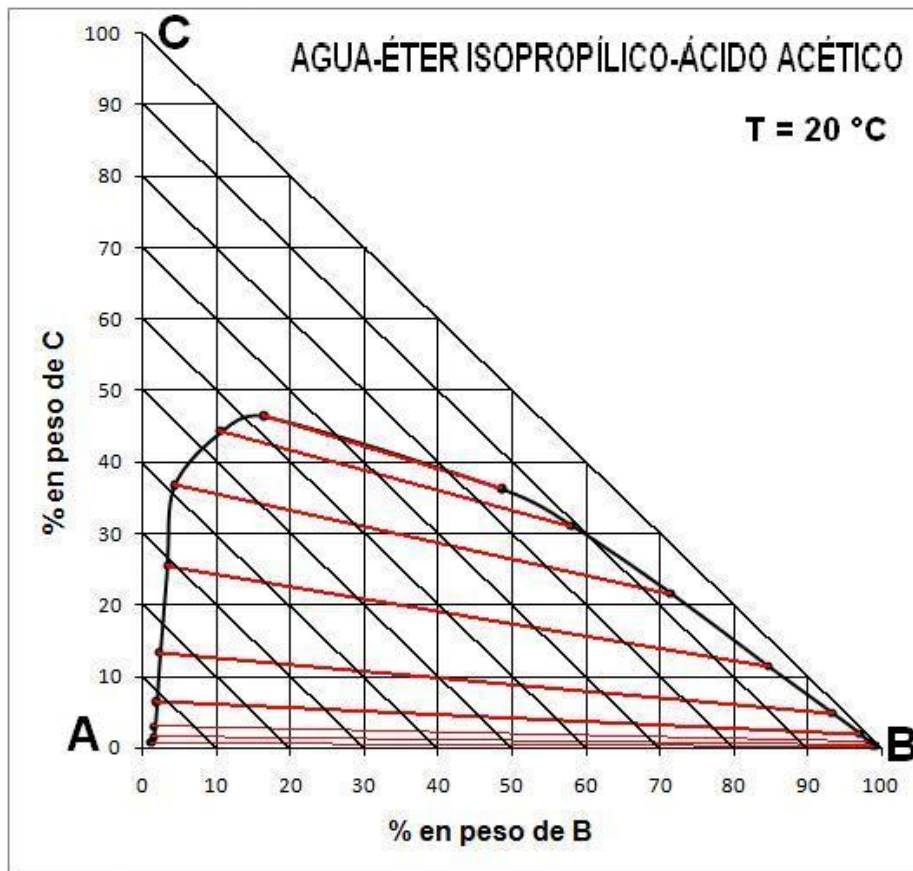
A continuación se presentan los datos del equilibrio del sistema agua – éter isopropílico – ácido acético (A-B-C) a 20°C.

Tabla 7. Datos en el equilibrio para el sistema a 20°C

Capa acuosa (A)			Capa éter isopropilico (B)		
A	B	C	A	B	C
98.1	1.2	0.69	0.5	99.3	0.18
97.1	1.5	1.41	0.7	98.9	0.37
95.5	1.6	2.89	0.8	98.4	0.79
91.7	1.9	6.42	1	97.1	1.93
84.4	2.3	13.3	1.9	93.3	4.82
71.1	3.4	25.5	3.9	84.7	11.4
58.9	4.4	36.7	6.9	71.5	21.6
45.1	10.6	44.3	10.8	58.1	31.1
37.1	16.5	46.4	15.1	48.7	36.2

(Núñez, 2008)

Ilustración 7. Equilibrio triangular para el sistema agua-éter isopropílico-ácido acético



(Núñez, 2008)

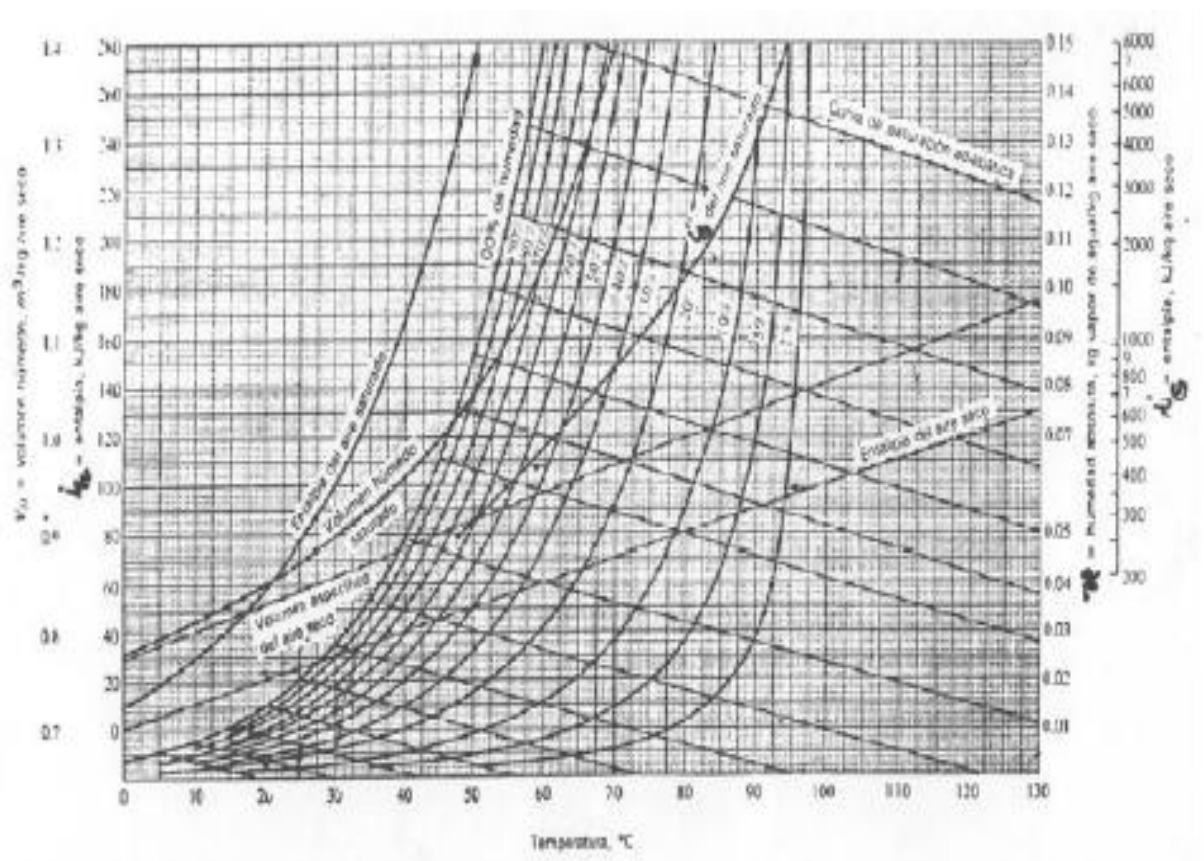
C. Torre de enfriamiento

1. Cartas psicométricas. Esta carta es un diagrama de humedad que permite lecturas directas de la mayoría de las propiedades de las mezclas agua/aire que son necesarias en los cálculos de humidificación, para una presión determinada. (Galicia, 2006)

Para la obtención de los parámetros de la mezcla agua/aire es necesario conocer por lo menos dos parámetros de la mezcla, ya que a partir de éstos es posible determinar los otros parámetros que servirán para conocer el comportamiento de la mezcla según las condiciones de operación a las que se esté trabajando. Como se puede observar en la Ilustración 8, la carta psicométrica a condiciones de operación de

1 atmósfera de presión, muestra cómo se comporta la composición agua/aire a esas condiciones.

Ilustración 8. Carta psicrométrica mezcla agua-aire a condiciones de operación estándares



A continuación se presenta una breve explicación de los parámetros que muestra este tipo de gráficos. La limitación del diagrama de humedad es la curva de saturación.

Los puntos de este diagrama son:

- Lado derecho: Mezclas de aire no saturado
- Lado izquierdo: Mezclas de aire saturado y agua líquida.
- Curva entre el eje de abscisas y la curva de saturación: Son las humedades relativas.
- Las rectas con pendiente m negativo: Temperatura de saturación adiabática.

Es necesario que para la obtención de los parámetros de la mezcla agua/aire, la carta psicrométrica se encuentre corregida a las condiciones de presión y altura del lugar donde se pondrá en funcionamiento el equipo. Para realizar la corrección de la carta psicrométrica es necesario realizar el siguiente procedimiento:

- **Obtención de la temperatura de bulbo húmedo:** Esto es una variable que no puede ser controlada por sensores, debido a que en el mercado no existen sensores que detecten temperaturas húmedas.

La ecuación usada se encuentra en función de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo para obtener la humedad relativa.

Ecuación 9

$$\%HR = 100 * \frac{(4.58 \exp(17.2964 * T_{hum} / (T_{hum} + 238.3))) - K(T_{sec} - T_{hum}) * P_{atm}}{(4.58 * \exp(17.2694 * T_{sec} / (T_{sec} + 238.3)))}$$

- **Obtención de la temperatura de bulbo húmedo de la carta psicrométrica:**

Altura Ciudad de Guatemala= 1592m sobre el nivel del mar.

Masa Mezcla Agua/Aire= 0.62069kg.

P. Atmosférica= 629.038 mmHg.

Constante= 0.000662/C

Ecuación 10

$$P_{Atm} = (760 * (1 - 0.000022184 * altura)^{5.26})$$

Ecuación 11

$$Presion T Humeda = 4.581 * \exp(17.2694 * T_{hum} / (238.3 + T_{hum}))$$

Ecuación 12

$$P_{\text{vapor}}(T_{\text{hum}}, T_{\text{sec}}) = \text{Presión } T_{\text{Humeda}} - \text{Constante}(T_{\text{sec}} - T_{\text{hum}}) * P_{\text{Atm}}$$

Ecuación 13

$$HR(\text{g / kg}) = 1000 * M_{\text{Mezcla}} * P_{\text{vapor}} / (P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}})$$

- **Obtención de la humedad relativa (g/kg):** para la obtención de este valor se realiza una variación de 0% al 100% de humedad:

Altura Ciudad de Guatemala= 1592m sobre el nivel del mar.

Masa Mezcla Agua/Aire= 0.62069kg.

P. Atmosférica= 629.038 mmHg.

Ecuación 14

$$P_{\text{Atm}} = (760 * (1 - 0.000022184 * \text{altura})^{5.26})$$

Ecuación 15

$$\text{Presión } T_{\text{Humeda}} = 4.581 * \exp(17.2694 * T_{\text{hum}} / (238.3 + T_{\text{hum}}))$$

Ecuación 16

$$HR(\text{g / kg}) = 1000 * M_{\text{Mezcla}} * (1/100 * P_{\text{Atm}} / \%HR / \text{Presión } T_{\text{Humeda}} - 1)$$

- **Obtención del volumen específico de la mezcla agua/aire a partir de la temperatura de bulbo seco y la HR.**

Presión Atmosférica: 760 mmHg

Constante R= 0.06237 m³-mmHg/C

Ecuación 17

$$HR(\text{g / kg}) = (-0.62069 + V_{\text{esp}} * 0.018 * P_{\text{Atm}} / R / (273.15 + T_{\text{Seca}})) * 1000$$

- **Obtención del punto de rocío de la mezcla agua/aire.**

Ecuación 18

$$P_{resion T Rocio} = 4.581 * \exp(17.2694 * T Rocio / (238.3 + T Rocio))$$

Ecuación 19

$$HR(g / kg) = 1000 * M Mezcla / (-1 + P_{Atm} / P_{Rocio})$$

- **Obtención de la entalpía a partir de la T. bulbo seco y la HR.**

Ecuación 20

$$HR = 1000 * (Entalpia - 1.022 * T.Seca) / (2445 + 2.006 * T.Seca)$$

- **Obtención de la nueva carta psicométrica a las condiciones de operación.** La carta psicométrica se obtiene realizando una gráfica en la que se relacionan todas las variables mencionadas en las secciones anteriores.

2. Medición de temperatura

a. Termocoplas. Las termocoplas son bastante sensibles al ambiente de trabajo y se degradan con el tiempo, pero si se utiliza una protección, pierde la efectividad de hacer mediciones instantáneas. Las termocoplas se manejan en temperaturas de rangos altos que varían de acuerdo a las combinaciones de metales utilizadas, como por ejemplo el chromel-constantán que tiene un rango de -200°C a 2315°C. Además tienen una sensibilidad desde 10µ V/°C hasta 68µ V/°C y una inexactitud que varía de 0.5% a 0.75%, dependiendo del material. En la Ilustración 9 se muestran los parámetros más importantes para diferentes tipos de termocopla. (Morris, 2005)

El problema que surge con utilizar termocoplas es que el voltaje de salida es bastante pequeño, como el caso de una termocopla tipo J que su salida es hasta un máximo de 70mV, como se muestra en la Ilustración 10. Este tipo de voltaje se puede confundir con los voltajes parásitos que se obtienen por colocar la punta del instrumento

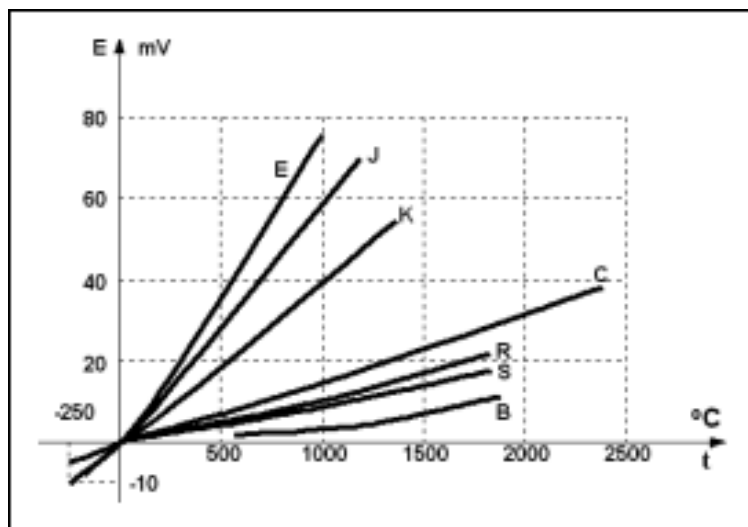
transductor en contacto con el fluido a medir, por lo que se debe considerar esta fuente de error y compensar el voltaje obtenido para conseguir la temperatura correcta.

Ilustración 9. Tabla de información de termocoplas de diferentes materiales

Tipo de termocopla	Materiales usados	Rango de aplicación	Sensibilidad	Rango de voltaje
B	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	2500 -3100F 1370-1700C	10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	1.792- 13.82 mV
C	W5Re Tungsteno 5% Renio(+) W26Re Tungsteno 26% Renio(-)	3000-4200F 1650-2315C	10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 - 37.08 mV
E	Chromel (+) Constantan (-)	200-1650F 95-900C	68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-9.72- 76.37 mV
J	Hierro (+) Constantan (-)	200-1400F 95-760C	52 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-8.09- 69.55 mV
K	Chromel (+) Alumel (-)	200-2300F 95-1260C	41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-5.89- 54.89 mV
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	1200-2300F 650-1260C	39 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-3.99- 47.51 mV
R	Platino13% Rodio(+) Platino (-)	1600-2640F 870-1450C	10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-0.10- 21.09 mV
S	Platino 10% Rhodio (+) Platino (-)	1800-2640F 980-1450C	10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-0.10- 18.68 mV
T	Cobre (+) Constantan (-)	-330-660F -200-350C	43 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-6.18- 20.87 mV

(Insterv, 2009)

Ilustración 10 . Gráfica donde se muestran las curvas de varios tipos de termocopla



(Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2009)

Otro problema de las termocoplas es que la curva de temperatura vs voltaje no es completamente lineal. Por lo tanto, para cambios de temperatura altos, no se puede realizar una aproximación lineal, sino que se requiere de ecuaciones de mayor grado para encontrar la solución exacta.

b. Dispositivos resistivos. Los dispositivos resistivos para la medición de temperatura son los RTD (Resistive Temperature Devices) y los termistores. Estos dispositivos requieren de una fuente de voltaje alimentada para obtener un voltaje de salida con el cual se calcula el valor de la resistencia del dispositivo y se proporciona la medición de temperatura. El problema con el uso de éstos, es que no puede usarse una fuente de voltaje alta ya que, a pesar de que se trabaja mejor con voltajes altos, esto hace que fluya más corriente a través del termistor y se caliente, afectando la resistencia y, por lo tanto, la medición de temperatura. (Morris, 2005)

Los RTDs (Resistive Temperature Devices) se crean con una película delgada de un metal en un diseño específico que se coloca en un sustrato. Al sufrir un cambio de temperatura, su resistencia eléctrica varía un valor aproximado de $0.3\%/^{\circ}\text{C}$.

El RTD se crea mayormente con platino, ya que es un material resistente a la corrosión y se mantiene estable a un rango de temperatura alta. Este material puede

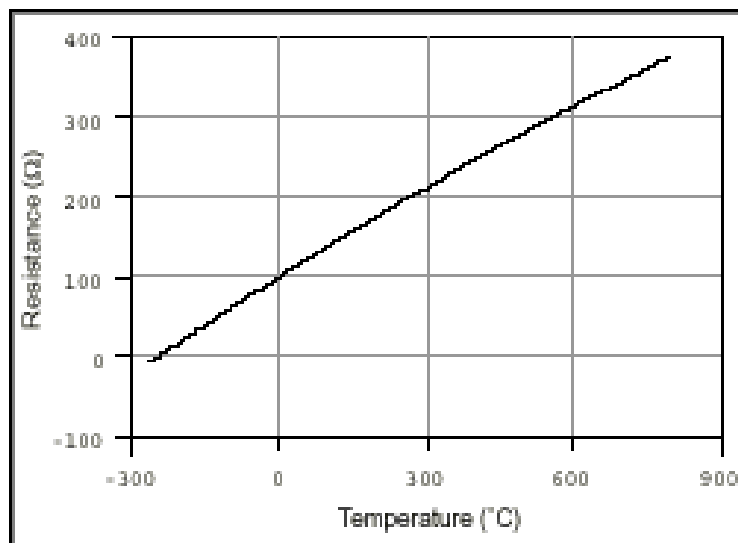
usarse para hacer mediciones entre los 13.8033 K y los 961.78 K. El rango es mucho menor que el de las termocoplas pero provee un cambio de temperatura casi lineal en este rango. Los cambios pequeños de temperatura de este dispositivo se comportan de manera más continua que en una termocopla, ya que la resolución es más grande para el rango que se trabaja. En la Tabla 8 se mencionan los rangos de temperatura de diferentes materiales usados en RTDs.

Tabla 8. Rangos de operación de RTDs de diferentes materiales

Material	Rango
Platino	-270°C a 1000°C
Cobre	-200°C a 260°C
Níquel	-200°C a 430°C
Tungsteno	-270°C a 1100°C

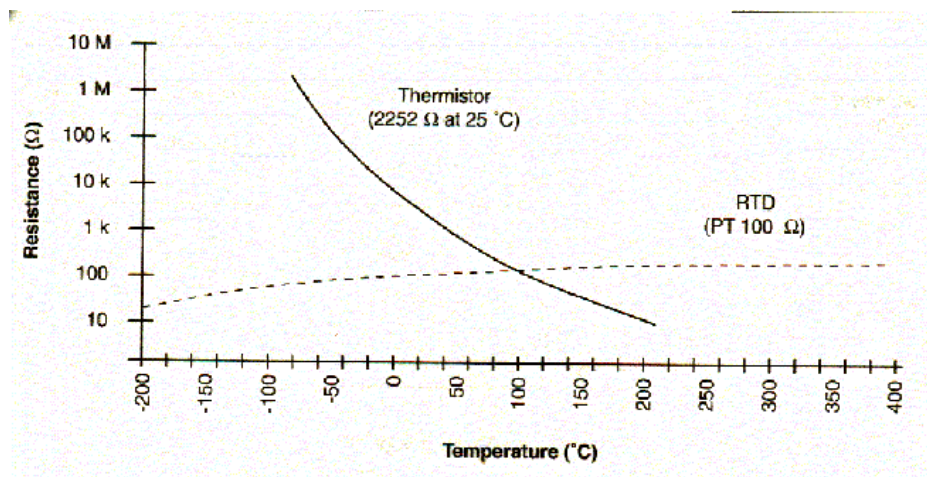
Una desventaja que tienen los RTD es que no se puede utilizar para aplicaciones donde se requieren temperaturas altas, ya que el rango de este material no alcanza para cubrir esos valores. Además el rango de resistencia no es tan alto, ya que varía solamente de 0Ω hasta aproximadamente 400Ω, como se muestra en la siguiente gráfica.

Ilustración 11. Gráfica de la variación de temperatura de un RTD de platino



(Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2009)

Ilustración 12. Gráfica de la variación de un termistor con un NTC contra un RTD



(Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2009)

El problema de un termistor es que no se comporta de manera lineal como el RTD sino que su comportamiento es exponencial. El comportamiento se da como:

$$R_T = R_{T0} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \text{ donde } \beta = \frac{\ln \left(\frac{R_{T1}}{R_{T0}} \right)}{\left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T0} \right)}$$

Pero, si se conoce el valor de resistencia, la temperatura se puede calcular como sigue:

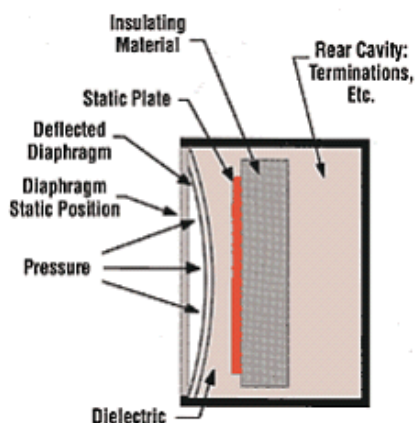
$$T = \frac{1}{\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{R_T}{R_{T0}} \right) + \frac{1}{T_0}}$$

Los termistores presentan respuestas más rápidas que los RTDs y son dispositivos que tienen una mayor resistencia y sensibilidad. El rango de temperaturas que estos pueden utilizar es mucho menor que la de los RTDs, con un alcance desde -80°C hasta 300°C. (Morris, 2005)

3. Medición de presión

a. Sensor de presión capacitivo. Funciona al realizar una medición de capacitancia entre una placa de metal y un diafragma que tiene una presión aplicada. Esto produce un cambio de la distancia entre el metal y el diafragma, lo cual cambia el valor de capacitancia, proporcionando el valor de presión absoluta. La Ilustración 13 muestra un sensor de presión capacitivo y las partes del mismo.

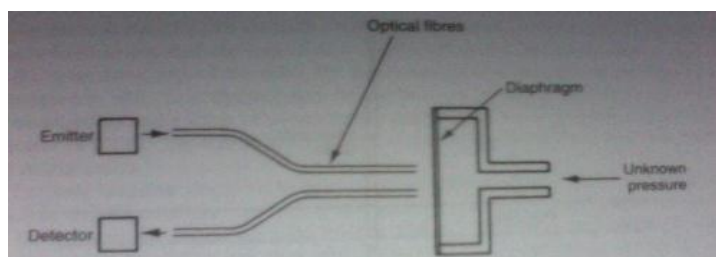
Ilustración 13. Diagrama de un sensor de presión capacitivo



(NI, 2009)

b. Sensores de presión por fibra óptica. Se tiene un emisor y un receptor de una señal por fibra óptica y un diafragma al que se le aplica una presión para hacer variar su desplazamiento. La señal que se emite es rebotada en el diafragma y entra a la fibra óptica del receptor, lo cual permite saber la presión dependiendo de la cantidad de luz que entra. El uso de este tipo de sensores se debe a que son inmunes al ruido electromagnético, pero tienen un gran problema de exactitud y además es costoso. Se puede observar un sensor de presión por fibra óptica en la Ilustración 14.

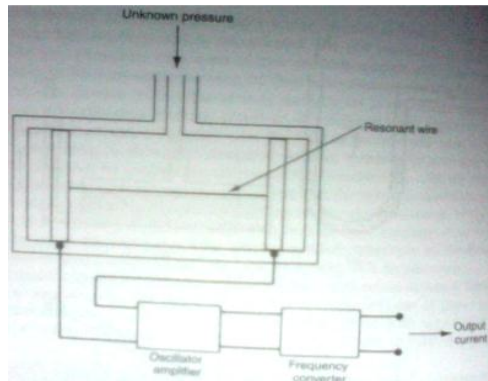
Ilustración 14: Ejemplo de un sensor de fibra óptica para presión



(Morris, 2005)

c. Dispositivos de alambre resonante. Son instrumentos que constan de un material que vibra a su frecuencia natural y está sujeto a un campo magnético. Esta frecuencia varía de acuerdo a la presión aplicada al alambre por una abertura en la parte superior del dispositivo. Puede medir variaciones de presión entre los rangos de 5mbar y 2bar, y producen una inexactitud de 0.2%. En la Ilustración 15 se muestra un dispositivo de alambre resonante.

Ilustración 15. Ejemplo de un dispositivo de alambre resonante



(Morris, 2005)

El uso de sensores de presión varía según la aplicación. En donde se requiere de una salida digital se opta por usar sensores con diafragmas o el tubo de Bourdon. Los instrumentos que mayor precisión dan son los dispositivos de alambre resonante.

4. Medición de flujo. Se puede medir un flujo por medio de una proporción de flujo de masa o por una proporción de flujo de volumen.

a. Flujo másico. Este tipo de medición se puede realizar con diferentes métodos dependiendo del estado del material usado. El primer método es por cinta transportadora. Se utiliza en el flujo de un material sólido que se encuentre en partículas pequeñas. Este flujo se puede medir con la siguiente ecuación:

Ecuación 21

$$Q = Mv/L$$

Donde Q es el flujo másico, M es la masa del material distribuido en un largo L con una velocidad de transportación v.

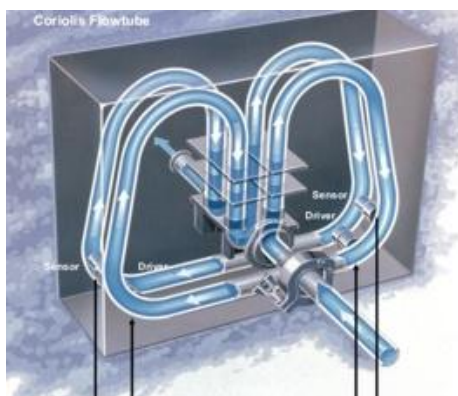
El segundo método es el caudalímetro de Coriolis. Éste se aplica para líquidos y en algunos casos para gases. Consiste en dos tubos paralelos, o un solo tubo con dos secciones en paralelo, que tienen en el centro de ambos un dispositivo electromecánico que hace vibrar a los dos tubos en su frecuencia de resonancia. Con esto se obtiene un movimiento en sentido ortogonal al flujo. Esto genera una deflexión entre ambos tubos que puede ser calculada por un sensor y, así, obtener el valor del flujo másico.

Ecuación 22

$$d = kfR$$

Donde d = deflexión de los tubos, k es una constante, f es la frecuencia de resonancia y R es el flujo másico. Estos instrumentos proporcionan una incertidumbre de hasta 0.2%, por lo que se consideran instrumentos bastante exactos. Se muestra un caudalímetro de Coriolis en la Ilustración 16.

Ilustración 16: Caudalímetro de Coriolis



(Ox.ac.uk, 2009)

El último método es el de flujo másico termal. Esto se utiliza para la medición de flujo de gases. Se basa en hacer fluir un gas por medio de un elemento caliente. Se puede calcular el flujo por medio del incremento de temperatura en el gas o en la energía requerida para que el calentador mantenga una temperatura constante en el gas. Tienen una incertidumbre de 2%.

b. Flujo de volumen. Existen diferentes métodos para calcular el flujo volumétrico de materiales líquidos, gaseosos o semilíquidos. El primer método es el medidor de

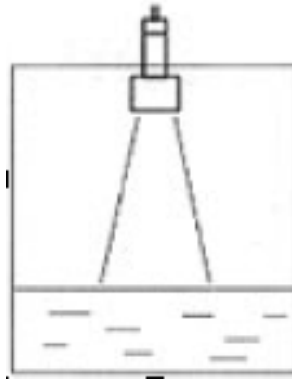
presión diferencial por obstrucción. La obstrucción incrementa la velocidad y, por lo tanto, disminuye la presión. La pérdida de presión se determina midiendo la presión del líquido o del gas, antes e inmediatamente después de la obstrucción. El problema con este método es que se produce una pérdida de presión en el flujo y en algunos casos es necesario colocar una bomba para generar presión adicional, para compensar y satisfacer los requerimientos de flujo del proceso.

Otro método usado son los rotámetros, que consisten en un cono hueco invertido, con un objeto flotante moviéndose dentro de éste, el cual sirve como indicador. El fluido ejerce una fuerza sobre el objeto flotante, que al equilibrarse con el peso del objeto, hace que éste se mantenga estático. El cono debe estar graduado y la posición del objeto flotante proporciona la lectura del flujo.

El caudalímetro ultrasónico es un sistema de sensores ultrasónicos que se instalan en la parte exterior de la tubería que se está examinando. Esto permite calcular el flujo de volumen de una manera no invasiva. Además, debido a que se coloca externamente, se reduce el costo de tener que perforar tuberías para colocar sensores y se previene la contaminación del material o riesgos de salud para las personas que instalen el sensor.

c. Medición de nivel. Uno de los instrumentos de medición de nivel más utilizados es el ultrasónico. Con este tipo de instrumento no hay contacto entre el sensor y el líquido usado. Consiste en un emisor, que es colocado en la parte superior del tanque, y un receptor, que puede ser colocado a un lado del emisor o en la parte inferior del tanque. La distancia del líquido se puede obtener midiendo la velocidad que tardó el receptor en recibir la señal inicial y restar esta distancia de la altura del tanque.

Un sensor de nivel ultrasónico se usa para hacer mediciones de líquidos o sólidos sin entrar en contacto con el mismo. Estos emiten una frecuencia alta desde valores de 20kHz hasta 200kHz, que al entrar en contacto con la sustancia a medir, son reflejados y detectados por un transductor del sensor. En la siguiente figura se muestra un sensor de nivel ultrasónico.

Ilustración 17. Sensor de nivel de tipo ultrasónico colocado en un tanque

(Migatron Corp., 2009)

Este instrumento depende de la velocidad de transmisión por el medio (en este caso el aire), por lo que se ve afectado por la temperatura, la humedad, la presión del aire, vapor, espuma y otros factores, por lo que es necesario que se calibre de acuerdo al ambiente en el cual será utilizado. La colocación de los sensores se debe hacer en un lugar donde no haya obstáculos que impidan que la señal llegue hasta el líquido, para no tener mediciones falsas.

Estos sensores pueden operar en dos modos diferentes, según la aplicación deseada. Se puede usar el sensor para una aplicación de nivel puntual, donde el único punto de medición deseado será el máximo o mínimo del tanque, para apagar o encender válvulas de flujo. La otra operación es de nivel continuo, donde se mide constantemente el nivel para contar con mediciones actualizadas en todo momento y en todo el rango de altura del tanque.

La mayoría de los sensores ultrasónicos pueden ajustar la distancia entre el máximo y mínimo deseado. El sensor se encarga de enviar y recibir la señal varias veces para tomar un promedio de las mediciones, el cual asume como el valor verdadero. El valor decimal es convertido en una señal analógica que varía de 4mA a 20mA, los cuales corresponden a las distancias mínimas y máximas, respectivamente, configuradas en el sensor.

D. Lenguaje de programación

Los controladores programables pueden ser adaptados a gran cantidad de aplicaciones muy dispares entre sí gracias a su programabilidad, lo cual constituye probablemente la mayor virtud de estos equipos. Gracias a esta virtud, también es posible efectuar modificaciones en el programa de un controlador ya instalado, para agregar nuevos elementos en la máquina o proceso automatizado. (Bozuto)

Los pasos elementales a seguir son los siguientes:

- **Comprensión del proceso o máquina a controlar:** es fundamental en este paso el trabajo conjunto del programador con un conocedor del proceso o máquina. De acuerdo al tipo de aplicación es conveniente elaborar, en esta etapa, un diagrama de flujo o descripción del funcionamiento. (Bozuto)
- **Selección del controlador programable adecuado:** como primera medida deben determinarse la cantidad y tipo de entradas y salidas necesarias en función de los elementos de campo disponibles. Las entradas deberán ser adecuadas al tipo de sensores, velocidad, resolución, etc. Las salidas se seleccionarán en función de la corriente y tensión a manejar y de la frecuencia de actuación. La determinación de la cantidad de memoria que necesitará el programa es bastante difícil de determinar a pesar de contar con algunas ecuaciones que aparecen en los libros, aquí es importante una consulta con el proveedor del equipo o un programador experto. (Bozuto)
- **Asignación de entradas y salidas:** una vez seleccionado el equipo pueden desarrollarse dos tareas paralelas: la instalación eléctrica y la programación. Mientras el electricista lo instala, el programador va elaborando el programa en su escritorio o en su PC. Pero, a esta altura, es imprescindible que el cableado de entradas y salidas coincida con el programa. La asignación de entradas y salidas consiste exactamente en definir en qué borne de cada módulo irá conectado cada elemento de campo. (Bozuto)
- **Elaboración del programa:** en esta etapa se elaboran tanto la parte secuencial como los algoritmos de control. En esta etapa es muy difícil poder simular el funcionamiento del programa para que, al ponerlo en marcha, sufra la menor cantidad de ajustes. Los paquetes de software permiten chequeos de sintaxis,

verificación de elementos repetidos no deseados, etc. Pero para una simulación de funcionamiento deberían tener capacidad de emular el proceso a controlar. (Bozuto)

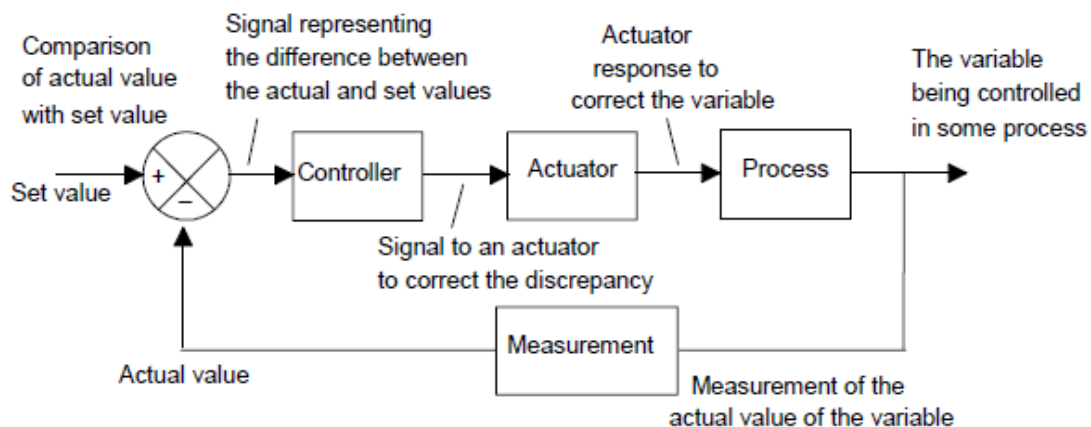
- Documentación provisoria: esta documentación consiste en la impresión de listados o diagramas desde la PC o simplemente contar con los diagramas obtenidos en la PC. Durante la programación es muy importante llevar un registro actualizado de los elementos internos que se van utilizando en el programa. Cuando el programa está listo como para ser almacenado en el controlador, es conveniente efectuar una documentación provisoria que ayudará en la puesta en marcha. (Bozuto)
- Puesta en marcha: el programa se carga en la memoria del equipo para efectuar un “ensayo general”, la forma de cargar el programa en la memoria dependerá de los medios disponibles. Se pueden realizar pruebas de campo o simulando las entradas para luego realizar la puesta en marcha real, con la máquina funcionando a pleno. (Bozuto)
- Documentación final: una vez que el programa ha sido puesto en marcha se debe realizar la documentación final del programa, que incluye las modificaciones realizadas durante la puesta en marcha. (Bozuto)

1. Lazos de control. Es posible controlar la temperatura en una habitación controlando el encendido y apagado del calentador eléctrico. El calentador calentará la habitación hasta una temperatura adecuada sin tomar en cuenta la tasa a la cual se calienta el ambiente y la tasa a la cual el calor se pierde. Éste es un ejemplo de un lazo de control abierto en el que no hay retroalimentación hacia el calentador para que se modifique la tasa a la cual se debería calentar la habitación. (Bozuto).

El lazo de control cerrado de una variable, ej. el control de la temperatura en una habitación, se logra comparando el valor actual de la variable con el valor deseado de la misma y así determinar si es necesario encender o apagar el calentador eléctrico. En la Ilustración 18 se representa este sistema por medio de bloques. (Bozuto)

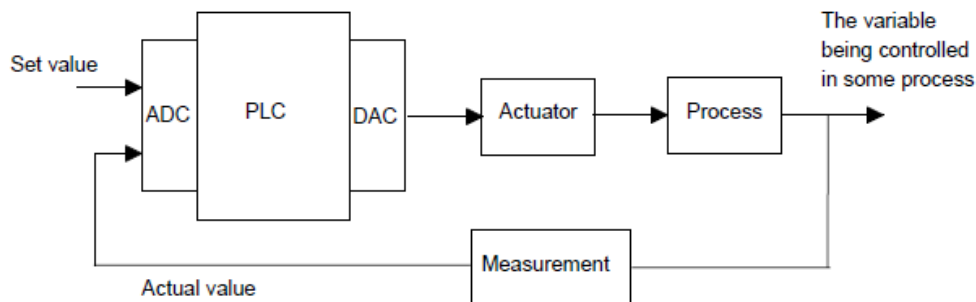
El valor actual de la variable de interés es comparado con un valor preestablecido, obteniendo así una señal que representa la diferencia o el error obtenido. El controlador recibe esta señal y entrega una orden a un actuador para responder correctamente a la discrepancia. Este sistema se denomina lazo de control cerrado. (Bozuto)

Ilustración 18. Lazo de control cerrado



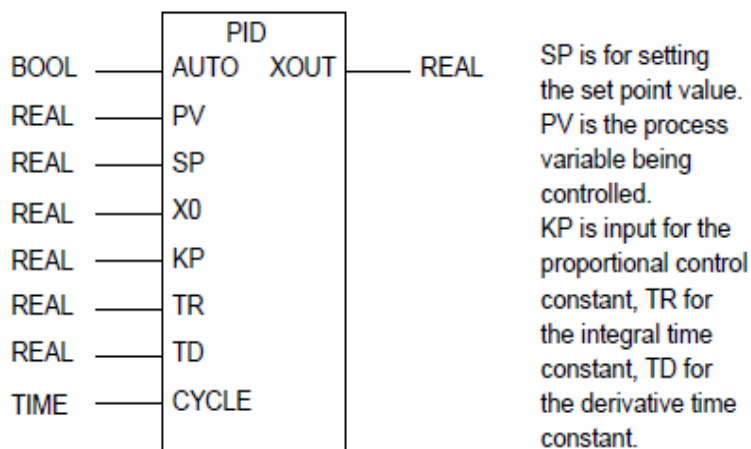
La Ilustración 19 muestra un arreglo que podría ser utilizado con un PLC para la aplicación de un lazo de control cerrado. Se asume que tanto el actuador como los valores medidos son analógicos y, por lo tanto, se requiere una conversión analógica a digital. (Bozuto)

Ilustración 19. Lazo cerrado utilizando un PLC



2. Control PID con un PLC. Varios PLC proveen los cálculos del PID para determinar la salida del controlador como una rutina estándar. Lo único que debe definir el usuario por medio del programa son los valores de las constantes K_p , K_i y K_d , y la ubicación de las señales de entrada y salida. En la Ilustración 20 se muestra el símbolo estándar IEC 1131-3 para el bloque de función de un PID. Cuando se trabaja en “AUTO”, el bloque de función calcula la salida, “XOUT”, necesaria para corregir el error obtenido. (Bozuto)

Ilustración 20. IEC 1131-3 símbolo estándar



REAL are real numbers, i.e. analogue values.
 BOOL are Boolean and so just on-off signals.

3. Comunicación del PLC con HMI. La comunicación del PLC con la PC que contiene el HMI se realiza por medio serial. Esta comunicación puede ser directa, lo que implica que no se necesitaría de un módem. Dependiendo el modelo del PLC, éstas pueden ser RS232, Profibus, Ethernet, etc. (Bozuto)

4. Diseño de HMI para el proceso producción de biodiesel. Para diseñar un HMI de un proceso, se utilizan las imágenes que ya contiene el programa a utilizar. Las imágenes que se escogen deben ser representativas de los sensores y actuadores que se tienen en el sistema real. Al finalizar el HMI, se debe contar con una representación digital del sistema completo. (Bozuto)

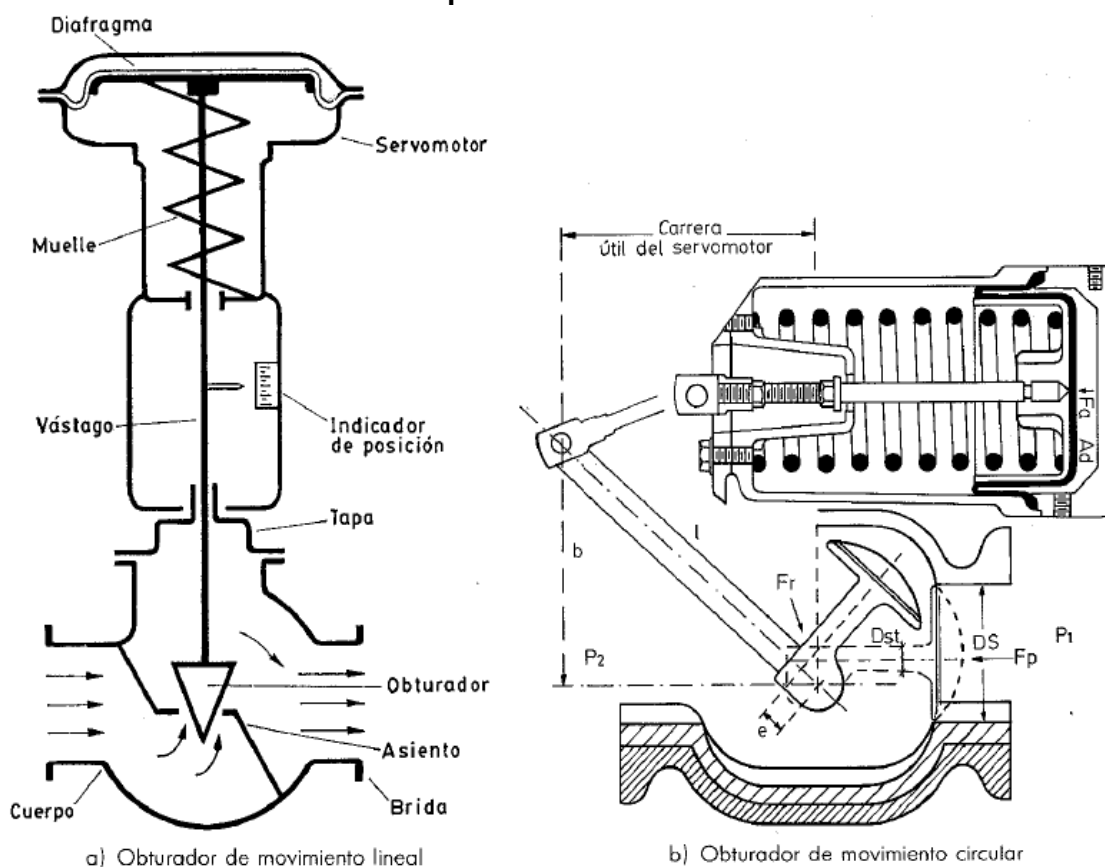
5. Comunicación del HMI con el PLC

a. Actuadores. Se denominan actuadores a aquellos elementos que pueden provocar un efecto sobre un proceso automatizado. Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y emite una salida necesaria para activar a un elemento final de control, como las válvulas. (Creus Solé, 2006)

b. Válvulas de control. En el control automático de los procesos industriales, la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la

función de variar el caudal del fluido que modifica a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control, también tiene importancia el transmisor y el controlador. En la Ilustración 21 puede verse una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor. (Creus Solé, 2006)

Ilustración 21. Representación de válvula de control



c. Bombas dosificadoras. Son accionadas por actuadores neumáticos o electrónicos y son utilizadas principalmente en el envío de cantidades precisas de líquidos para mezclas, en casos tales como el control de pH, tratamiento de aguas, adición de productos en la industria alimenticia, etc.; aplicaciones que se caracterizan por bajos caudales, altas presiones, altas viscosidades, etc. (Creus Solé, 2006)

d. Operación de motores. Todos los motores son accionados por medio del PLC, el cual envía la señal de operación al dispositivo que se encarga de la activación del motor. El mecanismo que recibe la señal del PLC y se encarga de cerrar o abrir el

circuito de alimentación, se denomina contactor. El funcionamiento del contactor se detalla en la sección de potencia. (Campero, 1995)

Los motores tipo jaula de ardilla o de inducción (que son los que se encuentran comúnmente en las instalaciones) son motores eléctricos asíncronos, es decir, su velocidad varía con la aplicación de carga y es siempre menor a la de sincronismo. La característica que les da este nombre es el tipo de devanado del rotor formado por barras conductoras interconectadas con anillos (en cortocircuito), cuyo diseño es muy parecido a una jaula de ardilla. Estos motores son económicos, pero tienen la desventaja de requerir una corriente muy alta en el momento del arranque (6 ó 7 veces la de plena carga o nominal). (Campero, 1995)

e. Operación de válvulas solenoides. Todas las válvulas son accionados por medio del PLC. El PLC se encarga únicamente de enviar la señal de operación al dispositivo que se encarga de la activación de la válvula. El mecanismo que recibe la señal del PLC y se encarga de cerrar o abrir el circuito de alimentación se denomina relé. El funcionamiento del relé se detalla en la sección de potencia. (Creus Solé, 2006)

f. Sensores. Para la automatización de la planta de producción de biodiesel son necesarios sensores de nivel continuo y puntual, sensores de temperatura y de presión. Los sensores utilizados tienen una transmisión 4-20mA, que es la forma comúnmente utilizada para transmitir la información obtenida de sensores. La intensidad de la señal es proporcional al valor medido por el sensor. Se utiliza como valor mínimo 4mA puesto que este valor indica que la comunicación entre el sensor y el analizador no ha sido interrumpida, mientras que si se utilizaran 0mA habría lugar a la duda. (Campero, 1995)

1) Medidores de nivel continuo y puntual: Instrumentos basados en características eléctricas del fluido. El medidor de nivel conductivo o resistivo consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, de modo que el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre, por ejemplo, en el nivel de agua de una caldera de vapor. La impedancia mínima es del orden de los 20 M Ω /cm y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas

por causa de la electrólisis. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2 mA; el relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea. O bien, en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavado eléctricamente en el circuito. (Creus Solé, 2006)

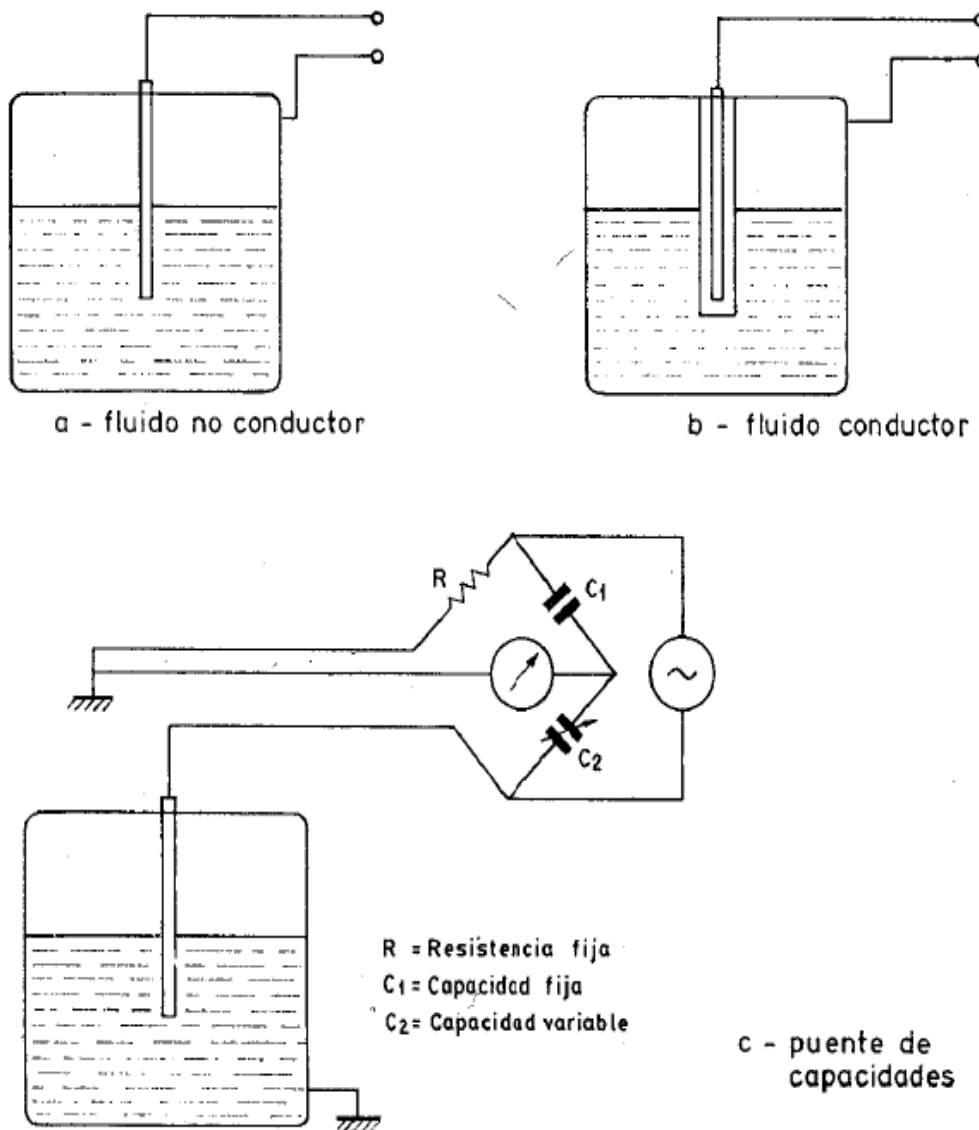
El medidor de capacidad mide la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido.

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores. En fluidos conductores, con una conductividad mínima de 100 microhmios/c.c., el electrodo está aislado usualmente con teflón, interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas. (Creus Solé, 2006)

El circuito electrónico alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, lo cual disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y permite aliviar en parte el inconveniente del posible recubrimiento del electrodo por el producto. (Creus Solé, 2006)

Estos sensores se caracterizan porque no tienen partes móviles, son ligeros, presentan una buena resistencia a la corrosión y son de fácil limpieza. Su campo de medida es prácticamente ilimitado y pueden emplearse en la medida de nivel de interfaces. Tienen el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas (0.1% de aumento de la constante dieléctrica/°C) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido pueden adherirse al electrodo variando su capacidad y falseando la lectura, en particular en el caso de líquidos conductores.

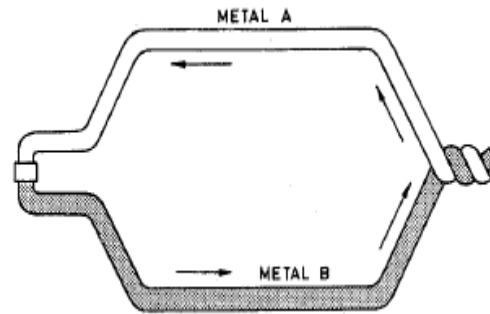
Ilustración 22. Medidores de capacidades en fluidos conductores. A) Fluido no conductor. B) Fluido conductor. C) Puente de capacidades



El funcionamiento del sistema a una frecuencia elevada, o bien la incorporación de un circuito detector de fase, compensa en parte este inconveniente. (Creus Solé, 2006)

2) Medidores de temperatura: Termopares. Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales: (Creus Solé, 2006)

Ilustración 23. Termopar



- Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor. (Creus Solé, 2006)
- Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B. (Creus Solé, 2006)
- Ley de las temperaturas sucesivas. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas T_1 y T_3 es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a T_1 y T_2 y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas T_2 y T_3 . (Creus Solé, 2006)

Por estas leyes se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperatura con la unión de referencia. (Creus Solé, 2006)

3) Medidas de presión: Unidades y clases de presión. El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abraza desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: mecánicos, neumáticos, electromecánicos y electrónicos. (Creus Solé, 2006)

Entre los mecánicos está la categoría de los elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen. Los elementos primarios

elásticos más empleados son: el tubo Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle. (Creus Solé, 2006)

El diafragma consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El sistema se proyecta de tal modo que, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento. El material del diafragma es normalmente aleación de níquel o inconel x. Se utiliza para pequeñas presiones. (Creus Solé, 2006)

g. Módulo de potencia. Es indispensable suministrar la potencia requerida del sistema y, para determinarla, se debe realizar la sumatoria de la potencia que requiere cada elemento que compone el sistema. (Campero, 1995)

1) Tableros. El Tablero es un elemento auxiliar para lograr una instalación segura, confiable y ordenada. (Campero, 1995)

2) Tierra o neutro en una instalación eléctrica.

- Tierra: Desde el punto de vista eléctrico, se considera que el globo terráqueo tiene un potencial de cero; se utiliza como referencia y como sumidero de corrientes indeseables. Sin embargo, puede suceder que por causas naturales o artificiales una zona terrestre tenga, en forma temporal, una carga eléctrica negativa o positiva con respecto a otra zona. Por esta razón pueden aparecer corrientes en conductores cuyos extremos estén en contacto con zonas de potenciales distintos. (Campero, 1995)
- Neutro del generador: Se le llama así al punto que sirve de referencia para los voltajes generados en cada fase. En sistemas equilibrados y bajo circunstancias de operación normal, la diferencia de potencial entre el neutro del generador y la tierra física del lugar donde está instalado, es cero. (Campero, 1995)

3) Corrientes en motores trifásicos. El cálculo de la corriente en un alimentador de un motor trifásico (o cualquier otra carga equilibrada entre las tres fases) se realiza con la expresión siguiente: (Campero, 1995)

Ecuación 23

$$I = \frac{P_W}{\sqrt{3} * V * \eta * \cos\phi}$$

Donde:

I = Corriente que circula por cada una de las fases que alimentan al motor, en amperes (A).

P = Potencia del motor en la flecha, en watts o HP.

η = Eficiencia del motor, en por unidad (menor que la unidad).

$\cos\phi$ = Factor de potencia

Los valores de eficiencia y factor de potencia dependen del tamaño del motor de inducción; deben ser proporcionados por el fabricante y normalmente aparecen en la placa de especificaciones. (Campero, 1995)

4) Corrientes de motores monofásicos. Para el cálculo de la corriente de un alimentador para un motor monofásico se utiliza la siguiente expresión:

Ecuación 24

$$I = \frac{P_W}{V * \eta * \cos\phi}$$

Donde:

P = Potencia del motor en la flecha, en watts o HP.

I = Corriente en el alimentador, en amperes (A).

V = Voltaje aplicado al motor entre los conductores de alimentación, en volts (V). Puede ser entre fase y neutro, entre dos fases o cualquier derivación de un transformador que forma un circuito cerrado.

η = Eficiencia del motor, en por unidad.

$\cos\phi$ = Factor de potencia.

h. Dispositivos de protección. Un dispositivo de protección, en su sentido más amplio, es aquel que al presentarse una falla abre el circuito eléctrico. Para lograr esto

se requiere desempeñar dos funciones: detectar la falla y ejecutar la interrupción. (Campero, 1995)

El interruptor termomagnético es un dispositivo de protección que se utiliza se utiliza con mucha frecuencia debido a que es un dispositivo de construcción compacta que puede realizar funciones de conexión o desconexión, protección contra cortocircuito y contra sobrecarga en instalaciones de baja tensión (hasta 600 V). (Campero, 1995)

La protección contra sobrecarga está constituida por una barra bimetálica que, dependiendo del valor que tenga la corriente, así como del tiempo que se mantenga, provoca el disparo que abre los contactos. Esta misma barra está colocada a cierta distancia de una pieza ferromagnética. Cuando la corriente se eleva a valores muy altos (cortocircuito) se crean fuerzas electromagnéticas de atracción capaces de provocar que los contactos se abran un tiempo muy corto. De esta manera se logra la protección contra cortocircuito. Estos interruptores tienen una calibración que en algunos casos solo el fabricante puede modificar. (Campero, 1995)

El interruptor termomagnético no se utiliza como protección de sobrecarga en motores de inducción jaula de ardilla debido a que la constante termina de su elemento es relativamente pequeña y puede dispararse con la corriente de arranque de un motor. Además, la calibración de los interruptores termomagnéticos no cubre toda la escala de corrientes de los diferentes tamaños de motores. (Campero, 1995)

i. Alimentación de motores.

1) Guardamotores. Las características principales de los guardamotores, al igual que otros interruptores automáticos magneto-térmicos, son la capacidad de ruptura, la intensidad nominal o calibre y la curva de disparo. Proporciona protección frente a sobrecargas del motor y cortocircuitos, así como, en algunos casos, frente a falta de fase. (Campero, 1995)

2) Contactores. Un contactor consiste básicamente de una bobina con un núcleo de hierro que cierra o abre un juego de contactos al energizar o desenergizar la bobina. (Campero, 1995)

j. Alimentación de válvulas

1) Relevadores térmicos o bimetales. El relevador térmico es aquel que tiene un elemento sensor de temperatura de tipo bimetálico, constituido por dos láminas de distinto coeficiente de dilatación térmica unidas mecánicamente mediante un proceso de laminación. La circulación de una corriente eléctrica a través del elemento bimetálico o la corriente que fluye en una resistencia enrollada sobre el bimetálico aislado, provoca variaciones de temperatura que deforman al bimetálico y accionan un microinterruptor. Estos elementos son poco sensibles a las variaciones de la temperatura ambiente. (Campero, 1995)

La aplicación más importante de los bimetálicos es como sensores de sobrecarga en motores, sobre todo de inducción tipo jaula de ardilla, ya que están sujetos al mismo régimen térmico que los conductores del devanado del motor. Entonces, operan cuando una corriente superior a la de calibración permanece por varios minutos, pero permiten que fluya la corriente de arranque sin enviar la señal de disparo y al mismo tiempo arranques y paros frecuentes en intervalos muy cortos si provocan el disparo. (Campero, 1995)

2) Relé. Al pasar una corriente eléctrica por la bobina, el núcleo de hierro se magnetiza por efecto del campo magnético producido por la bobina, convirtiéndose en un imán tanto más potente cuanto mayor sea la intensidad de la corriente y el número de vueltas de la bobina. Al abrir de nuevo el interruptor y dejar de pasar corriente por la bobina, desaparece el campo magnético y el núcleo deja de ser un imán. (Campero, 1995)

k. Alimentación de sensores.

1) Fusibles. Se puede decir que los fusibles son el elemento de protección más utilizado en las instalaciones eléctricas. En términos sencillos se trata de un conductor con una calibración precisa para fundirse cuando la corriente que circula por él supera un límite. Entonces los fusibles cubren las funciones del sensor y del interruptor. (Campero, 1995)

El elemento fusible está colocado dentro de una estructura con terminales y bases para su fijación con los aislamientos necesarios, los que limitan el nivel de voltaje. El

elemento fusible puede estar rodeado de aire, arena de cuarzo o algún otro material para enfriar los gases del arco y restablecer el medio dieléctrico. (Campero, 1995)

El fusible se utiliza más comúnmente como medio de protección contra cortocircuito que contra sobrecarga. Sin embargo existen los llamados “fusibles limitadores de corriente” que también protegen contra sobrecarga. (Campero, 1995)

l. Estructura de panel. La posición dentro del panel de cada elemento depende de sus requerimientos de ventilación y generación de calor. Por ejemplo, el PLC necesita un espacio mínimo entre los elementos que lo rodean, con la finalidad de que el aire circule y se pueda ventilar. El PLC es un elemento que genera calor por lo que este debería estar ubicado arriba de los elementos que generan poco calor. Esto se debe a que el aire caliente, calentado por el PLC, sube y si el elemento que genera calor esta hasta abajo, el aire calentaría a los otros elementos a medida que sube por el panel. Adicionalmente se recomienda que el panel tenga ventilación. Para esto se puede instalar un ventilador o bien, dejar rejillas. La fuente de 24 V es otro elemento generador de calor, por lo que también se recomienda ubicarlo arriba. (Campero, 1995)

El orden dentro el panel es necesario para facilitar la ubicación de errores. Esto se logra fácilmente colocando canaletas. Las canaletas mantienen el conjunto de cables ordenados. También es importante mantener separados el conjunto de cables de señales de control y el grupo de grupo de cables para la potencia. Esto se debe a que los cables de potencia tienen la capacidad de generar ruido, afectando las señales de control, por lo que se recomienda separar estos conjuntos para garantizar el buen funcionamiento del sistema. (Campero, 1995)

m. Cableado. El cableado se debe dimensionar de acuerdo a la corriente máxima que demanda una carga. Para esto se debe determinar el consumo máximo de la carga en el manual de usuario o en la placa de información eléctrica y con esto determinar el calibre del cable. (Campero, 1995)

IV. ANTECEDENTES

En los años 2008 y 2009, se desarrollaron la primera y segunda fase de automatización, respectivamente, del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Como primera fase de automatización, se hizo el proyecto desarrollado por estudiantes, en el cual se realizó la automatización de la torre de absorción (2008). En el año siguiente, como continuación de este proyecto, se desarrolló la segunda fase de automatización en la cual se automatizó la torre de destilación (2009). En dichos proyectos, se llevó a cabo la instalación de instrumentos electrónicos, tales como sensores de temperatura, válvulas electrónicas, sensores de nivel, entre otros, y se crearon lazos de control para lograr una mejora notable en la obtención de resultados y control de las variables críticas en la operación de los equipos antes mencionados. Esto con el fin de mejorar y optimizar la operación de los equipos y obtener resultados más precisos en las prácticas desarrolladas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG.

Gracias a los resultados obtenidos en los proyectos anteriores surgió la necesidad de realizar la tercera fase de automatización de los equipos restantes del laboratorio, para la obtención de resultados similares. En la tercera fase de automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG, se desarrollarán proyectos de automatización en los siguientes equipos: columna de extracción líquido-líquido, planta productora de biodiesel y torre de enfriamiento.

La participación de estudiantes de diversas carreras, tanto en los proyectos desarrollados en los años 2008 y 2009, como en el presente proyecto, convirtieron estos proyectos en un trabajo multidisciplinario, involucrando estudiantes de Ingeniería Química, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Industrial e Ingeniería en Ciencias de la Computación. Involucrando también a los departamentos de las mencionadas carreras, los cuales cumplen con tareas de vital importancia para el desarrollo de los mismos, pues se encargan de proporcionar los recursos materiales y monetarios para llevarlos a cabo. Los departamentos también brindan una dirección continua y un apoyo educacional en la elaboración de los proyectos para que éstos puedan alcanzar los resultados deseados, delegando la responsabilidad y desarrollo total del proyecto a los estudiantes, para que sean ellos los autores materiales e intelectuales de dichos proyectos, y puedan obtener del proyecto el mayor aprendizaje posible.

V. DELIMITACIÓN E IMPACTO DEL TEMA

A. Planta de producción de biodiesel

Este trabajo de graduación comprende la puesta en marcha de una planta piloto para la producción de biodiesel por medio de catálisis básica y ácida, además del tratamiento de biodiesel y glicerina, cuyo funcionamiento será completamente automatizado. El proyecto consiste en el diseño, selección, dimensionamiento y montaje del equipo, sensores, bombas, tuberías y tanques necesarios para el proceso. Además, se hicieron pruebas de funcionamiento de la planta, una vez se terminó de instalar por completo.

El pretratamiento de la materia prima solo se realizará en caso ésta cuente con un contenido de ácidos grasos libres mayor a un valor establecido. Actualmente, no se hace este pretratamiento ya que la materia prima utilizada no presenta un contenido de acidez muy alto; sin embargo, llevando a cabo esta etapa, se aprovechará mejor la materia prima. El tratamiento del biodiesel se realizará ya sea si éste es proveniente de una catálisis solamente básica o proveniente de una catálisis básica con un pretratamiento de catálisis ácida también.

La información a proporcionar abarca los parámetros y límites de operación, la determinación y especificaciones de equipo, tuberías, válvulas y bombas necesarias para montar y lograr la automatización de las etapas mencionadas. Con esto se desea reducir las tareas manuales y los errores provocados por las mismas, durante estas etapas del proceso.

Dentro del alcance de este trabajo no se considera la recepción, traslado y peso de la materia prima. Además, no incluye la realización del seguimiento de la reacción, cálculos de cantidad de producto, subproductos o de rendimiento, ni la presentación de gráficas de ninguna clase como parte del programa.

La planta facilitará la experimentación, ya que permitirá al investigador enfocarse solamente en el experimento, y no en la parte técnica del proceso de producción, lo cual lo hará de forma exacta y precisa la planta automatizada.

Como consecuencia de la automatización se obtendrá una reducción de errores en el proceso, reducción en la cantidad de subproductos y reprocesos, un mejor aprovechamiento de la materia prima, reducción de costos de operación y una mejor calidad en los productos obtenidos. Adicionalmente, se pretende conseguir un objetivo ambiental importante: no sólo controlar y reducir el volumen de aceite vegetal usado que se desecha, sino generar, mediante su tratamiento, dos productos de alto valor agregado, el biodiesel como generador de energía y la glicerina para usos cosméticos, entre otros.

B. Columna de extracción líquido – líquido

El módulo de la asesoría química contribuirá en el proceso de automatización, determinando las variables críticas del proceso que deberán ser medidas por instrumentos electrónicos, determinará cuál será el método químico de medición de dichas variables, calculará los límites de operación de la columna y los rangos de medición de los equipos electrónicos y se aconsejará cuál es el material adecuado para éstos. También se realizará la instalación de los equipos de control en la columna y, trabajando conjuntamente con el estudiante de Ingeniería Electrónica, se llevará a cabo la calibración y prueba de los equipos instalados para corroborar su correcto funcionamiento.

Por otra parte, el sub-módulo de control y sensores del estudiante de Ingeniería Electrónica, comprende la parte de instalación eléctrica y creación de lazos de control para el manejo de los equipos electrónicos. Este submódulo está a cargo de la determinación de los equipos electrónicos a utilizar para medir las variables, identificar el tipo y cantidad de materiales auxiliares que se utilizarán para la instalación de los equipos electrónicos, realizar el cableado de los equipos de control instalados, comprobar la correcta puesta en marcha de los equipos y realizar, junto al estudiante de Ingeniería Química, la calibración electrónica de los equipos de medición. Además, se creará una interfaz gráfica para proporcionar al usuario de la columna de extracción líquido-líquido, un fácil control y manejo de los instrumentos de control instalados en el equipo.

El sub-módulo de asesoría química, asegurará que las modificaciones realizadas a la columna y los equipos de control electrónicos a instalar sean los adecuados, ayudando a obtener los datos necesarios para ser utilizados en el aprendizaje de los estudiantes. Este proyecto creará oportunidades en el futuro para seguir realizando mejoras a la columna de extracción líquido-líquido, fomentando el desarrollo práctico y el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Química y, al mismo tiempo, realizar mejoras en el equipo que generen una repercusión económica favorable para el departamento de Ingeniería Química y la Universidad del Valle de Guatemala.

Al automatizar la columna de extracción líquido-líquido instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG, mediante la colocación de válvulas, sensores, motores y bombas controladas por medios electrónicos, los estudiantes de Ingeniería Química adquirirán la oportunidad de aprender a operar y manipular equipos automatizados. Es decir, se les brinda la oportunidad de conocer cómo se usan, calibran, conectan y arreglan equipos electrónicos, tales como válvulas y sensores. Además, la automatización mejora la toma de datos en el equipo, optimiza tiempos de operación, mejora la seguridad de operación del equipo y permite ahorrar recursos.

C. Torre de enfriamiento

Este trabajo de graduación comprende la automatización de la torre de enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Específicamente se enfoca en el uso y calibración de sensores para la medición de variables de la torre, además del uso de un PLC para controlar y monitorear el proceso de enfriamiento. Para lograr este objetivo se va implementar el uso de diferentes sensores para medir varios parámetros de la torre y, por medio de un PLC programado específicamente para esta torre, controlar las diferentes válvulas de agua, el ventilador de aire y la bomba de agua del tanque.

Además de controlar la torre de enfriamiento, se va a implementar una interfaz gráfica en una computadora que permita a los usuarios controlar la temperatura que se desea alcanzar con el proceso y, además, observar las mediciones que se realizan con los diferentes sensores. El programa mostrará la carta psicométrica debido a que el uso que se le da a la torre es para prácticas de estudiantes de Ingeniería Química de la

UVG, en su cuarto y quinto año de estudio, y deben leer datos esta carta para observar los resultados del proceso de enfriamiento.

Al automatizar la torre de enfriamiento, se va a disminuir el desperdicio de agua, ya que el agua que se enfría se utilizará para calentarse de nuevo y realizar otras prácticas. Además, se van a evitar rebalses del tanque de agua. Las mediciones realizadas por los sensores, adicionalmente, van a mejorar las prácticas de los estudiantes al proporcionar datos más exactos.

VI. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló en tres módulos independientes:

- Planta de biodiesel
- Columna de extracción líquido-líquido
- Torre de enfriamiento

Cada equipo correspondió a un módulo independiente conformado por ingenieros electrónicos e ingenieros químicos. Mientras que la integración de estos módulos estuvo a cargo de un ingeniero industrial, con la finalidad de distribuir y cumplir las tareas de manera más eficiente. El diagrama de distribución puede observarse en la Ilustración 1.

Para el desarrollo del proyecto se integraron distintas modalidades de trabajo las cuales se llevaron a cabo a lo largo de las siguientes fases:

A. Fase 1: Investigación

Durante esta fase los estudiantes se familiarizaron con los conceptos más importantes, así como el funcionamiento de los respectivos equipos. El asesoramiento técnico de los ingenieros químicos fue de vital importancia en esta fase, ya que en base a esta información se definió el diseño óptimo del equipo automatizado. Se utilizaron tanto fuentes bibliográficas como entrevistas y asesoría de profesionales y expertos en el tema.

B. Fase 2: Diseño

A partir de la información recabada durante la primera fase del proyecto se realizaron los diseños de los respectivos equipos, los cuales se fueron modificando hasta obtener el diseño óptimo que tomara en cuenta los parámetros más relevantes para operar fácil y eficientemente.

C. Fase 3: Determinación de equipo y cotizaciones

Con los diseños aprobados se procedió a determinar el equipo necesario para llevar a cabo la automatización. Se tomaron en cuenta las cantidades y especificaciones de cada uno, ya que se realizaron pruebas de laboratorio para establecer los límites de

operación. Al referirse a equipo se incluyen los sensores, equipo de cómputo, válvulas y bombas, motores, tuberías y accesorios, PLC, cables, estructuras, entre otros. Durante esta fase también se realizaron cotizaciones para definir a los proveedores que ofrecieran las mejores condiciones y cumplieran con las especificaciones de cada equipo. Finalmente, se emitieron las órdenes de compra correspondientes para contar con el material necesario para la siguiente fase.

D. Fase 4: Instalación

En esta fase se procedió a colocar los sensores en sus respectivos lugares, en algunos casos fueron necesarias estructuras adicionales o modificaciones en el equipo para adecuar los sensores. Por otro lado se instalaron las válvulas automáticas y manuales, se realizaron bypass para contar con la opción de operar tanto manual como automáticamente, según lo prefiera el usuario. Asimismo, se colocaron los motores y bombas adicionales, variadores de frecuencia, entre otros. Finalmente, se llevó a cabo el cableado y la instalación del gabinete donde se colocó el PLC.

E. Fase 5: Elaboración del programa e interfaz gráfica

Posteriormente, se elaboró un programa que es básicamente el algoritmo del proceso de operación, en el que se establecen los límites máximos y mínimos. Asimismo, el usuario puede elegir entre varias opciones, por lo que es flexible y facilita la operación. De igual manera, tiene la ventaja de proporcionar al usuario un monitoreo constante, ya que cuenta con una interfaz gráfica que permite controlar el proceso en todo momento y visualizarlo de una mejor manera. Debido a lo anterior y al sistema de seguridad que posee, se eliminan errores y se protegen los equipos.

F. Fase 6: Pruebas de puesta en marcha

Finalmente, se realizaron algunas pruebas para calibrar los sensores y asegurarse que estuvieran operando adecuadamente. Asimismo, se ejecutaron corridas de las operaciones que se realizan en cada equipo con el fin de asegurarse que tanto el programa como los sensores funcionaran debidamente y que las lecturas que aparecían en el equipo de cómputo fueran las correctas.

VII. PLANTA DE BIODIESEL

A. Pruebas de laboratorio

Se realizan pruebas de laboratorio para determinar las condiciones de operación en las que se obtiene biodiesel de buena calidad, para luego ser aplicadas a la planta piloto. Las pruebas que se realizan son: la reacción a distintas relaciones de reactivos y condiciones de operación, neutralización y lavado del biodiesel, y neutralización de glicerina. El procedimiento se lleva a cabo con aceite usado de cocina de 1.03% de acidez.

Las pruebas de reacción son hechas en un reactor de 10L de capacidad, que cuenta con un agitador eléctrico. El reactor se coloca sobre una estufa para permitir el calentamiento. Se mide constantemente la temperatura por los agujeros de la tapa del reactor. En las pruebas se varía las relaciones de alcohol y catalizadores utilizados, la temperatura y el tiempo de reacción. Al finalizar la reacción se debe esperar a que se separe la glicerina y el biodiesel para poder darles tratamiento por separado. Se mide la conductividad del biodiesel y de la glicerina crudos para determinar si éste puede ser un método para separarlos de forma automática.

Para la prueba de neutralización se utiliza un potenciómetro. Se toma una muestra de biodiesel y una de glicerina y se mide el pH inicial. Se agrega ácido hasta un pH neutro para obtener una relación de cantidad de ácido a agregar de acuerdo a la cantidad de biodiesel o glicerina. Las pruebas de lavado de biodiesel consisten en la adición de agua al biodiesel, en un decantador. La cantidad de agua agregada debe ser igual a 1/3 el volumen de biodiesel y se debe realizar dos o más etapas de lavado. Un método alternativo para la neutralización del biodiesel con ácido, es realizar varias etapas de lavado hasta a obtener un pH neutro. Además, se debe realizar mediciones de conductividad al biodiesel y al agua de lavado para determinar si pueden o no ser separados por este método. Para el caso de la glicerina, se debe realizar una prueba de separación de jabones, posterior a la neutralización.

Equipo y materiales:

- Reactor de 10L con agitador

- Estufa eléctrica
- Termómetro
- Balanza analítica
- Potenciómetro
- Probeta de 10mL
- Beaker de 500mL
- Beakers de 50mL
- Bureta de 25mL con escala de 0.05mL
- Papel indicador

Reactivos:

- Aceite usado de cafetería 1.03% acidez
- Ácido sulfúrico al 96.5%
- Hidróxido de potasio al 95%
- Metanol al 95%
- Agua destilada

Pasos para reacción:

- Agregar aceite a reactor
- Calentamiento el aceite hasta la temperatura deseada
- Agregar reactivos dependiendo de la catálisis que se vaya a realizar
- Dejar reaccionar por un tiempo determinado
- Verificación de calidad del producto obtenido

Pasos para tratamiento de biodiesel:

- Toma de muestra de biodiesel
- Medición de pH de la muestra
- Adición de ácido sulfúrico a la muestra
- Medición de pH de la muestra
- Lavado de biodiesel en decantador
- Decantación de agua de lavado
- Medición de conductividad del agua de lavado
- Medición de pH del biodiesel

- Medición de conductividad de biodiesel

Pasos para tratamiento de glicerina:

- Toma de muestra de glicerina
- Medición de pH de la muestra
- Adición de ácido sulfúrico a la muestra
- Medición de pH de la muestra
- Con un pH de 7, tomar tiempo de separación de jabones

B. Diseño de la planta

Para determinar las especificaciones el equipo, bombas y válvulas, involucrados en el proceso de producción de biodiesel, se realizan los cálculos respectivos en Microsoft Office Excel 2007.

1. Diagrama de equipo y procedimiento. El diagrama del equipo involucrado en el proceso de producción de biodiesel, se lleva a cabo en base a la teoría. Al identificar las diferentes partes que componen el proceso de producción y, con la ayuda de Microsoft Office Visio 2007, se elabora el diagrama de flujo de equipo, incluyendo equipo, válvulas y bombas. El diagrama fue realizado de forma simultánea con la elección del tipo de válvulas automáticas, determinando la necesidad de válvulas de paso o de control, en el proceso.

Para realizar el diagrama de procedimiento, hay que determinar las variables a medir y la instrumentación necesaria para ello, en cada equipo, y el lazo de control que debe existir. Además, se debe establecer los valores a los parámetros medidos, ya sea por limitaciones de la planta, por resultados experimentales o valores teóricos. Los lazos de control se pueden mostrar mediante un diagrama de tubería e instrumentación (DTI), también elaborado en Visio. Con esto es posible realizar una secuencia de operación.

Pasos:

- Investigación del proceso
- Realización del diagrama de equipo (Microsoft Office Visio 2007)

- Determinación de instrumentación necesaria en cada equipo
- Identificación del lazo de control de cada dispositivo
- Elaboración del diagrama DTI
- Identificación de secuencia de operación de los distintos dispositivos
- Realización del diagrama de procedimiento (Microsoft Office Visio 2007)

2. Dimensionamiento de equipo. Debido a que la planta piloto del laboratorio no contaba con el equipo suficiente para el proceso de producción de biodiesel, se tuvo la necesidad de diseñar el equipo faltante. El diseño consistió en la determinación de capacidades y dimensionamiento.

La determinación de la capacidad necesaria de cada equipo se basa en balances de masa integrales que se realizan en torno al reactor de 60L, con el que ya cuenta la planta, para la conversión de un aceite usado de cocina. Las relaciones de alcohol y catalizadores a utilizar deben ser las determinadas en las pruebas de laboratorio. Se debe realizar un balance de masa para el proceso de catálisis básica con pretratamiento de catálisis ácida y un balance para el proceso solamente de catálisis básica, para conocer las cantidades utilizadas en cada proceso y así poder utilizar la cantidad mayor como base para el dimensionamiento de equipo y así asegurar que los equipos tengan la capacidad suficiente para cualquier caso. Además, se puede obtener información sobre rendimientos experimentales del proceso en fuentes bibliográficas, Internet o consultas a expertos. Las capacidades necesarias para cada equipo se determinan tomando en cuenta que los tanques no deben ser llenados a más de $\frac{3}{4}$ de su capacidad y un 10% adicional de sobredimensionamiento.

Es necesario realizar visitas al Laboratorio de Operaciones Unitarias para verificar la existencia y disponibilidad de equipos. Para los equipos no disponibles, se debe hacer un dimensionamiento con base a la capacidad sobredimensionada, estableciendo el diámetro, longitud y altura del cono (en caso se tratara de un tanque con fondo cónico). El material de cada equipo se establece de acuerdo a la compatibilidad con la especie a manejar.

Pasos:

- Cálculo de balance de masa de proceso con pretratamiento de catálisis ácida

- Cálculo de balance de masa de proceso sin pretratamiento de catálisis ácida
- Investigación de rendimientos experimentales
- Determinación de capacidades de cada equipo
- Verificación de equipo disponible
- Verificación de compatibilidad del material del equipo disponible
- Dimensionamiento de equipo no disponible
- Selección del material del equipo no disponible

3. Especificaciones de tubería y accesorios. Las especificaciones de tubería que se deben considerar son el material, diámetro y longitud. El material se elige de acuerdo a la compatibilidad de la especie que está destinada a transportar. El diámetro de la tubería se calcula mediante prueba y error, simultáneamente al cálculo de potencia de la bomba, hasta obtener un flujo másico que resulte en el tiempo deseado para el transporte de cada especie. La longitud se establece realizando mediciones del espacio destinado a la planta de biodiesel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Los accesorios para cada línea de tubería se eligen del mismo material que la tubería. El tipo y cantidad de accesorios se determina considerando el diámetro de la tubería y los diámetros de entrada y salida de los equipos, y tomando en cuenta los arreglos que se deben realizar de acuerdo al espacio destinado a la planta.

Pasos:

- Establecimiento la especie que transporta cada tubería
- Determinación del material de la tubería y accesorios
- Establecimiento del diámetro de la tubería
- Establecimiento de la longitud de cada segmento de tubería
- Determinación del tipo y cantidad de accesorios en cada segmento de tubería
- Determinación de la longitud total de tubería y accesorios de cada material

4. Determinación de potencia de bombas. El diseño de las bombas constituye la elección del tipo de bomba (centrífuga o desplazamiento positivo) y la determinación de la potencia necesaria para las condiciones de cada parte del proceso en donde son necesarias. Para esto, se debe tomar en cuenta la fricción de la tubería y accesorios, tipo y número de accesorios en la línea, eficiencia, diferencia de altura y

presión entre el punto de succión y descarga de la bomba. En este caso se considera una eficiencia del 85% y una velocidad de 1m/s. La longitud de tubería se toma de las especificaciones de tubería y se toma el tramo más largo para cada bomba, y la rugosidad de la tubería se toma de la literatura de acuerdo al material a utilizar. Como se mencionó anteriormente, el diámetro de la tubería es una variable que se va modificando con el fin de obtener el tiempo de transporte deseado para cada especie.

Se debe realizar un inventario de las bombas del Laboratorio, para comparar la potencia calculada con la de las bombas disponibles. En caso no haya alguna bomba que pueda cumplir con las especificaciones, es necesario realizar una cotización.

Pasos:

- Establecimiento de condiciones de tubería para cada bomba
- Realización de suposiciones
- Consideración de la longitud de tubería determinado con anterioridad
- Estimación del diámetro de la tubería
- Cálculo de potencia de la bomba
- Selección de tipo de bomba
- Verificación de existencia de bombas
- Cotización de bombas no disponibles en el Laboratorio

5. Especificaciones de válvulas. Las especificaciones de las válvulas que se deben establecer son: tipo, diámetro, temperatura de proceso y alguna característica o propiedad de la especie que la atraviesa que deba ser considerada para elegir el material. Se clasifican las válvulas en manuales o automáticas, y estas últimas en proporcionales o solenoides. En el caso de las válvulas solenoides y manuales se considera el diámetro de la tubería en la que se instala. Para el caso de la válvula automática proporcional, se debe determinar el coeficiente C_V para establecer el diámetro adecuado de la válvula.

Pasos:

- Plantear condiciones de proceso, cercanas a cada válvula
- Identificar características de la especie que atraviesa la válvula
- Clasificación de la válvula

- Cálculo del coeficiente C_v para válvulas proporcionales
- Determinación del diámetro de la válvula

6. Especificaciones de instrumentación. La instrumentación es indispensable para la automatización de la planta ya que mediante ésta es posible determinar el estado de las variables a medir y crear los lazos de control para realizar el proceso de forma continua. Ya habiendo determinado las variables a medir, se debe investigar las formas de medir estas variables, sea directa o indirectamente, y elegir la más conveniente en cada caso.

Las especificaciones de la instrumentación necesaria para automatizar la planta de biodiesel se establecen mediante información como: capacidades de equipo, requerimientos y condiciones del proceso, la naturaleza de las especies en contacto con cada dispositivo y las especificaciones de las propiedades de la materia prima y los productos. En el caso específico de los transmisores de conductividad, se debe utilizar los resultados de las pruebas de acidez realizadas a los aceites y la conductividad del biodiesel, glicerina y agua de lavado. Esta información se presenta a distintos proveedores y se evalúa cada propuesta, técnica y económicamente, para elegir la mejor opción.

Pasos:

- Para sensores de nivel: verificación de capacidad de equipo donde se vaya a instalar y requerimiento de materia prima y reactivos en las etapas del proceso.
- Para sensores de temperatura y presión: verificar condiciones del proceso
- Para sensores de humedad: requerimientos de materia prima y especificaciones del biodiesel.
- Para sensor de pH: considerar pH de glicerina obtenida y pH deseado.
- Para sensor de conductividad: tomar en cuenta relación de conductividad y contenido de acidez de los aceites; y el valor y diferencia de conductividad entre biodiesel y glicerina, y entre biodiesel lavado y agua de lavado.

7. Dimensionamiento de la capacidad del PLC y componentes eléctricos. Para dimensionar el PLC se debe realizar un inventario de los componentes electrónicos que integran el sistema: válvulas automáticas, motores y

dispositivos de medición. Se debe elegir un tipo de PLC de acuerdo a la adecuación de los datos técnicos del mismo con el sistema, principalmente la capacidad de manejo del total de señales necesarias para controlar la planta, ya sea considerando la opción de utilizar módulos de expansión. Además, para dimensionar los elementos que componen la instalación eléctrica, debe determinarse la corriente que consume cada componente identificado.

Pasos:

- Realizar inventario de componentes electrónicos
- Elegir marca y modelo de PLC
- Determinar corriente que consume cada componente

C. Montaje de planta

El montaje de la planta consiste en la instalación de los equipos, bombas, válvulas, instrumentación y tubería, especificados anteriormente. Se debe verificar el correcto funcionamiento de todos los elementos, individual y conjuntamente.

La instrumentación debe ser calibrada dentro del rango de operación, para asegurar que el valor del parámetro sea lo más exacto posible al momento de la medición. La idea básica para calibrar la instrumentación electrónica es medir la variable de interés con el transmisor electrónico y con un instrumento de medición calibrado. Para calibrar correctamente el transmisor eléctrico se debe calcular una función tal que mapee los datos transmitidos por el transmisor electrónico hacia los datos que indica el sensor calibrado. Los RTD deben calibrarse con un termómetro como instrumento de referencia, los de presión con manómetros y los analizadores con soluciones estándar o "buffers". La calibración de los transmisores de nivel se realiza utilizando una probeta para asegurar que el volumen sea lo más exacto posible.

Pasos:

- Instalación de equipo, bombas, tubería, válvulas e instrumentación
- Calibración de instrumentación
- Comprobación del funcionamiento de cada elemento del sistema
- Programación

- Desarrollo de interfaz
- Pruebas de puesta en marcha

D. Resultados

1. Pruebas de laboratorio. A continuación se muestran las condiciones de operación y los tratamientos del biodiesel y glicerina, con los que se obtuvo una mejor calidad del mismo, utilizando metanol como alcohol.

Tabla 9. Condiciones de operación óptimas

	Catálisis ácida	Catálisis básica
Ácido sulfúrico	0.05 g/g _{AGL}	-
Hidróxido de potasio	-	0.1 mol/mol _{AGC}
Metanol	2.25g/g _{AGL}	3 mol/mol _{AGC}
Tiempo	45 min	45 min
Temperatura	60°C	60°C

Tabla 10. Tratamiento de biodiesel y glicerina

	Biodiesel		Glicerina	
	Neutralización	Lavado	Neutralización	Separación
Etapas	0	2	1	1
Tiempo de cada etapa (min)	-		15	45
Cantidad de reactivos por etapa	-	Agua: 1/3 volumen biodiesel	Ácido sulfúrico (96.5%): 1.2% (v/v _{glicerina})	-

2. Diseño de la planta

a. Diagrama de equipo y de procedimiento. El diagrama de flujo de equipo realizado para el proceso de producción de biodiesel se muestra en la Ilustración 24. La

Tabla 11 y Tabla 12 muestran la nomenclatura del diagrama. La Ilustración 25 presenta el diagrama de la secuencia de operaciones, en base a las acciones que realiza cada instrumento.

Tabla 11. Equipo utilizado en el diagrama de flujo de equipo de la planta de biodiesel

Texto mostrado	Equipo
T1	Tanque para calentamiento de la materia prima
T2	Tanque para aceite filtrado
T3	Tanque para methanol
T4	Tanque para metóxido
T5	Reactor
T6	Tanque para tratamiento de biodiesel
T7	Tanque para glicerina
E1	Filtro prensa
E2	Condensador
E3	Centrífuga

Tabla 12. Asignación de colores a tubería según la especie que transporta

Color	Especie
Anaranjado	Materia prima (aceites o grasas)
Azul	Catalizador básico
Amarillo	Metanol
Gris	Vapor
Morado	Aire comprimido
Magenta	Mezcla biodiesel/glicerina
Rojo	Biodiesel
Verde	Agua
Corinto	Glicerina

Ilustración 24. Diagrama de flujo de equipo del proceso de producción de biodiesel

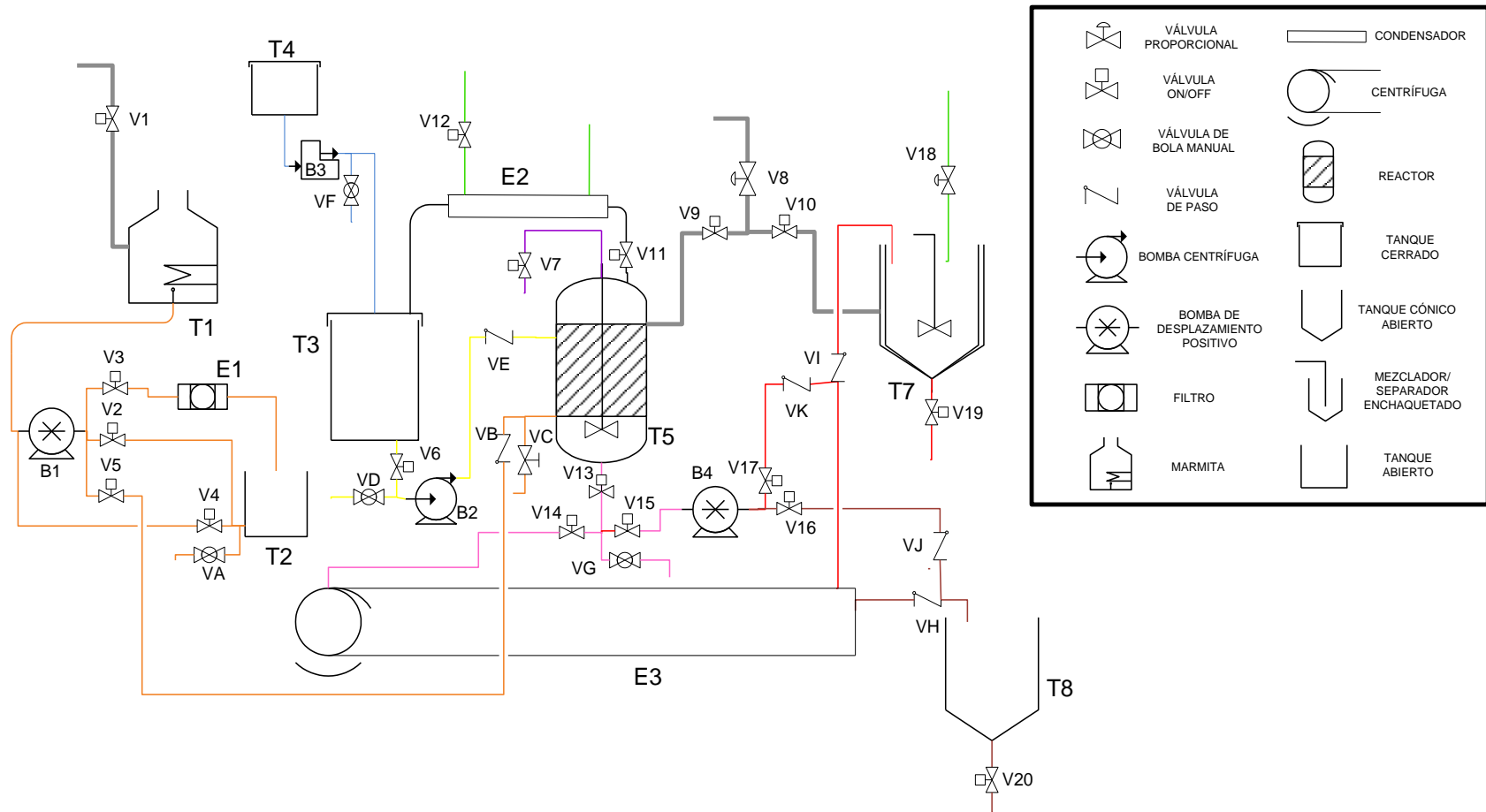


Ilustración 25. a) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel

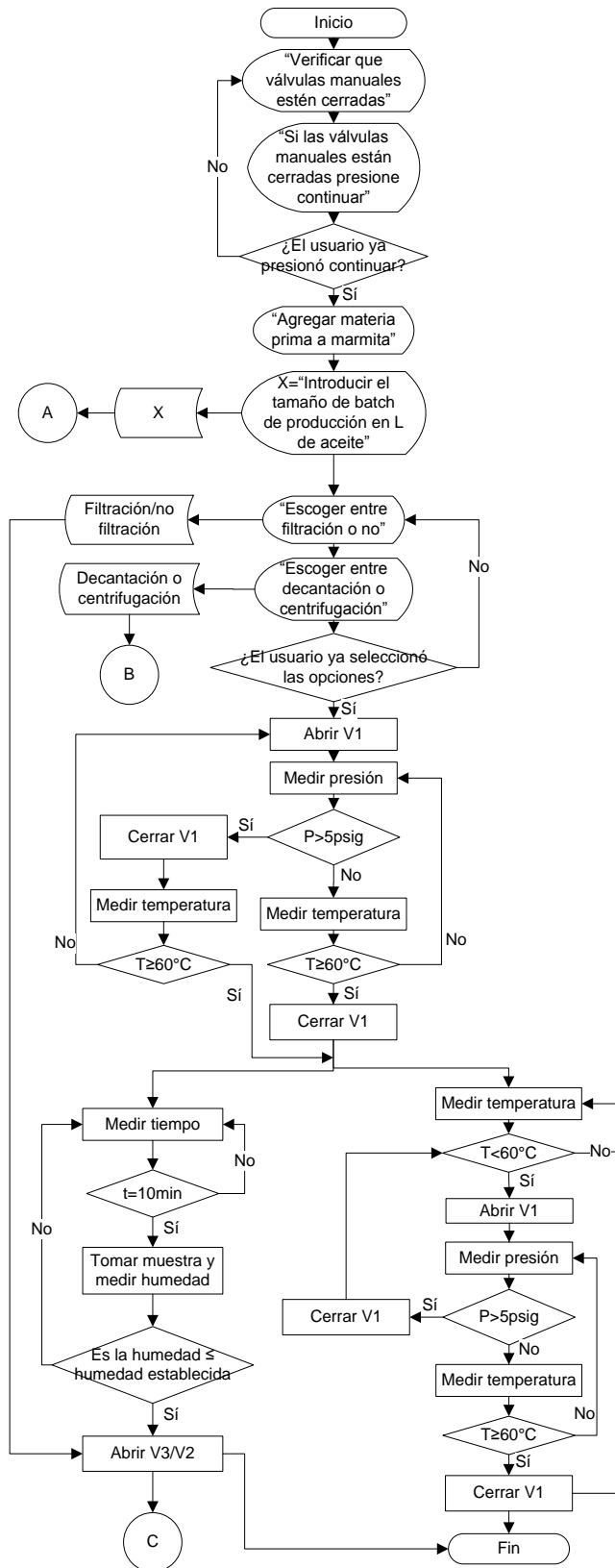


Ilustración 25. b) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel

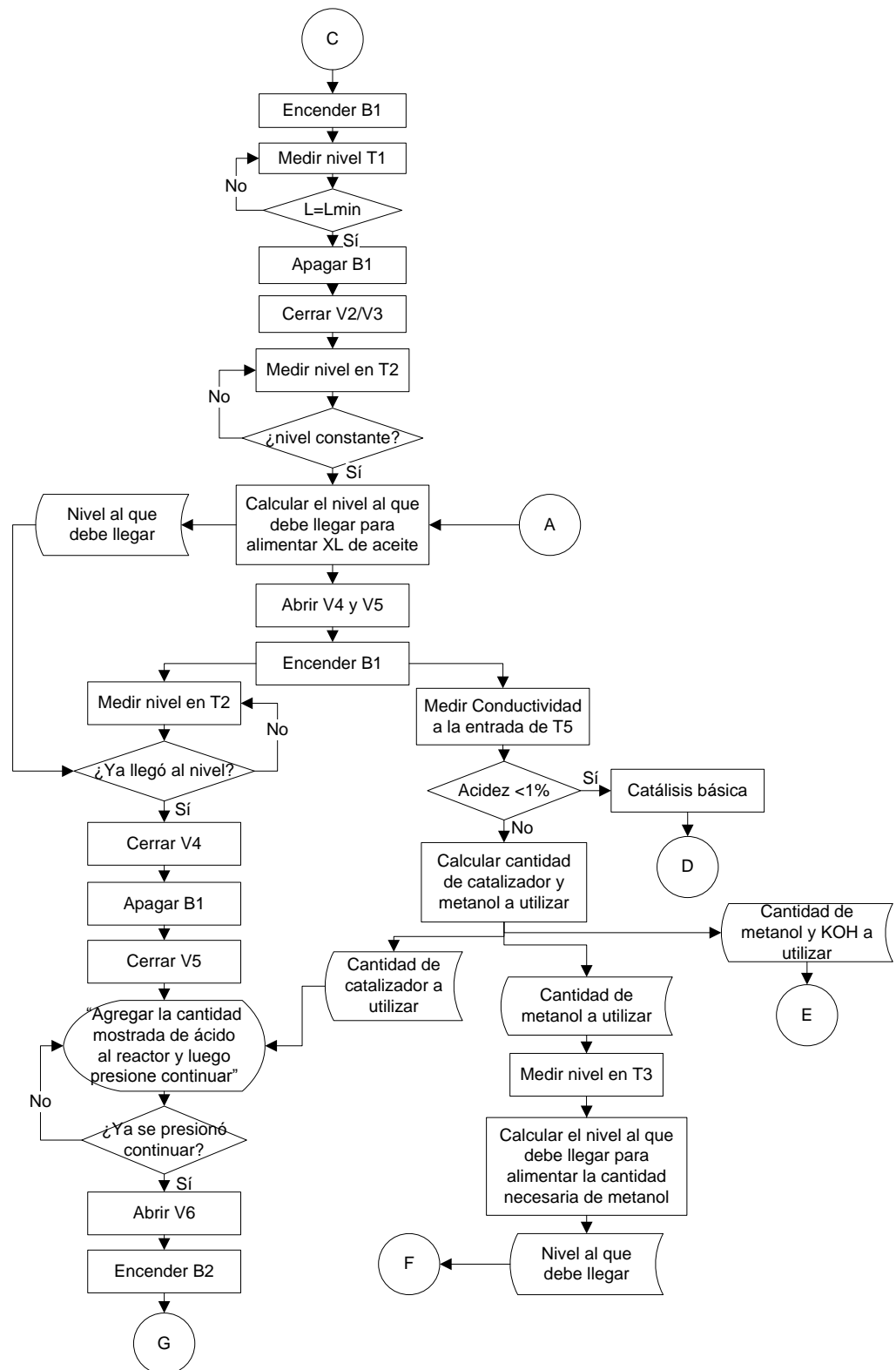


Ilustración 25. c) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel

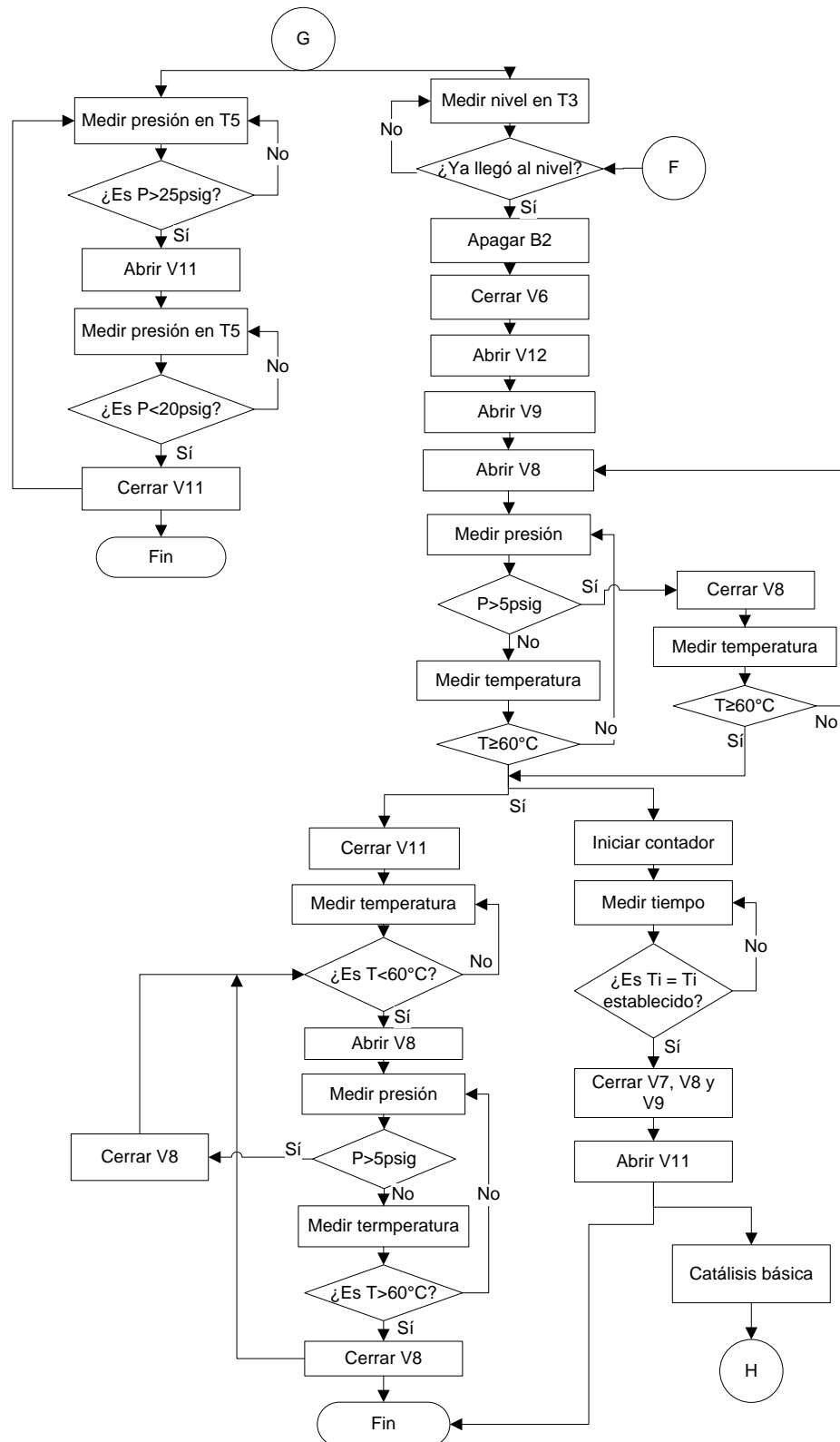


Ilustración 25. d) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel

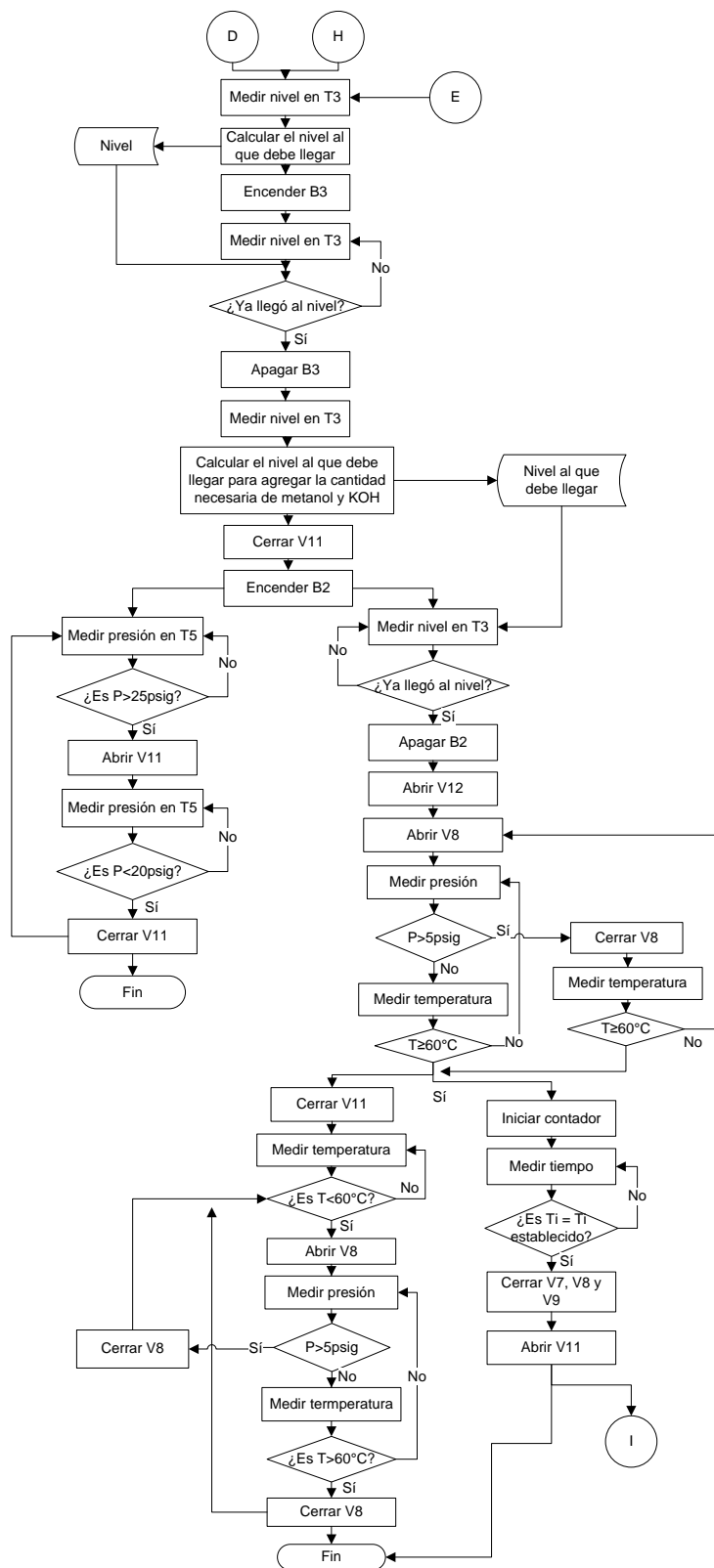


Ilustración 25. f) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel

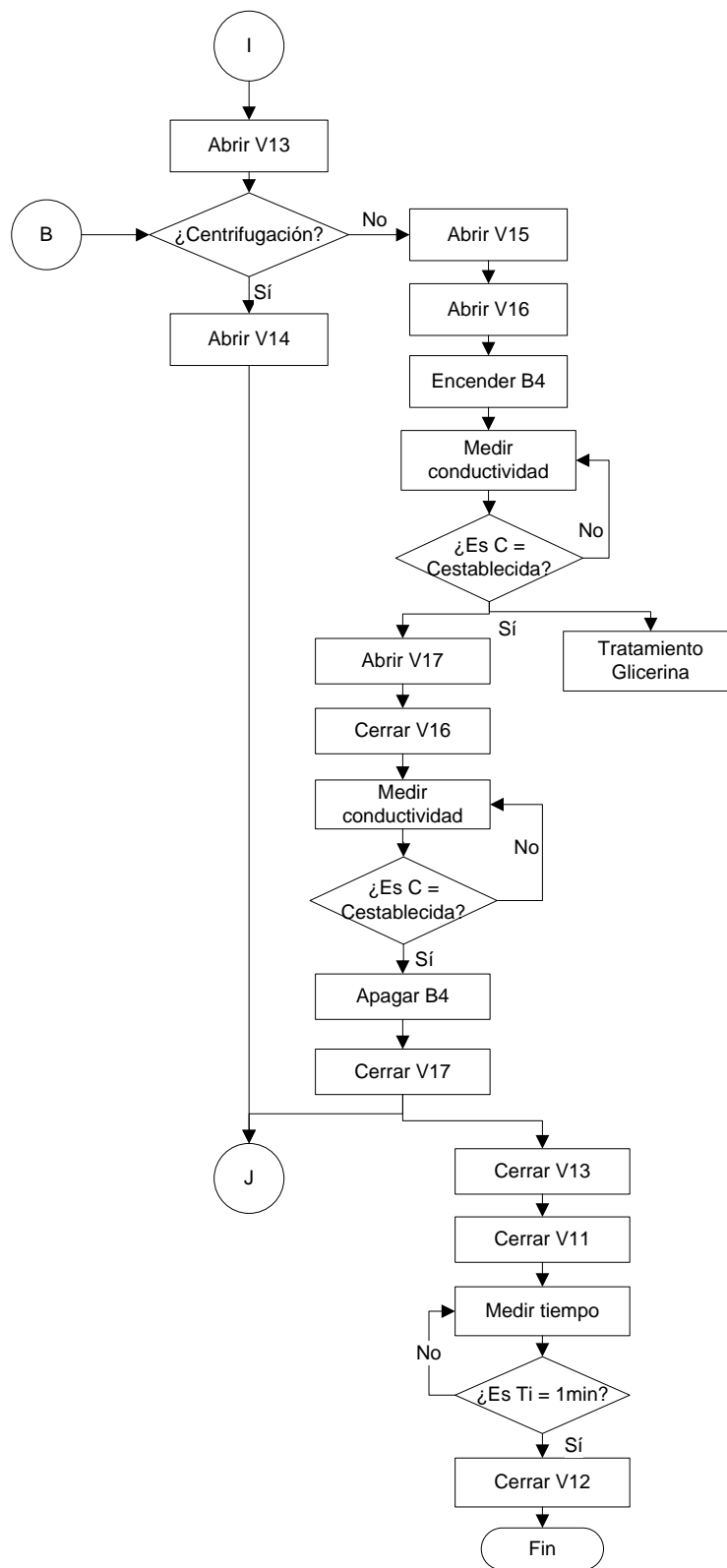


Ilustración 25. g) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel

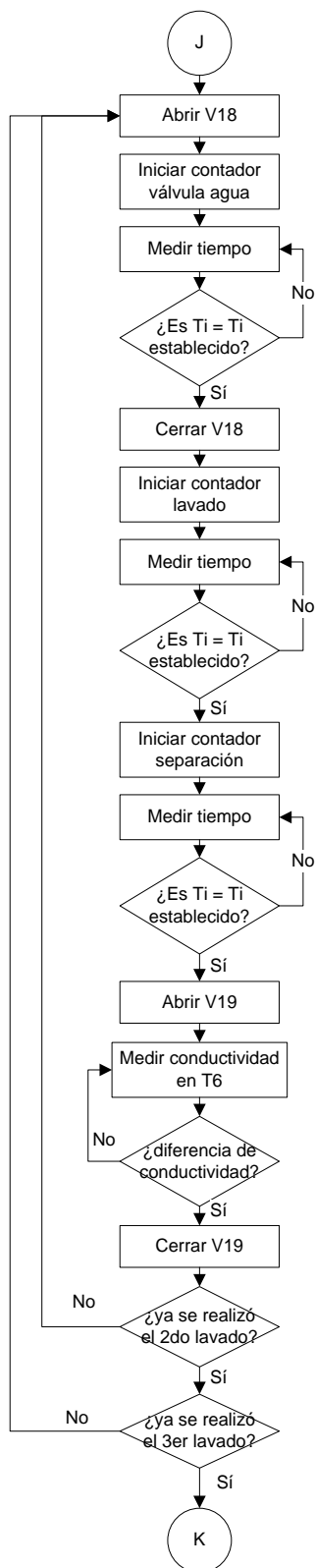
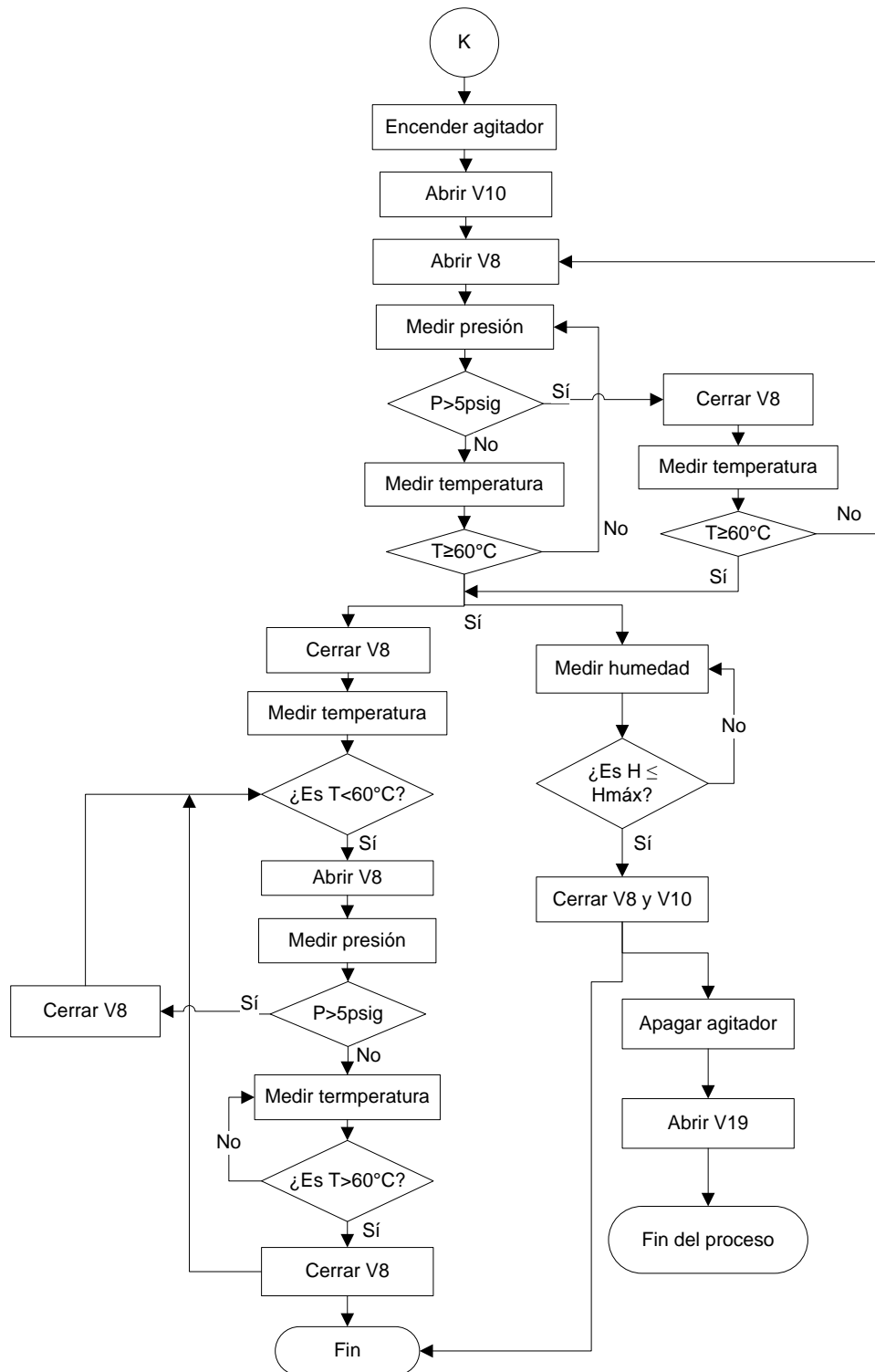


Ilustración 25. h) Diagrama de procedimiento de la producción de biodiesel



b. Dimensionamiento de equipo. La Tabla 13 muestra los balances de masa para la conversión con pretratamiento con catálisis ácida de 30L de aceite usado de cocina de 1.03% de acidez y para la conversión solamente con catálisis básica, de 30L de aceite de 0% de acidez.

Tabla 13. Balance de masa para la conversión de las diferentes catálisis

Especie	Catálisis básica		Catálisis ácida-básica	
	Entrada (kg)	Salida (kg)	Entrada (kg)	Salida (kg)
Aceite	27.32	-	27.32	-
Ácido sulfúrico	-	-	1.46×10^{-2}	1.46×10^{-2}
Hidróxido de potasio	57.41×10^{-2}	57.41×10^{-2}	56.82×10^{-2}	56.82×10^{-2}
Metanol	9.84	6.56	10.40	7.12
Biodiesel	-	28.19	-	28.23
Agua	-	-	-	0.02
Glicerina	-	2.99	-	2.95

A partir de las cantidades mostradas en la Tabla 13 se realizó el dimensionamiento de equipo. La siguiente tabla muestra las capacidades requeridas y las especificaciones de los tanques necesarios para el proceso de producción de biodiesel. Los tanques en donde se especifica un material sugerido, son los que no se encontraron disponibles en el Laboratorio y por lo tanto se tuvo la necesidad de mandar a construir.

Tabla 14. Especificaciones de los equipos necesarios

Código	Capacidad requerida	Especificaciones de tanques instalados
T1	63L	Material: Acero inoxidable 316 Capacidad: 30L
T2	44 L	Material: Acero inoxidable 316 Capacidad: 80L
T3	20 L	Material: Acero inoxidable Capacidad: 80L

Continuación Tabla 14

Código	Capacidad requerida	Especificaciones de tanques instalados
T4	2.5 L	Material sugerido: Polipropileno de alta densidad Capacidad: 20L
T5	62 L	Material: Acero inoxidable 316 Capacidad: 60 L
T6	68 L	Material: Acero inoxidable 316 Capacidad: 50L
T7	30 L	Material sugerido: Acero inoxidable 316 Diámetro: 29 cm Altura: 45.5 cm

c. Especificaciones de tubería y accesorios. A continuación se muestran las distintas tuberías y accesorios a utilizar, especificando el material, diámetro y una longitud aproximada de la misma.

Tabla 15. Especificaciones de la tubería a utilizar en el proceso de producción de biodiesel

Material	Diámetro (in)	Unidades de tubería (6m)
Acero inoxidable	½	5
	1	1
Acero al carbón	½	1
Hierro galvanizado	½	2

d. Determinación de potencia de bombas. La Tabla 16 muestra el tipo y la potencia de las bombas de la Ilustración 24.

Tabla 16. Especificaciones para cada bomba de la planta de producción de biodiesel

Código	Tipo	Potencia necesaria (hp)	Potencia utilizada (hp)
B1	Desplazamiento positivo	1/50	$\frac{3}{4}$
B2	Centrífuga	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
B3	Dosificadora	-	1/5
B4	Desplazamiento positivo	$\frac{1}{4}$	1 $\frac{1}{2}$

e. Especificaciones de válvulas. Las especificaciones de las válvulas a utilizar se muestran en la siguiente tabla, tomando en cuenta las condiciones de operación. El código de la válvula hace referencia al diagrama de la Ilustración 24.

Tabla 17. Especificaciones de las válvulas automáticas necesarias para el proceso de producción de biodiesel


Código	Tipo	Diámetro (in)	Especificaciones
V1	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: vapor Temperatura: 180°C Presión: 80psig (debe soportar)
V2	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: aceite o grasa Temperatura: 100°C
V3	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: aceite o grasa Temperatura: 100°C
V4	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: aceite o grasa Temperatura: 100°C
V5	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: aceite o grasa Temperatura: 100°C
V6	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: metanol Temperatura: 15-40°C
V7	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: aire comprimido Temperatura: 25°C

Continuación Tabla 17

Código	Tipo	Diámetro (in)	Especificaciones
V8	Proporcional	$\frac{3}{4}$	Especie: vapor Temperatura: 180°C Presión: 80 psig C _v : 0.33
V9	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: vapor Temperatura: 180°C Presión: 80psig
V10	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: vapor Temperatura: 180°C Presión: 80psig
V11	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: vapor de metanol Temperatura: 90°C Presión: 50 psig
V12	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: agua Temperatura: 25°C
V13	Solenoide	2	Especie: biodiesel/glicerina Temperatura: 90°C Presión: 50 psig
V14	Solenoide	1	Especie: biodiesel/glicerina Temperatura: 90°C
V15	Solenoide	1	Especie: biodiesel/glicerina Temperatura: 90°C
V16	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: glicerina Temperatura: 90°C
V17	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: biodiesel Temperatura: 90°C
V18	Solenoide	$\frac{1}{2}$	Especie: agua Temperatura: 25°C
V19	Solenoide	1	Especie: biodiesel Temperatura: 90°C
V20	Solenoide	$\frac{1}{2}$ "	Especie: glicerina Temperatura: 90°C


Las válvulas solenoides se encargarán de definir la dirección por la cual deben fluir los líquidos. La adquisición de estas válvulas es una tarea laboriosa, puesto que se debe corroborar que el material del cuerpo de la válvula y los empaques sean resistentes a los químicos con lo que estarán en contacto. También debe corroborarse que soportarán las presiones que se generarán durante el proceso. La Tabla 18 contiene las características generales de las válvulas adquiridas, sin embargo éstas cambian dependiendo del fluido con el que estará en contacto, de acuerdo a la Tabla 17.

Tabla 18. Características generales de las válvulas solenoides

Marca	ASCO	Imagen
Alimentación	120 VAC	
Salida	N/A	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Cuerpo de bronce • Asiento de buna • Conexión 1/2" NPT • Temp. Max. 82° C • Presión 0-125 psi 	

La válvula proporcional adquirida es electroneumática, lo que quiere decir que necesita aire comprimido para su funcionamiento. La Tabla 19 contiene las características de la válvula proporcional que mejor cumple con los requerimientos de la válvula V8, según la Tabla 17.

Tabla 19. Características de la válvula proporcional adquirida

Marca	ASCO	Imagen
Alimentación	24 VDC	
Salida	4-20 Ma	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Control de flujo proporcional a la señal de mando. • Normalmente cerrada. Se cierra cuando hay pérdida de energía. • Ensamblada en la fábrica. • Linealidad 5%. • Histéresis < 1% • Presión máxima: 240 psi. 	

f. Especificaciones de instrumentación. Con base a la Ilustración 24 se elaboró la Tabla 20, donde se muestra la instrumentación que se necesita en cada equipo para llevar a cabo la automatización.

Tabla 20. Instrumentación necesaria en cada equipo de la planta de biodiesel


Localización	Instrumento	Justificación	Especificaciones
T1	Transmisor de temperatura	Mantener temperatura constante	Set point: 70°C Rango control: 65-75°C Rango de instrumento: 10 – 110°C
	Transmisor de presión (tubería vapor)	No exceder presión de vapor dentro de la chaqueta	Set point: 15psig Rango de control: 13 – 17psig Rango de instrumento: 0 – 80psig
	Transmisor de humedad	Establecimiento del tiempo de calentamiento de la materia prima hasta reducir humedad	Valor decisivo: 0.5% Rango de instrumento: 0 – 35%
	Transmisor de nivel	Detección de nivel mínimo de aceite para continuar proceso	Tipo: puntual Localización: fondo del tanque Longitud: 18"
T2	Transmisor de nivel	Agregar la cantidad de materia prima indicada por el usuario	Tipo: continuo Rango de instrumento: 0 – 60L Longitud: 29"
T3	Transmisor de nivel	Alimentación de cantidad adecuada de metanol	Tipo: continuo Rango de instrumento: 0 – 40L Longitud: 24"
T5	Transmisor de temperatura	Mantener temperatura constante	Set point: 60°C Rango control: 55-65°C Rango de instrumento: 10 – 90°C

Continuación Tabla 20

Localización	Instrumento	Justificación	Especificaciones
T6	Transmisor de temperatura	Mantener temperatura constante	Set point: 60°C Rango control: 55-65°C Rango de instrumento: 10 – 90°C
	Transmisor de humedad	Establecimiento del tiempo de calentamiento de biodiesel hasta reducir humedad	Valor decisivo: 500ppm (0.05%) Rango de instrumento: 0 – 35%
	Transmisor de conductividad	Detección de interfaz agua-biodiesel	Valor decisivo: 0.2µS Rango de instrumento: 0 – 2x10 ⁶ µS
T7	Transmisor de pH	Obtención de glicerina neutra	Valor decisivo: 7 Rango de instrumento: 0 – 14

Los sensores de temperatura adquiridos para el tanque de materia prima y el reactor son tipo RTD con su transmisor 4 – 20 mA incorporado.

Tabla 21. Descripción de los sensores de temperatura

Marca	Eurotherm-Barber Coleman	Imagen
Alimentación	14-53 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Vástago de 18" de largo • Precisión: 0.10% • Temperatura máxima: 260° C • Diámetro de vástago: 0.250" • Material vástago: Acero inoxidable 316 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Conexión a proceso: 1/2" • Cabeza protectora de conexiones de aluminio a prueba de explosiones. • Incluye transmisor de temperatura dentro de la cabeza de protección. 	


Los transmisores de presión adquiridos son de la marca TEL-TRU. Éstos, al igual que toda la instrumentación adquirida, se alimentarán con 24 V DC. Se adquirió este tipo de sensor de presión para las tuberías de vapor y para el reactor.

Tabla 22. Descripción de los sensores de presión

Marca	TEL-TRU	Imagen
Alimentación	10 – 30 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de presión: 0-33 PSI • Precisión: 0.15% • Housing de acero inoxidable • Span ajustable • Conexión al proceso: ½" NPT macho • Material: Acero Inoxidable 316 	

En el caso de los sensores de humedad, la marca VAISALA MMT162 resultó ser la mejor opción cotizada entre las pocas que se encontraron.


Tabla 23. Descripción de los sensores de humedad

Marca	VAISALA MMT162	Imagen
Alimentación	10 – 30 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de humedad en unidades AW. • Rangos de temperatura: -20 a 80 °C. • Housing de transmisor: plastic PPS • Conexión a proceso: ½" 	

Para los sensores de conductividad y pH, es importante notar que son de tipo modular, es decir, para obtener la medición de la conductividad o pH de una


sustancia, es necesaria la celda y el analizador. La celda está en contacto con el medio y es la encargada de transmitir una señal eléctrica en función del valor del pH o conductividad medida. El analizador recibe esta señal y la procesa. El resultado de la conversión es transmitido al PLC en el rango 4-20 mA.

Tabla 24. Descripción del analizador de conductividad y pH

Marca	ABB	Imagen
Alimentación	14-53 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor para sensores de conductividad de 4 electrodos. • Auto diagnóstico de celda y transmisor. • Atenuación de señal ajustable. • Amplio display con indicación de conductividad y una segunda señal programable en temperatura, señal de salida o señal de entrada • Housing de aluminio • Protección Nema 4X E IP65 	


La celda de conductividad se encarga de medir la variable de interés en el fluido. Los contactos sumergidos en el fluido son de acero inoxidable por lo que no habrá problema alguno con el sensor, siempre y cuando el fluido no supere los 82° C.

Tabla 25. Descripción general de la celda de conductividad

Marca	ABB Modelo TB454	Imagen
Alimentación	Alimentado desde el analizador	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de 4 electrodos para rangos de conductividad baja/alta. • Compensación de temperatura integrada • Rango de conductividad: 0 – 2,000,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ • Sensor sumergible con conexión al proceso de 1" NPT • Material del sensor: Ryton. 	

La celda de pH es muy similar a la celda de conductividad. Los materiales de fabricación del cuerpo son los mismos, solo que la variable de medición es el pH del líquido. En la Tabla 26 se pueden observar las características de la celda.

Tabla 26. Descripción general de la celda de conductividad

Marca	ABB Modelo TX551	Imagen
Alimentación	Alimentado desde el analizador	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Compensación de temperatura integrada. • Sensor sumergible con conexión al proceso de 1" NPT. • Material del sensor: Ryton. 	


El sensor de nivel capacitivo realiza la medición del nivel del tanque utilizando la capacitancia generada entre el vástago del sensor y las paredes de tanque. Es por este motivo que el tanque debe ser de acero inoxidable o algún metal. En la Tabla 27 se resumen las características del transmisor de nivel capacitivo.

Tabla 27. Descripción del transmisor de nivel capacitivo

Marca	Dwyer Instruments	Imagen
Alimentación	12 – 35 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Largo de vástago 24” para aceite filtrado y 29” para tanque de etanol. • Precisión: $\pm 0.25\%$ • Span ajustable • Conexión a proceso: $\frac{3}{4}$” NPT macho • Material: acero inoxidable 316 • Rango de temperatura: -40 a 121° C • Presión máxima: 100psi 	

El sensor de nivel puntual utiliza nuevamente el concepto de capacitancia para medir el nivel en un tanque. La idea es que existe un valor de conductividad entre la punta del sensor y las paredes del tanque. Este valor se ve afectado por la presencia del líquido, que es a su vez perceptible para el sensor. Así es como este sensor determina el nivel del tanque.

Tabla 28. Descripción del medidor de nivel puntual

Marca	Dwyer Instruments	
Alimentación	12 – 240 VAC/DC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Largo de vástago 18" • Rango de temperatura: -40 - 121°C. • Presión máxima: 365 psi • Tipo de Switch: DPDT • Material del vástago: 316SS, cubierto de PVDF. • Tiempo de respuesta: 0.2 segundos, ajustable en un rango de 0-60 segundos. 	

g. Dimensionamiento de la capacidad del PLC y componentes eléctricos. En la Tabla 29 se detallan los actuadores catalogados como señales de salida y la cantidad de señales que se necesitan. La Tabla 30 muestra las señales digitales de entrada, siendo dos en total. La Tabla 31 muestra las señales analógicas de entrada. Estas señales están en un rango de 4 - 20 mA e indican la medición del sensor. La Tabla 32 muestra que únicamente se necesitan dos señales analógicas de salida y son precisamente para posicionar las válvulas proporcionales.

Tabla 29. Inventario de señales digitales de salida

Señales digitales (Salida)	Cantidad
Centrífuga	1
Bomba dosificadora	2
Bomba de desplazamiento positivo	4
Motor mezclador tanque biodiesel	1
Válvulas	20
Alarma de emergencia visual	1
Señal visual operación del sistema	1
Señal visual de advertencia	1
Total	31

Tabla 30. Inventario de señales digitales de entrada

Señales digitales (entrada)	Cantidad
Sensor nivel bajo	1
Stop emergencia	1

Tabla 31. Inventario de señales analógicas de entrada

Señales analógicas (entrada)	Cantidad
Sensor de conductividad	3
Sensor de temperatura	3
Sensor de humedad	2
Presión	3
Analizadores pH	2
Nivel continuo	2
Total	15

Tabla 32. Inventario de señales analógicas de salida

Señales analógicas (salida)	Cantidad
Válvula proporcional	2
Total	2

Para el manejo de las señales digitales de salida se necesita el módulo 1762-OB32T. El módulo 1762-IF4 se utilizará para el manejo de las señales analógicas de entrada. Por último, se necesita el módulo 1762-OF4 para las señales digitales de salida. En la Tabla 33 se toma en cuenta el consumo de cada módulo para determinar la corriente total que debe entregar el PLC.

Tabla 33. Carga de fuente de alimentación de MicroLogix 1200 – Cálculo de corriente del sistema

Número de catálogo		Especificaciones de consumo de corriente de bus		Corriente calculada para el sistema	
		a 5 VCC (mA)	a 24 VCC (mA)	a 5 VCC (mA)	a 24 VCC (mA)
1761-NET-AIC ⁽¹⁾		0	120 ⁽¹⁾	0	0
1761-NET-ENI ⁽¹⁾		0	100 ⁽¹⁾	0	0
2707-MVH232 o 2737-MVP232 ⁽¹⁾		0	80 ⁽¹⁾	0	0
Número de catálogo	N = Número de módulos (6 máximo)	A	B	n x A	n x B
1762 – IF4	4	40	50	160	200
1762 – OB32T	1	175	0	175	0
1762 – OF4	1	40	165	40	165
Total de módulos	6	Corriente total calculada:		375	365

(1) La corriente para el AIC + puede suministrarla el puerto de comunicaciones del controlador, o una fuente de 24 VCC externa. No se consume corriente desde el controlador cuando se usa una fuente externa. La corriente para una interfase de operador 2707-MVH232 o 2707-MVP232 MicroViews se suministra mediante el puerto de comunicación del controlador, si está conectada directamente.

En la Tabla 34 se observa que tanto el PLC 1762-L40BXB y el PLC 1762-L40AWA es capaz de suministrar la energía requerida por los módulos.

Tabla 34. Corriente de carga máxima del MicroLogix 1200

Número de catálogo	Corriente de carga	5 VCC	24 VCC	Corriente de detector de 24 VCC de usuario
1762-L24AWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
1762-L24BXB	Límite máximo	400 mA	350 mA	
1762-L24BWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
	Límite máximo	400 mA	350 mA	250 mA
1762-L40AWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
1762-L40BXB	Límite máximo	600 mA	500 mA	
1762-L40BWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
	Límite máximo	600 mA	500 mA	400 mA

3. Montaje de planta. La Tabla 35 muestra las ecuaciones de regresión lineal para la calibración de cada transmisor.

Tabla 35. Ecuación de calibración para cada sensor

Transmisor	Localización	Ecuación de calibración	Coefficiente de correlación
Temperatura	T1	$y = 0.0032x - 0.9607$	0.9997
	T5	$y = 0.0031x - 0.7615$	0.9998
Presión	T1	$y = 0.003x - 6.0422$	0.9442
	T5 (vapor)	$y = 0.0023x - 5.3608$	0.9975
	T5 (reactor)	$y = 0.0011x - 6.4894$	0.9963
Nivel	T2	$y = 0.0015x - 8.9088$	0.9994
	T3	$y = 0.0023x - 13.09$	1

A continuación se muestran unas ilustraciones del montaje de la planta. En cada una se señalan los equipos instalados.

Ilustración 26. Planta de biodiesel montada

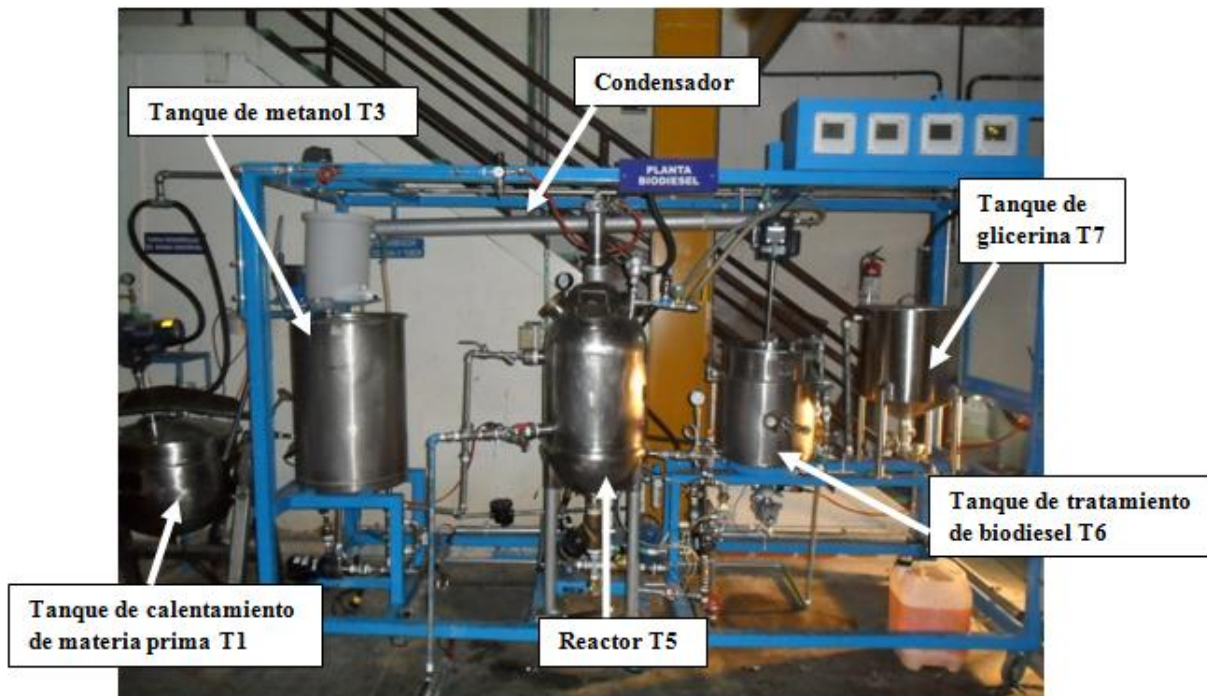


Ilustración 27. Filtro prensa de planta de biodiesel

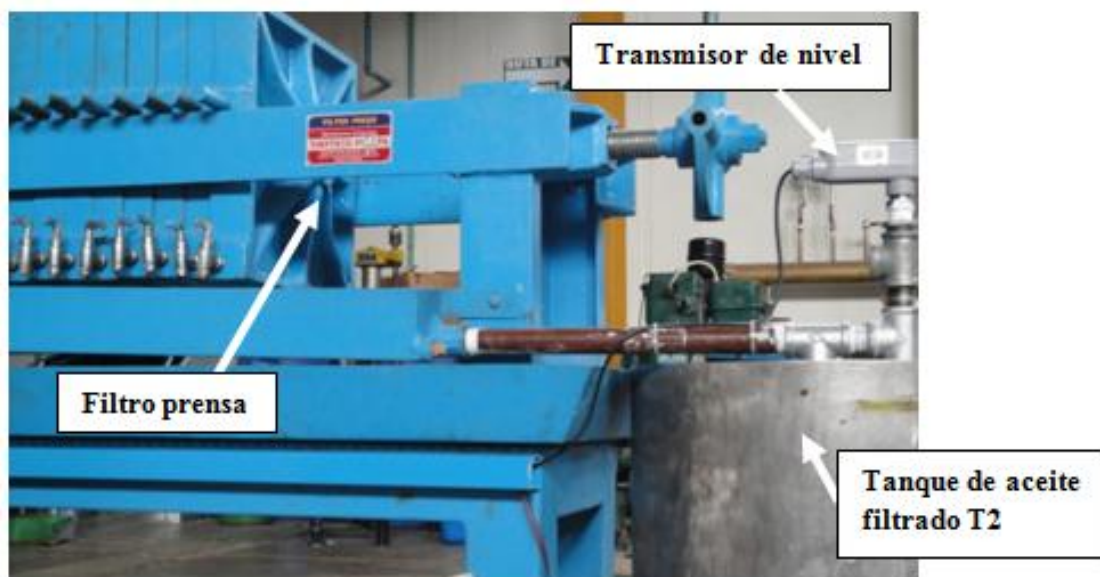


Ilustración 28. Bombas y agitadores de la planta de biodiesel



Ilustración 29. Instrumentación en el tanque de calentamiento de materia prima

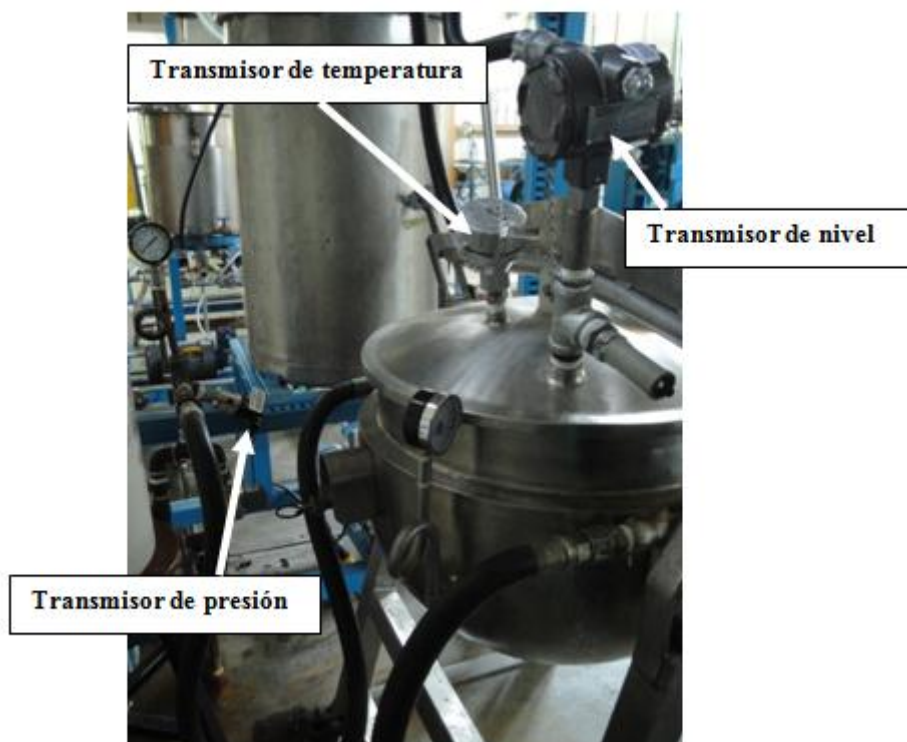


Ilustración 30. Instrumentación en el reactor y en el tanque de metanol

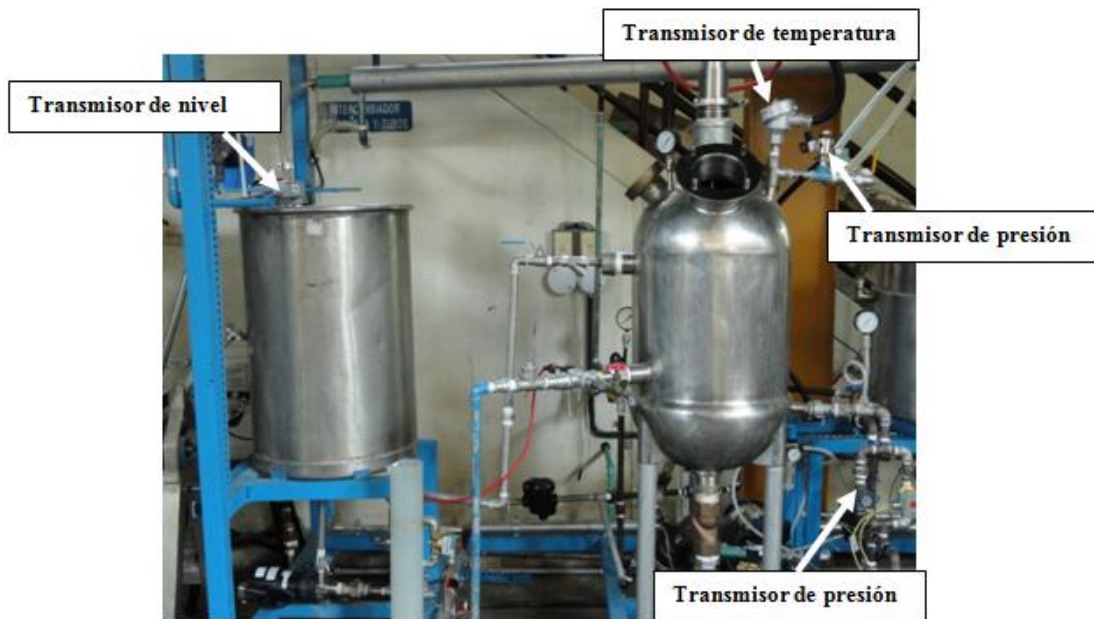


Ilustración 31. Válvulas e instrumentación en el tanque de tratamiento de biodiesel



En las ilustraciones 32 a 37 se presentan las pantallas desarrolladas con la finalidad de presentar la información al usuario.

Ilustración 32. Pantalla de inicio y presentación de proyecto

Departamento de Ingeniería Química

1966
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Excelencia que trasciende
DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Planta de Producción de Biodiesel

Megaproyecto: Automatización de Laboratorio de Operaciones Unitarias Fase III

Miércoles, 19 de Enero de 2011 10:44:21 a.m.

CONFIGURACIÓN DE PROCESO	PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	EQUIPO DE TRABAJO
TRATAMIENTO DE MATERIA PRIMA	TRATAMIENTO DE PRODUCTOS	CERRAR APLICACIÓN

Ilustración 33. Pantalla de configuración de proceso

Configuración de proceso

Abrir la receta a realizar:

Recetas	Parámetros	Restaurar	Cargar
Limpieza del sistema	Unit 1	Descargar	Guardar
Producción Biodiesel	Parámetros		

Elemento	Valor actual	Valor establecido	Comparación
Volumen materia prima	0	30	X
Pureza metanol	0	0.95	X
Pureza ácido	0	0.965	X
Pureza KOH	0	0.95	X
Concentración solución metóxido	0	0.5	X
Peso promedio triglicéridos	0	843	X
Densidad promedio aceite	0	0.9105	X
Peso promedio AGL	0	250	X
Peso molecular metanol	0	32.042	X
Densidad metanol al 96%	0	0.789	X
Relación metanol:AGL	0	2.25	X
Relación metanol:AGC	0	3	X
Peso molecular ácido sulfúrico	0	98.01	X
Densidad ácido sulfúrico	0	1.834	X

Definir los siguientes parámetros:

¿Desea filtrar el aceite?

Departamento de Ingeniería Química

Inicio	Producción Biodiesel	Equipo de trabajo	ALTO	Operación Manual
Tratamiento de materia prima	Tratamiento de productos	Cerrar aplicación		10:45:03 a.m. 19/01/20*

Ilustración 34. Pantalla de tratamiento de materia prima

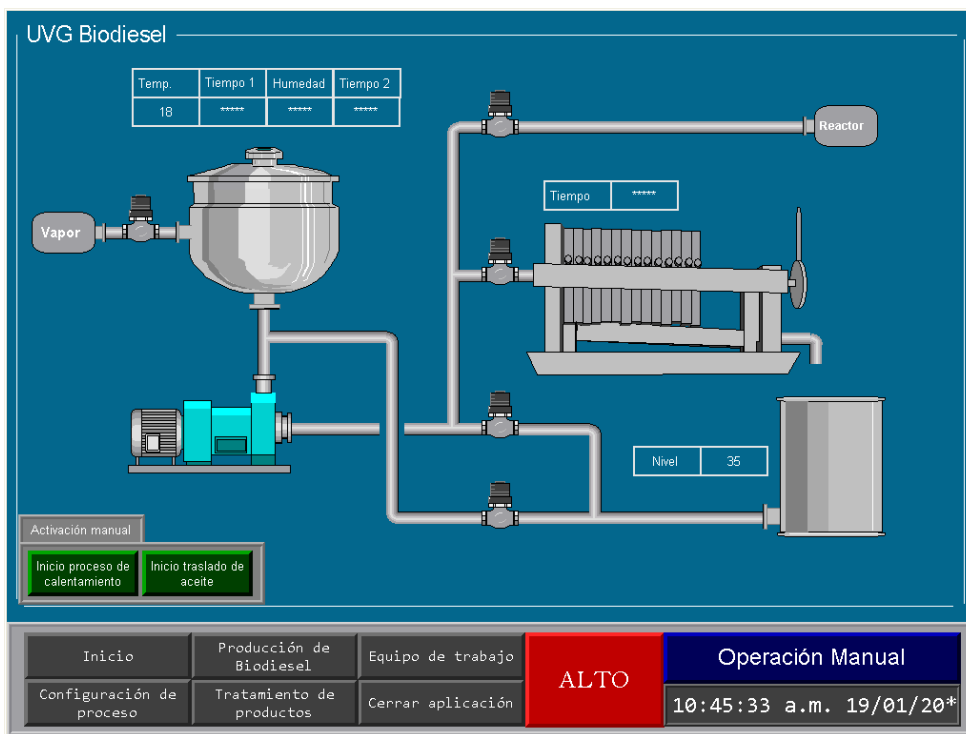


Ilustración 35. Pantalla de tratamiento de materia prima

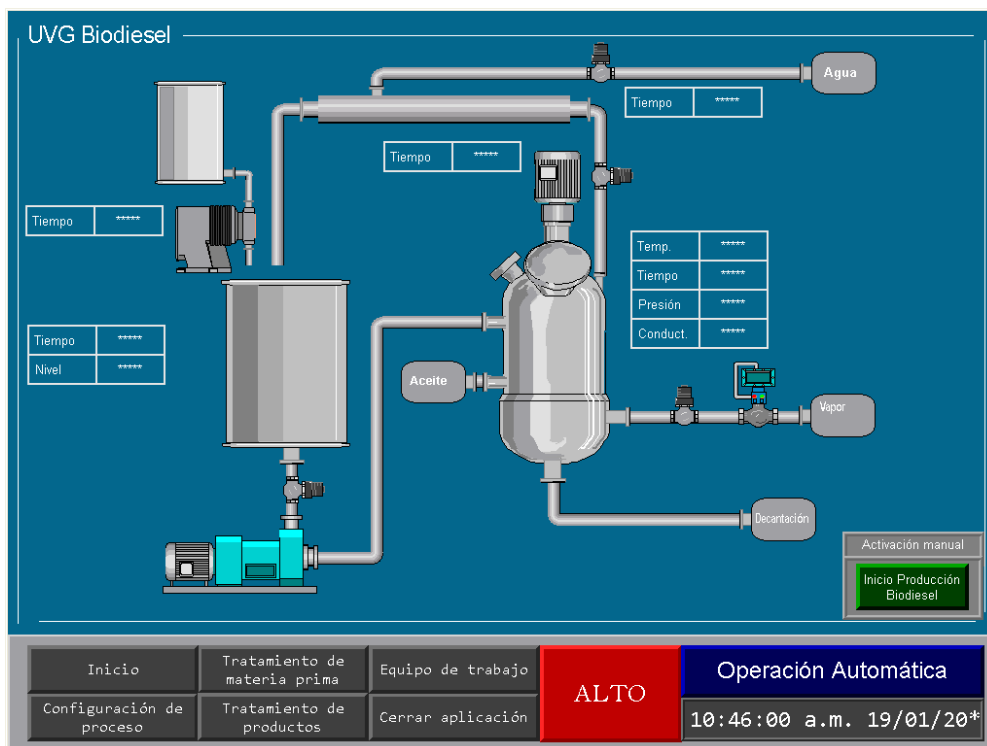


Ilustración 36. Pantalla de tratamiento de productos

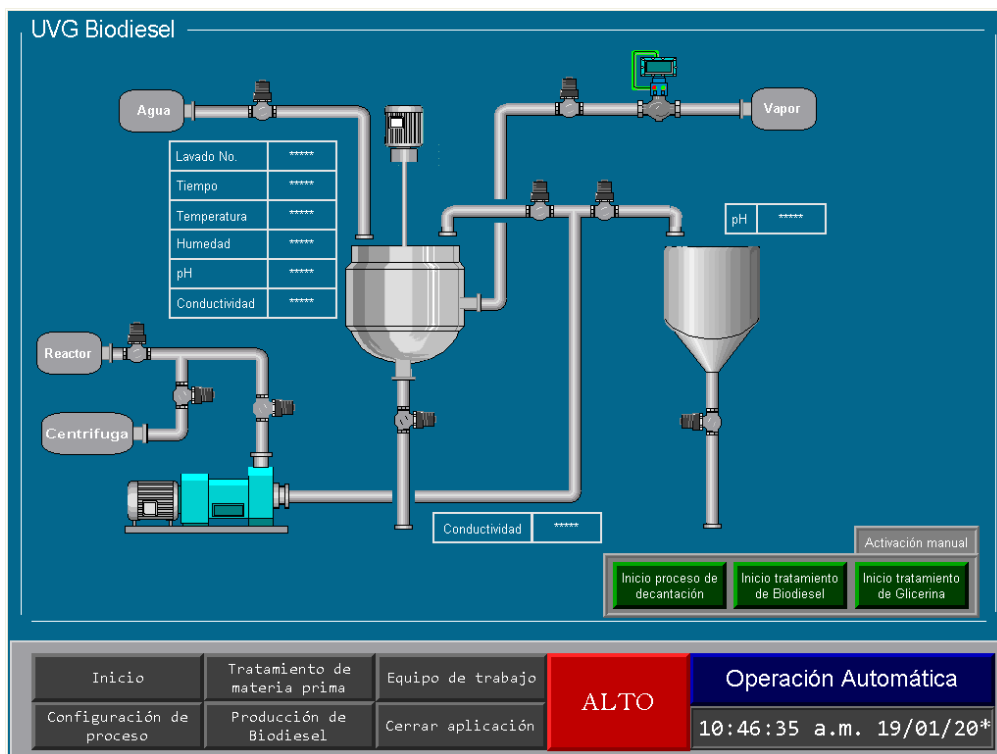


Ilustración 37. Pantalla en la que se especifican los integrantes del equipo de trabajo



E. Discusión

El proceso de producción de biodiesel de la planta piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG consta de siete etapas: calentamiento de la materia prima, filtración, pretratamiento con catálisis ácida, transesterificación con catálisis básica, separación de biodiesel y glicerina, tratamiento de biodiesel y tratamiento de la glicerina. El presente trabajo consistió en la experimentación, diseño, montaje, calibración de la instrumentación, programación y puesta en marcha de dicha planta.

1. Pruebas de laboratorio. Las pruebas de producción de biodiesel y tratamiento de éste y de la glicerina, a escala laboratorio, se realizaron con el fin de determinar las condiciones óptimas de operación, para utilizarlas en la automatización del proceso. Estas pruebas se realizaron con un aceite usado de cocina de 1.03% de acidez. En la Tabla 9 se muestran las condiciones que no presentaron problemas de formación de jabones, presencia de restos de aceite al finalizar la reacción, dificultad de separación del agua de lavado en el tratamiento del biodiesel o falta de homogeneidad en la glicerina. Estos problemas pueden presentarse por varios factores como la cantidad de metanol utilizada, la presencia de agua y el tiempo y temperatura de reacción. Por lo tanto, las relaciones de reactivos mostradas en la Tabla 9, junto con una temperatura de 60°C y un tiempo de reacción de 45 minutos, se consideran las condiciones óptimas para la producción de biodiesel.

Al finalizar la reacción, tanto el biodiesel como la glicerina tienen un pH básico debido a la presencia de hidróxido de potasio, por lo que debe dárseles tratamiento para disminuirlo hasta un pH neutro. En la Tabla 10 se presentan las condiciones para el tratamiento del biodiesel y de la glicerina, con las que se obtuvo los mejores resultados. En el caso del tratamiento del biodiesel, se obtuvo una disminución más práctica del pH con un lavado que con una neutralización ya que el agua, al poder agregarse en volúmenes mayores sin importar la exactitud, tiene la capacidad de eliminar eficientemente el hidróxido presente en el biodiesel. En el caso del tratamiento de la glicerina, agregando ácido sulfúrico, al 96.5% de pureza, en un porcentaje de 1.2% ($V_{\text{ácido}}/V_{\text{glicerina}}$) se logra la disminución del pH hasta un valor de 7. Los jabones resultantes de esta neutralización, deben separarse por decantación, obteniéndose una separación adecuada en 45 minutos de

reposo. Otros tipos de tratamiento de glicerina, como la destilación, no se consideraron dentro de este trabajo debido al alto costo que éstos representan.

2. Diseño de la planta. El diagrama de equipo mostrado en la Ilustración 24, se realizó con el fin de contar con una guía para el resto del trabajo. Con éste fue posible determinar la cantidad de equipo y una distribución de los mismos y de los arreglos de tubería a realizar.

En la Tabla 11 se muestran los equipos utilizados y se puede observar que no existe tanque ni bomba para el ácido sulfúrico. Esto se debe al alto riesgo que supone tener almacenado ácido en un área de trabajo y de constante movimiento. Sin embargo, debido a que el ácido es utilizado en cantidades pequeñas en la catálisis ácida y en la neutralización de la glicerina, se consideró que estos pasos pueden ser realizados manualmente, requiriendo un reinicio del programa al haberlo agregado.

Para cada equipo identificado, se determinó su capacidad por medio de balances de masa realizados en base a la capacidad del reactor de la planta (60L), asumiendo un 100% de conversión. La capacidad requerida se determinó tomando en cuenta que los tanques no pueden ser llenados a más de $\frac{3}{4}$ de su capacidad máxima y considerando un sobredimensionamiento del 10% para asegurar que se pueda tolerar variaciones que puedan existir en parámetros del proceso. Debido a la capacidad de la planta, para un aceite usado de cocina de 1.03% de acidez, se debe agregar un máximo de 30L. Este volumen de aceite y su contenido de acidez, fueron las bases para los balances de masa realizados. En la Tabla 14 se muestran las capacidades requeridas determinadas para cada tanque.

En el Laboratorio existen tanques que, aunque no sean de la capacidad que se determinó, pueden ser utilizados para reducir los costos del proyecto y facilitar la operación de varios batch consecutivos. En la Tabla 14 se muestran las capacidades de los tanques que sí estaban disponibles en el laboratorio para ser utilizados en la planta. En el caso del tanque T1, si no se desea realizar filtración no existe ningún problema con la capacidad del equipo disponible; sin embargo, si se desea filtrar, será necesario realizar dos batch de calentamiento. En el caso de los tanques T2 y T3, la capacidad de los tanques disponibles se podrá aprovechar para realizar otros batch de forma consecutiva. Para el tanque T6 se consideró que, de acuerdo a la Tabla 10, se debe agregar un volumen de agua igual a $\frac{1}{3}$ del volumen de biodiesel;

sin embargo, debido a que la capacidad del tanque disponible en el laboratorio es menor, se estableció que se deben realizar tres etapas de lavado, agregando agua en un 25% (v/v) del volumen de biodiesel.

Para los equipos que no se encuentran disponibles, se realizó el dimensionamiento y la selección de material. En la Tabla 14 se puede observar que solamente el tanque de metóxido T4 y el de glicerina T7, no estaban disponibles. La capacidad del tanque T4 que fue instalado es mayor a la determinada, pero esto puede aprovecharse para preparar suficiente solución de metóxido para varios batch. El tanque T7, se dimensionó de tal forma que cuando se realicen batch consecutivos, se pueda dar tratamiento a la glicerina cada dos batch.

Las especificaciones de tubería son necesarias tanto para su compra como para la determinación de la potencia de las bombas utilizadas. La longitud de la tubería se determinó en base a la distribución y arreglos planteados en la Ilustración 24 y tomando en cuenta el espacio disponible en el laboratorio para la planta. El diámetro de la tubería fue determinado simultáneamente con la determinación de la potencia de las bombas, para que la especie transportada no tardara más de 3 minutos en trasladarse de un tanque a otro y así el proceso no tarde más de 2 horas; esto, excluyendo el tiempo de la etapa de calentamiento de materia prima y la de tratamiento de biodiesel. La cantidad y tipo de accesorios, dependen del arreglo que se quiera dar a cada línea de tubería y de la cantidad de bypass a realizar para cada válvula automática.

Para la determinación de la potencia de las bombas, se tomó en cuenta la longitud de tubería, la cantidad y tipo de accesorios en cada línea y la rugosidad del material de la tubería. Se supuso una eficiencia del 85%, un valor aceptable de operación sin ser sumamente exigente; y se estableció una velocidad lineal de 1m/s, tomando en consideración que ésta es la velocidad lineal estándar para el agua. Las bombas B1 y B4 son de desplazamiento positivo ya que transportan fluidos viscosos. Por el contrario, la bomba B2 es una bomba centrífuga ya que transporta metanol, un fluido de baja viscosidad, aunque se recomienda que esta bomba sea de desplazamiento positivo debido a que se debe vencer la presión generada dentro del reactor para poder alimentarlo. La bomba B3 es dosificadora, ya que se desea tener un mejor control sobre la cantidad de catalizador agregado.

La potencia obtenida se aproximó a la potencia superior más cercana que se encuentra en el mercado, para asegurar que la bomba funcione correctamente a las condiciones del proceso. Sin embargo, en el laboratorio se encontraban disponibles unas bombas con potencias mayores a éstas, como se muestra en la Tabla 16, por lo que pudieron ser utilizadas para este propósito. A pesar de esto, se recomienda que las bombas utilizadas sean de la potencia adecuada para evitar gastos innecesarios de energía.

Las especificaciones de las válvulas automáticas se establecieron con base a condiciones superiores a las condiciones máximas de operación por seguridad y protección de las válvulas, ya que cualquier anomalía en el sistema, las válvulas deben ser capaces de actuar a favor de la seguridad del sistema y del usuario. Como se puede observar en la Tabla 17, la mayoría de las válvulas son solenoides, ya que debido a que la producción es batch no es necesario tener un control proporcional sobre el flujo de las especies al ser trasladadas de un equipo a otro. En el caso de las válvulas de vapor, sí es necesario un control no sólo por la temperatura que se necesita mantener constante dentro de los tanques sino también por la presión máxima que soporta la chaqueta de los mismos. Debido a que la presión del vapor en el Laboratorio es mayor a la que soportan las chaquetas de los tanques, se optó por colocar una válvula reguladora para que la presión de la línea de vapor no sea mayor a 15psig. En el caso del tanque de materia prima, se colocó una válvula solenoide debido a que no existe problema al operar a esa presión, y esta válvula solamente responderá a la señal de la temperatura dentro del tanque. Por otro lado, en el reactor y en el tanque de biodiesel se requiere una presión menor, por lo que se colocó una válvula proporcional que realizará el control con una diferencia de presión menor a la que lo habría sido si no se hubiera colocado la válvula reguladora.

A cada válvula automática se le asignó una válvula manual para realizar el bypass. La mayoría de éstas son de bola ya que, como se mencionó anteriormente, no se necesita un control de flujo. Pero, para el agua y el vapor, donde sí se puede controlar el flujo, son de tipo compuerta. Para las válvulas de agua automáticas, el programa tendrá registrado el flujo promedio del agua en la línea del Laboratorio, por lo que no se necesita una válvula de control como es el caso de la operación manual. Además, las válvulas de descarga instaladas en cada tanque, para realizar mantenimiento, son de tipo bola con el fin de tener una salida totalmente despejada para los residuos de la producción y del agua de limpieza.

Con el análisis del diagrama de equipo (Ilustración 24) se determinó la instrumentación requerida en cada etapa del proceso, específicamente en cada equipo, para realizar una completa automatización del proceso (Tabla 20) Dependiendo del lazo de control que se necesitaba para accionar cada válvula, se eligió el tipo instrumento. Para los sensores de nivel se identificó la característica de ser puntual o continuo, dependiendo de la necesidad de una señal digital o análoga para realizar el lazo de control. Las especificaciones de los sensores de temperatura y presión incluyen el valor que se pretende mantener constante en las diferentes etapas del proceso y un valor máximo para poder crear el lazo de control cuando la variable se encuentre en un valor fuera del rango de control. Para los sensores de humedad y conductividad, lo que se desea es que la medición de un valor específico genere el lazo de control y se realice la acción correspondiente; en el caso de la humedad, hasta alcanzar un valor específico puede continuar el proceso, y en el caso de la conductividad se realiza la decisión de la catálisis a realizar y la detección de interfaces. Las características de los sensores adquiridos se presentan en las Tablas 21- 28. (Salvador, 2010)

El proceso será controlado por un PLC, se decidió por la marca Allen-Bradley (AB) puesto que este fabricante tiene un convenio con la UVG en el cual se pacta que el equipo de automatización tiene un descuento considerable por ser una institución educativa. Adicional a esta facilidad de adquisición, también se encuentra información de esta marca con más facilidad. Estas dos características fueron determinantes para utilizar un PLC de la marca Allen-Bradley. (Salvador, 2010)

La marca Allen-Bradley tiene varios modelos de PLC, siendo la serie MicroLogix 1200 la que satisface los requisitos del sistema en cuanto a la capacidad del manejo de las señales necesarias para el control de la planta. En el manual de datos técnicos de los controladores programables MicroLogix 1200 se consultó la sección “Cálculos de expansión del sistema” en la que se indica los requisitos de corriente y alimentación eléctrica que debe satisfacer el PLC. Los resultados de corrientes se observan en la Tabla 33 y Tabla 34, siendo el modelo MicroLogix 1200 1762 L40-BXB el que mejor se acopla a las necesidades del sistema.

3. Montaje de planta. El montaje de la planta puede apreciarse en las Ilustraciones 26 – 31 donde se reúnen todos los incisos anteriores. Se puede observar que el filtro prensa se encuentra alejado del resto de la planta, esto debido a la falta de espacio para colocarlo en línea, después de la marmita y antes del

reactor. Debido a esto fue necesario utilizar más tubería y, además, realizar arreglos de la misma que podrían obstaculizar el paso. Además, se recomienda que, en caso la planta se encuentre contra la pared, se instale la tubería lo más accesible posible para facilitar el mantenimiento, como fue necesario en este caso. Se elaboró un modelo de la planta piloto en AutoCad (Apéndice, págs. 78 – 81) para futuras referencias de la instalación ideal de la tubería, en base a la distribución de equipo propuesta en este trabajo.

Para realizar la instalación eléctrica se debe hacer un listado de los accesorios necesarios, dentro de los cuales debe incluirse un gabinete para su acomodamiento. Este gabinete contendrá el PLC y sus módulos de expansión, guardamotores, contactores, relés, seccionador, fuente de 24 V, bornera, un flipón y un botón tipo hongo para emergencia. Todos los elementos mencionados anteriormente deben estar montados sobre un riel DIN. El detalle de la instalación eléctrica se puede consultar en el trabajo de Graduación de Byron Salvador llamado *Automatización de la planta de producción de biodiesel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala*, realizado en el 2010.

Antes de hacer funcionar la planta, se debe calibrar la instrumentación y comprobar el funcionamiento de las válvulas, bombas y los sensores. Se recomienda que la calibración de la instrumentación sea realizada antes de instalarla para tener la posibilidad de realizar las calibraciones a escala laboratorio, como en el caso de los sensores de temperatura, conductividad y humedad. Los transmisores de presión y de nivel sí deben ser calibrados en su ubicación final, ya que dependen precisamente de las condiciones de donde sean instalados, es decir de la presión de la línea de tubería del sistema y de las dimensiones de los tanques, respectivamente.

La calibración de los sensores es indispensable para el correcto funcionamiento del sistema, puesto que en función de estos valores se deben activar o desactivar los componentes en determinada etapa. Es importante mencionar que la calibración es un proceso lento y los datos se deben tomar una vez la variable de interés se encuentre estable. Los equipos de medición tales como los transmisores de presión ya vienen precalibrados de fábrica, es decir que estos transmisores transmiten 4 mA en el punto mínimo del rango a medir y 20 mA en el punto máximo. A pesar de esto, es indispensable corroborar experimentalmente el funcionamiento del sensor. La señal transmitida puede verse afectada por diversos factores, como por ejemplo el

ruido eléctrico, o bien el medio de transmisión puede tener un valor de resistencia mayor al esperado. Es por este motivo que se deben corroborar experimentalmente las mediciones y realizar ajustes si fuese necesario. Los equipos como los sensores de nivel tienen un rango de operación ajustable. El procedimiento para el ajuste de este rango lo especifica el fabricante en el manual de operación del equipo. En general, se puede observar en la Tabla 35 que la calibración de los sensores tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1, lo que indica un comportamiento lineal, tal como lo especifica el fabricante para cada uno.

Para la calibración de los sensores de temperatura RTD, se tomó como referencia la medición aportada por un termómetro de mercurio. Tanto el RTD como el termómetro se sumergieron en agua y la temperatura se incrementó gradualmente. La importancia de la correcta calibración de los RTD es que miden la temperatura, que es la variable que se controlará utilizando lazos PID.

El comportamiento experimental del transmisor de presión del tanque de calentamiento de materia prima (T1) no es estrictamente lineal, lo que sugiere una mala calibración. Por lo tanto, es necesario realizar una recalibración más cuidadosamente. Como se mencionó anteriormente, es necesario realizar la calibración lentamente, con el fin de que la variable de interés se estabilice y el dato transmitido por el sensor sea el correcto.

En el caso de los sensores de nivel, es importante hacer énfasis en que las lecturas se ven afectadas por la turbulencia del agua. Por lo tanto, en la programación se incluyó un temporizador con la finalidad de tener un período de tiempo para que el fluido se estabilice.

Al finalizar la instalación de todo el equipo, válvulas e instrumentación, se debe verificar el funcionamiento de cada elemento individualmente para reducir la posibilidad de que se presente un problema al correr el programa. En caso se detecte algún problema, se recomienda realizar la corrida por etapas, para detectar la ubicación y causa del problema.

El objetivo de crear una interfaz gráfica es presentar al operador, de una forma amigable, toda la información necesaria para monitorear la ejecución del proceso. Para este proyecto se diseñaron las pantallas introducción, configuración de proceso, tratamiento de materia prima, producción de biodiesel, tratamiento de

productos e integrantes del proyecto. Las distintas pantallas en este proyecto contienen todos los componentes y el valor de las variables que se ven involucrados en cada etapa del proceso. El motivo del diseño de varias pantallas es no saturar de información al operador y así tener un mejor control del sistema.

En la pantalla “Configuración de proceso”, Ilustración 33, se muestran las variables que están involucradas en la producción de Biodiesel y los valores de las variables que están predeterminadas. El objetivo principal de esta pantalla es que el usuario pueda modificar el valor de las variables, obteniendo así un proceso abierto a experimentación. La pantalla “Tratamiento de materia prima”, Ilustración 34, se utiliza para visualizar todos los componentes que están involucrados en el subproceso de tratamiento de aceite y traslado de aceite hacia el reactor. En “Producción de biodiesel”, Ilustración 35, se visualiza la etapa principal del proceso, donde se lleva a cabo la transesterificación de los ácidos grasos. En la pantalla “Tratamiento de productos”, Ilustración 36, se pueden visualizar las etapas de separación y tratamiento de biodiesel y glicerina. Por último las pantallas “Introducción” e “Integrantes”, Ilustración 37, muestran información general acerca del proyecto.

En la interfaz gráfica, el operador también recibe mensajes que le indican qué hacer en determinado momento. Por ejemplo, en la etapa de pretratamiento con catálisis ácida, el operador recibe la notificación de agregar cierta cantidad de ácido, determinada por el programa mismo. Por medio de la interfaz gráfica el operador puede controlar manualmente la activación de todos los componentes del sistema o bien activar las etapas que se deben ejecutar. En caso de emergencia el operador puede detener la ejecución del proceso presionando el botón “ALTO”.

La programación del proceso se puede consultar en el trabajo de graduación de Byron Salvador llamado *Automatización de la planta de producción de biodiesel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala*, realizado en el 2010.

VIII. COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO

A. Diseño

1. Investigación teórica general. Se investigó acerca de la columna de extracción líquida-líquida para tener un conocimiento general de esta operación unitaria y su funcionamiento. Una vez definida la propuesta de automatización, se investigó acerca de fundamentos teóricos del equipo a utilizar en la operación unitaria a automatizar.

2. Propuesta de automatización. Se definió y delimitó, en conjunto con el departamento de Química General, los parámetros y requerimientos de la automatización a realizar en la columna de extracción líquido-líquido.

3. Elaboración del algoritmo del proceso. Se definió un algoritmo del proceso que muestra los pasos que se siguen durante el proceso. A partir de este algoritmo se pueden identificar condiciones especiales y dependencias entre los procesos que se tienen que llevar a cabo.

4. Variables a medir en el proceso. Una vez definida la propuesta de automatización se procede a determinar las variables que se deben medir en el proceso. Teniendo en cuenta estas variables, se determina si son de tipo discreto o continuo, para facilitar la selección del equipo de control y sus entradas/salidas.

5. Dependencias y condiciones. Se realizó una lista de condiciones que se deben cumplir para que pueda entrar a funcionar cada actuador y las dependencias que existen entre los actuadores y las variables, y con otros equipos utilizados en la automatización.

6. Selección del equipo de control. Con base a la propuesta de automatización y de las variables a medir, se procede a elegir un sistema de control que sea versátil y capaz de cumplir con los requerimientos de automatización. El sistema de control, a su vez, delimita las opciones a elegir en los sensores a utilizar en la medición de variables y en los actuadores necesarios para la automatización.

7. Selección y cotización del equipo electrónico y materiales. De acuerdo a la elección del equipo de control, se seleccionaron los sensores y

actuadores requeridos para la automatización y se realizaron distintas cotizaciones del equipo de control, teniendo en cuenta la cantidad y tipo de variables a medir. Las cotizaciones de los sensores se realizaron con base a las sustancias químicas con las que entran en contacto y con las señales de control deseadas para cada medición. Además, se realizaron cotizaciones del material eléctrico necesario para la instalación del equipo electrónico. Estas cotizaciones se presentan para ser revisadas y escoger la mejor opción, para luego realizar las órdenes de compra.

8. Cálculo eléctrico. Se realizaron todos los cálculos de corrientes, voltajes y potencia para cada equipo, lo que permitió dimensionar la fuente de 24 VDC que se necesitaría utilizar, así como la protección y los distintos accesorios a utilizar en las salidas.

9. Instalación de los sensores, actuadores y el sistema de control. Se llevó a cabo el montaje de los sensores y actuadores en sus respectivas ubicaciones dentro del proceso. También se llevó a cabo el diseño y cableado de las señales de control y potencia para la automatización. Se hizo el diseño, montaje y cableado del gabinete de control a donde van todas las salidas y entradas, así como la alimentación principal del sistema de control.

10. Programación del sistema de control y configuración de la interfaz gráfica. Con base al algoritmo que define el funcionamiento de la columna de extracción líquido-líquido, se realizó un programa para el PLC para controlar el sistema con base a los sensores y actuadores que lo conforman. Además, se programó una interfaz gráfica que permite un control de manera manual o automático de la columna de extracción líquido-líquido.

11. Calibración y operación. Se realizaron pruebas para calibrar los sensores en el rango de medición a utilizar y también para comprobar su funcionamiento.

B. Resultados

1. Investigación teórica general. Se logró comprender el funcionamiento de una bomba dosificadora de membrana y también la importancia de la utilización de un variador de frecuencia. Además, se logró comprender cómo es utilizada la

columna de extracción líquido-líquido y su funcionamiento, para poder realizar la automatización de la mejor manera posible.

2. Propuesta de automatización. Se formuló una propuesta con base a lo investigado y lo que se creía necesario para lograr la automatización del módulo de la columna de extracción. Luego, la propuesta fue enviada al director del Departamento de Ingeniería Química con el objetivo de que fuera revisada y se llegara a un acuerdo.

Se hicieron las respectivas revisiones y modificaciones para obtener la propuesta que se muestra a continuación.

Se implementaron las siguientes funciones en la columna de extracción líquido-líquido:

1. Control de las dos bombas, para regular la velocidad del flujo tanto del ácido acético como del éter.
 - a. Utilizando el modo externo de cada bomba.

2. Control del motor del oscilador, a una velocidad dada por el usuario.
 - a. Utilizando un variador de frecuencia.

3. Medición de la conductividad
 - a. Del ácido acético, éter, refinado y extracto

4. Medición de nivel
 - a. Del ácido acético y éter, para que el usuario no trabaje con las bombas en vacío.

5. Interfaz visual a través del computador, para que el usuario pueda controlar de forma sencilla la columna de extracción líquido-líquido.
 - a. Modo automático, para que el usuario mire el funcionamiento de la columna sin necesidad de ingresar parámetros.
 - b. Modo manual, para que el usuario pueda manipular la columna a como le convenga.

3. Elaboración del algoritmo del proceso. A continuación se listan los pasos del algoritmo para la automatización de la columna de extracción líquido-líquido.

Paso 1

- a. Menú principal
- b. Inicio

Paso 2

- a. Se muestra la concentración obtenida de ácido acético.
- b. Si es mayor a 50% se indica que no se puede continuar.

Paso 3

- a. Si la concentración es menor o igual al 50% se pregunta al usuario si se quiere un llenado predeterminado o que especifique.

Paso 4

- b. Preguntar al usuario si se quiere agitación o no.
- c. Si se quiere agitación, permitir la elección de velocidad entre 4 opciones (25%, 50%, 75%, 100%).

Paso 5

- a. Permitir al usuario el bombeo del 10% de éter.
- b. Preguntar si se formó la interfaz.

Paso 6

- a. Si se formó la interfaz, permitir la elección de velocidad de flujo de entrada para el éter.

Paso 7

- a. Mostrar la apertura predeterminada de la válvula en la parte inferior y mostrar la opción de modificarla.

Paso 8

- a. Mostrar la concentración final en el balón de destilación.
- b. Indicar al usuario que debe prender el calentador y abrir la válvula del condensador.

Paso 9

- b. Realizar el proceso hasta que el usuario decida.
- c. Parar el proceso si ya no hay éter o ácido acético.

4. Variables a medir en el proceso. Se determinó que las variables críticas a medir en este proceso son las que se muestran en la Tabla 36. De acuerdo al tipo de medición necesaria para cada variable, se determinó la interpretación electrónica de la señal que se necesitaría y se clasificó como una entrada o salida.

Tabla 36. Clasificación de las variables del proceso

Variable a medir y controlar	Cantidad	Tipo de variable cuantitativa	Interpretación electrónica	Entrada/Salida
Nivel mínimo	2	Discreta	Digital	Entrada
Conductividad	4	Continua	Analógica	Entrada
Velocidad de bombeo	2	Continua	Analógica	Salida
Prendido/apagado bombas	2	Discreta	Digital	Salida
Velocidad del oscilador	1	Continua	Analógica	Salida
Prendido/apagado del oscilador	1	Discreta	Digital	Salida
Apertura de la válvula inferior	1	Continua	Analógica	Salida
Válvula condensador	1	Discreta	Digital	Salida

A partir de la Tabla 36, se ordenaron las entradas de acuerdo a la interpretación electrónica, como se puede observar en la Tabla 37.

Tabla 37. Entradas del proceso

Variables de entrada	Tipo de entrada
Nivel mínimo del éter	Digital
Nivel mínimo del ácido acético	Digital
Conductividad del éter	Analógica
Conductividad del ácido acético	Analógica
Conductividad del refinado	Analógica
Conductividad del extracto	Analógica

De igual manera fueron reordenadas las salidas del proceso, como se observa en la Tabla 38.

Tabla 38. Salidas del proceso

Variables de salida	Tipo de salida
Encendido/apagado bomba éter	Digital
Encendido/apagado bomba ácido acético	Digital
Encendido/apagado variador de frecuencia	Digital
Encendido/apagado válvula condensador	Digital
Velocidad de la bomba de éter	Analógica
Velocidad de la bomba de ácido acético	Analógica
Velocidad del variador de frecuencia	Analógica
Apertura de la válvula inferior	Analógica

En la Tabla 39 se puede observar el resumen de todas las entradas y salidas del proceso, de acuerdo a su clasificación.

Tabla 39. Resumen de entradas y salidas del proceso

I/O	Digitales	Analógicas	Total
Entradas	2	4	6
Salidas	4	4	8

5. Dependencias y condiciones. A partir del algoritmo y de la clasificación de las variables del proceso, se realizó un análisis de dependencias y condiciones que facilitarán la programación del sistema de control.

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos anteriormente y que se debía utilizar tanto un modo automático como manual, las dependencias y resultados para cada actuador son los siguientes:

1. Bomba del ácido acético
 - a. Dependencias:
 - 1) Velocidad de bombeo.
 - 2) Alimentación.
 - b. Condiciones:
 - 1) No debe prender si la concentración es mayor al 50%.

- 2) No debe prender si se alcanzó el nivel mínimo.
- 3) En modo automático: No debe prender si no se ha confirmado la formación de la interfaz.

2. Bomba de éter

a. Dependencias:

- 1) Velocidad de bombeo.
- 2) Alimentación.

b. Condiciones:

- 1) No debe prender si la concentración es mayor al 50%.
- 2) No debe prender si se alcanzó el nivel mínimo.
- 3) En modo automático: Se prenderá por un tiempo determinado de acuerdo al tipo de llenado que se quiere.
- 4) En modo automático: No debe prender si la bomba de ácido acético no está prendida.

3. Válvula proporcional

a. Dependencias:

- 1) Apertura elegida.

b. Condiciones:

- 1) Ninguna.

4. Válvula On/Off

a. Dependencias:

- 1) Alimentación.

b. Condiciones:

- 1) No se debe abrir si no se elige la recuperación de éter.

5. Variador de frecuencia

a. Dependencias:

- 1) Velocidad de agitación.
- 2) Alimentación.
- 3) Señal de control de paro y arranque.

b. Condiciones:

- 1) No debe prender si no está prendida la bomba de éter.
- 2) En modo automático: No debe prender si no se ha confirmado la agitación.

- 3) En modo automático: No debe prender si no se ha confirmado la formación de la interfaz.

6. Motor

a. Dependencias:

- 1) Velocidad determinada por el variador de frecuencia.

b. Condiciones:

- 1) No debe prender si no se ha prendido el variador de frecuencia.

6. Selección del equipo de control. Se seleccionó el controlador 1763-L16AWA con las especificaciones mostradas en la Ilustración 38 y la Ilustración 39.

Ilustración 38. Características de las entradas digitales del controlador

Digital Inputs

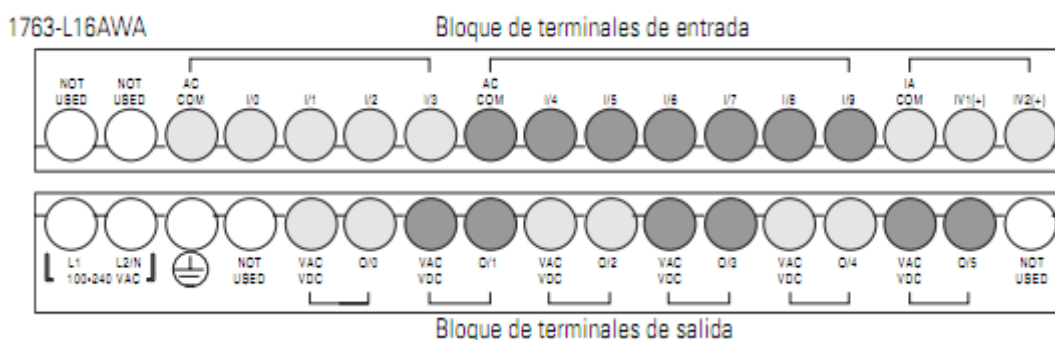
Description	1763-L16AWA
On-State Voltage Range	79...132V ac
Off-State Voltage Range	0...20V ac
Operating Frequency	47...63 Hz

Ilustración 39. Características del controlador seleccionado

Número de catálogo	Descripción				Puertos de com.
	Alim. eléc. de entrada	Entradas digitales	Entradas analógicas	Salidas digitales	
1763-L16AWA	120/240 VCA	(10) 120 VCA	(2) entradas de voltaje 0...10 VCC	(6) relé Todas individualmente aisladas	(1) RS-232/485 combinado (aislado) (1) Ethernet

El controlador tiene las entradas y salidas mostradas en la Ilustración 40.

Ilustración 40. Características de la base del controlador seleccionado.



Los módulos de entradas y salidas se seleccionaron tomando en cuenta los resultados obtenidos en secciones anteriores, como se muestra en la Ilustración 41.

Ilustración 41. Módulos de expansión elegidos

Calculating the Current for Expansion I/O

Catalog Number ⁽¹⁾	n Number of Modules	Device Current Requirements (max)	
		at 5V DC (mA)	at 24V DC (mA)
		1762-IF4	40
1762-OF4	40	165	

De acuerdo al apéndice G del manual de usuario del PLC Micrologix 1100 y tomando en cuenta los resultados anteriores para determinar las entradas y salidas a utilizar, se realizó el cálculo de potencia para comprobar el funcionamiento de este sistema, mostrado en la Tabla 40.

Tabla 40. Cálculo de potencia de los módulos seleccionados

Módulo	Corriente (mA)	Voltaje (VDC)	Potencia (Watts)
1762-IF4	50	24	1.2
	40	5	0.2
1762-OF4	165	24	3.96
	40	5	0.2
Total:			5.56

A través de los cálculos mostrados en la Tabla 41, se comprobó la validez de esta configuración utilizando la base 1763-L16AWA:

Tabla 41. Cálculos de validación de la configuración elegida

	A	B	C	D	E	B-C	D-E
1763-L16A WA	Voltaje (VDC)	Corriente soportada (mA)	Corriente demandada (mA)	Potencia soportada (Watts)	Potencia demandada (Watts)	Corriente restante (mA)	Potencia restante (Watts)
	5	800	80	20.8	5.56	720	15.24
	24	700	215			485	

7. Instalación de los sensores, actuadores y el sistema de control. De acuerdo a los cálculos realizados anteriormente y a las recomendaciones del fabricante, se realizó el cableado para los sensores con las especificaciones mostradas en la Tabla 42.

Tabla 42. Cableado del proceso

Equipo	Cantidad	Cable utilizado
Sensor de nivel mínimo	2	18 AWG (Rojo, Negro Azul)
Celda de conductividad	4	UTP (4 pares)
Transmisor de conductividad	4	22 AWG
Velocidad de bombeo	2	18 AWG (Rojo, Negro)
Prendido/apagado bombas	2	TSJ 3x12
Velocidad del oscilador	1	18 AWG (Rojo, Negro)
Prendido/apagado del oscilador	1	18 AWG (Rojo, Negro, Azul)
Apertura de la válvula On/Off	1	18 AWG (Rojo, Negro)
Conexión PLC	1	TSJ 3x12

Los sensores de nivel mínimo se instalaron en los recipientes de éter y de ácido acético correspondientes, asegurando que cumplieran su función en la posición que se eligió. De igual manera, se colocó una celda de conductividad para cada uno de estos recipientes. Además, se colocó un tubo flexible para cubrir los cables de los sensores que quedaban fuera de la canaleta.

La válvula On/Off fue instalada con una tubería en paralelo para el control manual del agua y también se le colocó tubería flexible para los cables del sensor

expuestos. Para las bombas también se realizaron modificaciones de manera que el convertidor MP-100 de cada bomba fue colocado debajo de la estructura que soporta las bombas y sobre el soporte.

Se hizo una estructura de soporte para evitar que el cableado que llega al gabinete de control entre en contacto con otra tubería. Además, se separó el cableado de potencia y el cableado de control en distintas canaletas.

En el gabinete se instalaron dos luces piloto que indican el nivel mínimo en el recipiente de éter y/o en el de ácido acético, los cuatro transmisores de conductividad, y un botón de paro de emergencia. Todo se encuentra identificado con etiqueta.

8. Programación del sistema de control y configuración de la interfaz gráfica. Para la programación del sistema de control, que en este caso se basa en la utilización de un PLC, se utilizó la herramienta de software RSLogix 500 Pro. El programa se realizó utilizando el lenguaje de programación en escalera, basado en los resultados anteriores del algoritmo, así como en las dependencias y condiciones.

Para la interfaz gráfica se utilizó la herramienta de programación FactoryTalk View Studio para desarrollar la aplicación que permite el control del proceso. El HMI se configuró de manera que se tenga una pantalla principal que permita elegir el modo de operación, ya sea manual o automático. El modo manual deja la libertad al usuario de utilizar la columna de extracción de la manera que desee, siempre tomando en cuenta la lógica programada en el PLC. El modo automático permite al usuario utilizar la columna de manera secuencial de acuerdo al algoritmo del proceso establecido. Para ambos diseños se utilizó una imagen de la columna de extracción y botones para manejarla.

9. Calibración y operación. Los sensores de nivel no requieren de calibración debido a que se utilizan para indicar únicamente un nivel mínimo. Sin embargo, se realizaron pruebas llenando los contenedores de éter y ácido acético con agua, para comprobar que funcionaran correctamente en la posición que fueron instalados.

Se calibró las celdas de conductividad junto con los transmisores, utilizando dos sustancias con conductividad conocida: agua desmineralizada y una solución patrón. Además, se configuró cada transmisor con los parámetros correctos para su funcionamiento adecuado, junto con la celda de conductividad.

Para el variador de frecuencia fue necesario reconfigurar los parámetros P036-038, A051-A054, A095 y A122 de manera que éste pudiera ser controlado a través de una señal digital de arranque y paro; y una señal analógica que permitiera variar la frecuencia.

C. Discusión

La obtención del algoritmo de automatización fue el primer paso en el desarrollo de este proyecto, ya que en él se definen todos los requerimientos de la automatización y sirve de base para todo lo que se debe hacer posteriormente. Con base al algoritmo es posible plantear una propuesta de automatización que indique el equipo que se automatizará y que permita llegar a un acuerdo tanto del cliente, en este caso el departamento de Ingeniería Química, como al integrador, en este caso los estudiantes del Megaproyecto.

Teniendo la propuesta de automatización y el algoritmo que describe paso a paso el proceso que se lleva a cabo en la columna de extracción líquido-líquido, se procedió a realizar un análisis que permitió la clasificación de las variables críticas del proceso. La clasificación consistió en identificarlas como variables discretas o continuas, para determinar el tipo de señal que se debía manejar para cada variable. Es decir, una variable de tipo discreto se traduce a una señal digital, la cual puede estar presente o ausente. Por otro lado, si se tiene una variable de tipo continua, entonces se requiere una señal analógica que represente la variación continua de la variable a medir. Estas variables debían ser medidas e interpretadas por el sistema de control, que en este caso se basó en la utilización de un controlador de lógica programable (PLC).

Después de tener identificado el número de variables digitales y analógicas, el siguiente paso fue cuantificar el número de entradas y salidas necesarias para determinar el sistema de control más adecuado. Se determinó que, en general, se tienen 2 entradas digitales y 4 entradas analógicas; y a su vez se tienen 4 salidas digitales y 4 salidas analógicas. Teniendo en cuenta esto, se consideraron las

distintas opciones para elegir el controlador de lógica programable y los módulos de entradas y salidas necesarios. Afortunadamente, en el departamento de Ingeniería Química se había hecho un pedido de PLCs con fines ajenos a este proyecto, de donde se presentó la opción de utilizar el controlador 1763-L16AWA. Se analizó la opción de utilizarlo y se investigó acerca de este modelo.

El controlador 1763-L16AWA, de la serie Micrologix 1100, tiene 16 I/Os: 9 entradas digitales y 5 salidas. Además, tiene 2 entradas analógicas de voltaje. Luego de observar detenidamente las diferencias con los otros modelos y los beneficios y ventajas que este modelo pudiera tener sobre los demás, se determinó lo siguiente: el controlador 1763-L16AWA se alimenta con 120-240 VAC, sus entradas digitales manejan un voltaje de 120 VAC, las salidas son a relé y tienen un común individual por salida. Esta última característica permite versatilidad, ya que se puede tener una combinación de salidas AC y DC debido a que el común de cada salida es individual. Además, para la alimentación no es necesario comprar una fuente de 24 VDC que tenga un amperaje suficiente para alimentar al PLC y que también alimente sensores y actuadores.

Utilizando el PLC mencionado, se cubre el requerimiento de 2 entradas digitales, 3 salidas digitales VAC y 1 salida digital VDC. Por lo tanto, adicionalmente se eligió el módulo de 4 entradas analógicas 1762-IF4 y el módulo de salidas analógicas 1762-OF4, cubriendo todas las I/Os del proyecto. A este controlador se le puede agregar cualquier combinación de 4 módulos de I/Os, por lo que si en algún futuro se realizan modificaciones a la columna de extracción líquido-líquido, queda la posibilidad de utilizar 2 módulos más en cualquier combinación, además de las 7 entradas digitales VAC, las 2 entradas analógicas de voltaje y 1 salida a relé disponibles en la base.

Por último, se realizó el cálculo de potencia consumida por los módulos, de acuerdo al apéndice G del Manual de Usuario del Micrologix 1100, para comprobar que la elección de módulos es válida para este PLC.

La elección de los sensores inició consultando empresas internacionales a través de sus sitios web, pero rápidamente se desechó esta idea y se prefirió trabajar con empresas nacionales. Esta decisión se realizó debido a las características especiales que debían presentar los sensores, incluyendo entre ellas el montaje específico que se debía hacer para cada sensor. Por lo tanto, trabajar con una

empresa nacional que pudiera visitar las instalaciones y ofrecer una solución específica, fue la mejor opción.

Los sensores fueron elegidos de acuerdo a las características tanto químicas como electrónicas que se necesitaban para desarrollar el proyecto. Comenzando por los sensores de nivel, se necesitaba que estuvieran hechos de un material resistente a ácidos débiles y al éter, ya que estos van a ser colocados dentro de los recipientes que contienen a dichas sustancias. En cuanto al aspecto electrónico, se requirió que fueran discretos (On/Off), debido a que se necesita conocer únicamente si la sustancia se encuentra en el nivel mínimo, y capaces de manejar 120VAC, debido a que únicamente se tienen entradas digitales AC.

La medición de conductividad se realiza mediante una celda de medición, que va inmersa en la sustancia a medir, y el transmisor que analiza la señal de la celda y tiene una salida de control.

Las bombas utilizadas en el proceso de la columna de extracción líquido-líquido cuentan con dos diales o perillas que permiten el ajuste tanto de la velocidad como la fuerza de bombeo. El modo externo se ve limitado a controlar la velocidad de bombeo y no permite controlar ninguna característica adicional. Para esto se utilizó el convertidor analógico digital MP-100, que utiliza una señal analógica de 4-20mA. Se tomó esta opción debido a que controlar la bomba utilizando el modo externo requería de un divisor/multiplicador de pulsos que usa como base pulsos de alta o baja frecuencia.

Adicionalmente, se tiene un variador de frecuencia Powerflex 40 M para controlar el motor de 230 Volts, 60 Hertz y ½ Hp. Originalmente se contaba con un motor de una fase que era utilizado para el agitador de la columna. Debido a que no era posible encontrar un variador de frecuencia monofásico, el motor fue reemplazado por el mencionado anteriormente. Este variador de frecuencia fue instalado y configurado para controlar el motor utilizando el display y el potenciómetro que se encuentra en su panel. También fue instalado un guardamotor y un contactor con una botonera para accionarlo. Por lo tanto, se decidió utilizar una salida de control digital para encenderlo y detenerlo de acuerdo a la configuración de control sin reversa a dos cables en modo SRC.

Para la válvula del condensador se eligió una válvula On/Off de 120VAC, 60 Hertz y 10 Watts la cual será controlada con una salida digital AC del PLC.

Teniendo los sensores, se prosiguió a identificar la mejor ubicación para colocarlos en el proceso y el procedimiento necesario para lograr la instalación de los mismos.

Para todas las señales digitales, sean AC o DC, se utilizó cable 18 AWG tomando en cuenta las recomendaciones del fabricante y el amperaje soportado por el cable. En las señales digitales se incluye: los sensores de nivel y las señales digitales del variador. Para las celdas de conductividad se utilizó cable UTP de 4 pares debido a que no se maneja ningún equipo con una potencia considerable que pueda inducir ruido en las señales de control.

Luego de haber seleccionado todo el equipo electrónico necesario para llevar a cabo la automatización se comenzó la programación del PLC tomando como base el algoritmo definido, las dependencias y las condiciones de cada equipo. Para esto se utilizó el software de programación RSLogix 500 Pro, el cual permite utilizar únicamente el lenguaje de programación en escalera.

La lógica del programa se basó en tener un escalón con varias condiciones exclusivas entre sí, que cierran o abren una salida digital. Esto se hizo para cada actuador. Además, se tienen escalones adicionales que actualizan las salidas analógicas y escalones con temporizadores para la secuencia automática. Los escalones que actualizan las salidas analógicas se ejecutan solo cuando el actuador, al que pertenecen las salidas, se encuentra prendido. De esta manera se evita que la ejecución del programa sea innecesariamente tardada cuando ciertos actuadores no estén funcionando.

VIII. TORRE DE ENFRIAMIENTO

A. Diseño

El diseño de este trabajo de graduación tuvo varias etapas que en conjunto permiten obtener la correcta automatización de la torre de enfriamiento. A continuación se presentan las secciones que componen el diseño tanto del área química como el área electrónica de este trabajo.

1. Área química

a. Determinación de los sensores a utilizar. Esto se logra realizando primero corridas para saber algunas propiedades de la mezcla aire-agua y así poder solicitar los sensores con todas las características y requerimientos necesarios. A partir de las pruebas realizadas se obtuvo mínimos y máximos de operación del equipo y con esto se procedió a solicitar los sensores a usar.

Las variables que se deseaban controlar durante el proceso son:

- Nivel de agua dentro de la torre de enfriamiento: Se solicitaron dos sensores de nivel, los cuales permitieron controlar que el agua enfriada no rebalse el equipo y que se mantenga a un nivel que no afecte el funcionamiento de la bomba que posee el equipo
- Temperatura del agua: Se tienen dos sensores RTD que permiten controlar el agua a la entrada y a la salida del equipo.
- Humedad relativa: Se tienen dos sensores que permiten controlar la humedad y temperatura del aire. Se usan dos sensores, esto debido a que el equipo puede trabajar con un flujo de aire tiro inducido y tiro forzado.
- Velocidad del aire: Se tienen dos sensores que controlan la velocidad a la que ingresa el aire que atraviesa el área de empaque de la torre de enfriamiento. También se tienen dos, porque el flujo de aire puede ser inducido y forzado.
- Presión de vapor: Se tienen dos manómetros que sirven para conocer la caída de presión del vapor que ingresa a la torre de enfriamiento a través del tubo Venturi.

- Flujo de agua: Se tienen tres válvulas On/Off en las tuberías que unen otros equipos con la torre de enfriamiento, estas tuberías son: destilación, evaporación y tanque de almacenamiento en la parte de afuera del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
- Flujo de agua fría: Se usa una válvula proporcional que permite controlar la cantidad de agua fría que se mezcla con el flujo de vapor, que resulta en el flujo de agua caliente.
- Flujo de vapor: Se usa una válvula de vapor que permite controlar el flujo de vapor necesario para obtener la mezcla con el agua fría que se desea utilizar.
- Flujo de agua caliente: Se usa un rotámetro para controlar el flujo, en galones por minuto, que ingresa a la torre y que requiere enfriamiento mediante un flujo de aire.

Se realizaron Bypass, que sirven para que se pueda operar el equipo en modalidad automática y en modalidad manual. Los Bypass se colocan en las tuberías donde se controla el flujo de agua y de vapor.

Se definieron los mínimos y máximos de operación para protección del equipo instalado y de los equipos que se encuentran unidos a la torre de enfriamiento.

A partir de las variables mencionadas anteriormente, se cotizaron los sensores que permitirían controlar dichas variables.

b. Diagrama del equipo con sensores. Se realizó un diseño propio del equipo en el cual se detalla la posición de los sensores, tuberías y equipos que se unen a la torre de enfriamiento, así como las especificaciones de operación a la cual se debe trabajar. Este diseño fue realizado usando Microsoft Visio.

El diagrama se realizó a partir de las variables que se deseaban controlar, mencionadas anteriormente. Se especificó el tipo de fluido que transporta cada tubería y las modificaciones que se debían hacer al equipo para que la instalación y funcionamiento de los sensores no generara datos falsos. Además, se agregaron dos válvulas para abrir y cerrar la tubería que une la torre de enfriamiento con el evaporador y con la torre de destilación. Esto con el fin de que cuando se apague la torre de enfriamiento, automáticamente se abra la válvula de alimentación del

evaporador, para evitar que exista una sobrecarga de presión y se destruya o modifique el condensador del equipo mencionado.

La Ilustración 43 muestra el diagrama detallado de la torre de enfriamiento, la cual posee cinco tuberías principales que son las que permiten que el equipo esté unido a la torre de destilación y al evaporador. Las cinco tuberías son:

1. Destilación: Sale del destilador y entra a la torre de enfriamiento.
2. Tanque de afuera: Sale del destilador y entra a la torre de enfriamiento.
3. Evaporador: Se une con el destilador y la torre de enfriamiento.
4. Vapor: Se junta con el destilador, ya que el destilador es alimentado de vapor por la caldera.
5. Agua fría: Se une con el destilador y el evaporador.

c. Procedimiento de uso del equipo. Se realizó un diagrama de flujo utilizando Microsoft Word. Fue necesario tomar en cuenta la Ilustración 44, de la sección de resultados, en la que se muestra el orden en que se debe realizar el procedimiento para el correcto funcionamiento del equipo en ambas modalidades.

Se colocaron las tareas en ese orden debido a la facilidad de obtención de datos. Sin embargo, en el transcurso de las pruebas algunas tareas pueden cambiar su orden, ya que esto depende del correcto funcionamiento de los sensores instalados en el equipo.

Con el diagrama se puede comprender lo que debe realizar el usuario u operador del equipo, para que funcione adecuadamente y que cumpla las necesidades que se requieren. El diagrama indica, además, el proceso para calcular el valor de las variables que se desean conocer, a partir de los resultados que se obtienen en la modalidad automática y en la manual.

Para utilizar el equipo, se debe saber que primero se deben obtener datos operando de forma manual y posteriormente operando de forma automática. De esta forma se pueden comparar los resultados para determinar si el programa genera los resultados que se esperan.

d. Obtención de la carta psicométrica a las condiciones de operación. La carta psicométrica es una herramienta que será de bastante utilidad para la automatización, ya que proporciona datos importantes a las condiciones de operación como entalpías, humedades, volúmenes, temperaturas, porcentaje de humedad, etc.

Conociendo dos de las variables de la carta psicométrica, se pueden determinar el resto. Por lo tanto, para la realización de la carta psicométrica a las condiciones del Laboratorio, se trabajaron distintas fórmulas que se encuentran relacionadas solamente por el porcentaje de humedad relativa y la temperatura de bulbo seco. En la Ilustración 42 de la sección de Resultados, se presenta la carta psicométrica corregida para las condiciones de operación. Esta carta será utilizada para la obtención de los parámetros del comportamiento de la mezcla agua/aire.

e. Diseño hoja de Excel para obtención de variables. Se realizó una hoja en Microsoft Excel que contiene todas las fórmulas que se necesitan para lograr una correcta automatización, proporcionando datos reales y curvas de equilibrio y operación.

f. Dimensionamiento de la torre de enfriamiento. Se realizaron mediciones de la torre de enfriamiento, para obtener los valores que se mantienen constantes para dicho equipo, sin importar que varíen las condiciones de operación. A continuación se presentan las dimensiones del empaque de la torre de enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG.

Tabla 43. Dimensiones de empaque torre de enfriamiento

Base	0.81 metros
Altura	1.3 metros
Profundidad	0.75 metros
Distancia entre empaques	0.02 metros
Cantidad de empaques	44

*Todos los datos presentados con anterioridad presentan una variación de 0.1 m, a excepción de la distancia de los empaques que es de 5×10^{-4} m.

g. Parámetros, fórmulas y dependencias de la mezcla agua/aire

Tabla 44. Listado de variables no constantes a controlar

VARIABLES NO CONSTANTES			
Variable a calcular	Descripción de variable	Fórmula a utilizar	Dependencias
Entalpía de salida del aire H_2G	Se debe usar la carta psicométrica de un sistema agua-aire, a temperatura húmeda y la humedad en bulbo seco y bulbo húmedo.	No se usa fórmula, ya que se usa la carta psicométrica.	-Humedad bulbo seco -Humedad bulbo húmedo -Temperatura húmeda
Humedad absoluta (Y2 del aire)	Se hace con el mismo procedimiento para calcular entalpía de salida de aire.	No se usa fórmula, ya que se usa la carta psicométrica.	-Humedad bulbo seco -Humedad bulbo húmedo -Temperatura húmeda
Cálculo del flujo de aire (G')	Se calcula a partir del área del ventilador y la velocidad obtenida por el sensor de velocidad.	$G' = uA_v$	-Velocidad del aire tanto en entrada como en salida. -Área empacada
Cálculo del flujo de aire seco (G's)	Se calcula a partir del flujo de aire G' y la humedad absoluta.	$G'_s = \frac{G'}{1 + Y_2}$	-Flujo de aire G' -Humedad absoluta y2
Cálculo del flujo de agua (L')	Calculado del rotámetro, que indica el caudal de salida de agua.	$L' = \frac{V_L}{t}$	-Volumen empacado -Tiempo
Pendiente curva de calibración	Se calcula a partir del flujo de agua y el flujo de aire seco. Se considera que la capacidad calorífica se mantiene constante.	$\frac{L'C_{AL}}{G'_s} = \text{pendiente curva}$	-Caudal -Capacidad calorífica del agua. -Flujo de aire seco
Cálculo de la entalpía de aire de entrada H'g1	Se calcula usando la curva de operación y la entalpía de salida del aire (H'g2)	$H'_{g1} = \frac{L'C_{AL}}{G'_s} (t_{L1} - t_{L2}) + H'_{g2}$	-Se usa con la curva de operación -Cambio de temperatura -Entalpía del aire en la salida

Continuación Tabla 44

VARIABLES NO CONSTANTES			
Variable a calcular	Descripción de variable	Fórmula a utilizar	Dependencias
Cálculo de la densidad del aire	Se asume que el aire tiene un comportamiento de gas ideal debido a que las presiones de operación son bajas.	$\rho = \frac{PM}{R(t_{w2} + 273.15)}$	-Peso molecular aire. -Temperatura agua -Constante r
Cálculo caída de presión sección empacada	Aplicación ecuación de Bernoulli. No hay pérdidas por fricción El coeficiente $g\Delta z/g_c = 0$ El coeficiente $W_s=0$ Usar manómetros	$\Delta P = \left(\frac{-\Delta u^2}{2g_c} \right) \rho$	-Depende del punto de referencia en el que se trabaje.
Cálculo de la presión del aire en la entrada de la torre	Se asume que el punto 2 de la torre se encuentra fuera de la misma, por lo que es la presión atmosférica. Usar un manómetro.	$\Delta P = P_1 - P_{atm}$	-Presión en el área empacada.
Cálculo de la difusividad del agua en el aire	Se busca en tablas la difusividad a la temperatura y presión normales y se les realiza una corrección de presión y temperatura.	$D_{AB}(t_{w2}, P_{atm}) = D_{AB}(25.9^\circ C, 101325 Pa) \left(\frac{t_{w2} + 273}{25.9 + 273} \right)^{3/2} \left(\frac{101325}{P_{atm}} \right)$	-Difusividad teórica. -Temperatura y presión de operación.
Cálculo del flux molar relativo (N_A)	Dato necesario para obtención de datos de la carta psicrométrica. Se asume presión de 1 atm. El valor de Z es la profundidad empacada de la torre.	$N_A = \frac{D_{AB} P_T}{R(t_{w2} + 273) Z} \ln \frac{P_T - P_1}{P_T - P_{atm}}$	-Cambios de presión. -Profundidad empacada. -Difusividad del agua en aire. -Temperatura agua en la salida.
Cálculo coeficiente de transferencia de masa (K_G)	Se calcula a partir del Flux molar y la caída de presión	$K_G = \frac{N_A}{ \Delta P }$	-Flujo molar -Caída de presión
Cálculo coeficiente de transferencia de masa (K_Y)	Se calcula a partir del coeficiente K_G y el peso molecular del aire.	$K_Y = K_G M_{aire}$	-Coeficiente de transferencia de masa K_G -Peso molecular del aire.

Continuación Tabla 44

VARIABLES NO CONSTANTES			
Variable a calcular	Descripción de variable	Fórmula a utilizar	Dependencias
Calcular el N_{tOG}	Se calcula a partir de la obtención del área bajo la curva de la gráfica realizada.		-Y' a distintas temperaturas -Entalpia equilibrio H^* -Pendiente e intercepto de la curva para obtener H' . -Área bajo la curva
Calcular el H_{tOG}	Se calcula utilizando los valores de flujo de Aire Seco (G's) y el coeficiente de Transferencia de Masa K_y	$H_{tOG} = G/K_y$	-Flujo de aire seco. -Coeficiente de transferencia de masa K_y .
Calcular la altura de transferencia de masa	Se calcula a partir de los valores N_{tOG} y H_{tOG}	$Z = H_{tOG} N_{tOG}$	- H_{tOG} - N_{tOG}
KWH Consumidos	Se calcula utilizando la potencia que posee la bomba de la Torre y el tiempo de utilización de la misma.	$kWh = P \cdot t$	-Tiempo de utilización del equipo.
Costo energético UVG	Se calcula usando el valor de KWH consumidos y el precio por KWH para la UVG.	$Costo = kWh \cdot C_{kWh}$	-Kwh consumidos

Tabla 45. Listado de variables constantes a controlar

VARIABLES CONSTANTES		
Variable a calcular	Descripción de variable	Fórmula a utilizar
Cálculo área del ventilador	Se asumen como diámetro la carcasa protectora del ventilador.	$A_v = \frac{\pi}{4} d_v^2$
Cálculo área empacada (a_v)	Se calcula usando la base y la altura empacada de la torre	$a_v = \text{base empacada} \times \text{altura empacada}$
Cálculo volumen empacado (v_v)	Se calcula a partir del área empacada y la profundidad.	$v_v = a_v \times \text{profundidad}$
Cálculo área interfacial (A)	Se calcula a partir del volumen y área empacada de la torre.	$a = \frac{a_v}{v_v}$
Valores constantes para usar en fórmulas	-Peso aire= 29 g/mol -Capacidad calorífica del agua= 4187Nm/kgK -Presión atmosférica: 101325 Pa	

2. Área electrónica

a. Investigación teórica sobre torres de enfriamiento. Para conocer el funcionamiento de la torre, se realizó una investigación teórica sobre torres de enfriamiento con comportamiento similar a la que se encuentra en la UVG.

b. Investigación sobre sensores y transmisores. La selección de los sensores se basó en la teoría investigada. Se realizó un listado de las características de cada tipo de sensor y, de acuerdo a esto, se buscó el sensor que fuera mejor para el proceso. Además, se operó la torre para observar su funcionamiento y para tomar rangos de operación de los diferentes parámetros.

c. Listado de entradas y salidas. Para obtener un listado de variables a monitorear se buscaron las ecuaciones usadas en el análisis del proceso de enfriamiento. Además, se observaron las diferentes entradas de agua que tiene la torre, así como el equipo que se utiliza para el funcionamiento de la misma, para obtener el listado de salidas a controlar.

d. Selección del PLC. Debido a la cantidad de módulos de expansión requeridos, se realizó un análisis de la potencia y corriente consumida por cada módulo para ver cuál PLC Micrologix de la marca Allan Bradley pudiera utilizarse para el proceso. Para esto, se utilizaron los manuales de los diferentes Micrologix y se buscó el PLC que pudiera utilizar, como mínimo, la cantidad de módulos especificados anteriormente.

e. Diseño del programa. Para el diseño del programa se elaboró un algoritmo del proceso usando el listado de sensores y actuadores obtenidos del inciso c, junto a los requerimientos del proceso, como el funcionamiento de la bomba de agua. A esto se agregaron las ecuaciones del proceso de enfriamiento para el programa de la interfaz gráfica.

f. Instalación y cableado de sensores y gabinete. Para la instalación de los sensores se usaron los manuales de cada sensor y, en base a las instrucciones de instalación, se colocaron en la torre en la posición óptima para obtener los datos requeridos. Además se cablearon los sensores de acuerdo a las instrucciones de cada sensor para tener una salida de 4-20mA para el PLC. El gabinete se instaló en la parte

frontal de la torre y en su interior se instalaron las borneras para conectar los sensores y el PLC y sus módulos de expansión.

g. Programación del PLC. La programación del PLC se basó en el algoritmo elaborado en el diseño del programa. Se utilizó el software de programación en lenguaje escalera de Allen Bradley RSLogix 500 Pro para el programa que se cargó en el PLC.

h. Programación interfaz gráfica. Se utilizaron las ecuaciones del proceso de enfriamiento y el algoritmo del diseño del programa para la elaboración del mismo y de la interfaz gráfica. Para la implementación del programa, se utilizó el software Factorytalk View Machine Edition de Allen Bradley.

i. Calibración y ajuste. La calibración y ajuste de los diferentes sensores y del proceso en el programa, se logró haciendo pruebas con la torre y haciendo mediciones con cada sensor. Después se realizaron correcciones y modificaciones al programa y a los transmisores de los diferentes sensores, para obtener el programa final.

B. Resultados

A continuación se presenta la carta psicométrica corregida de acuerdo a la altura y presión a la que se encuentra el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG.

Ilustración 42 . Carta psicométrica corregida a la altura y presión de operación del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

CARTA PSICOMÉTRICA CON SUS PROPIEDADES CORREGIDAS

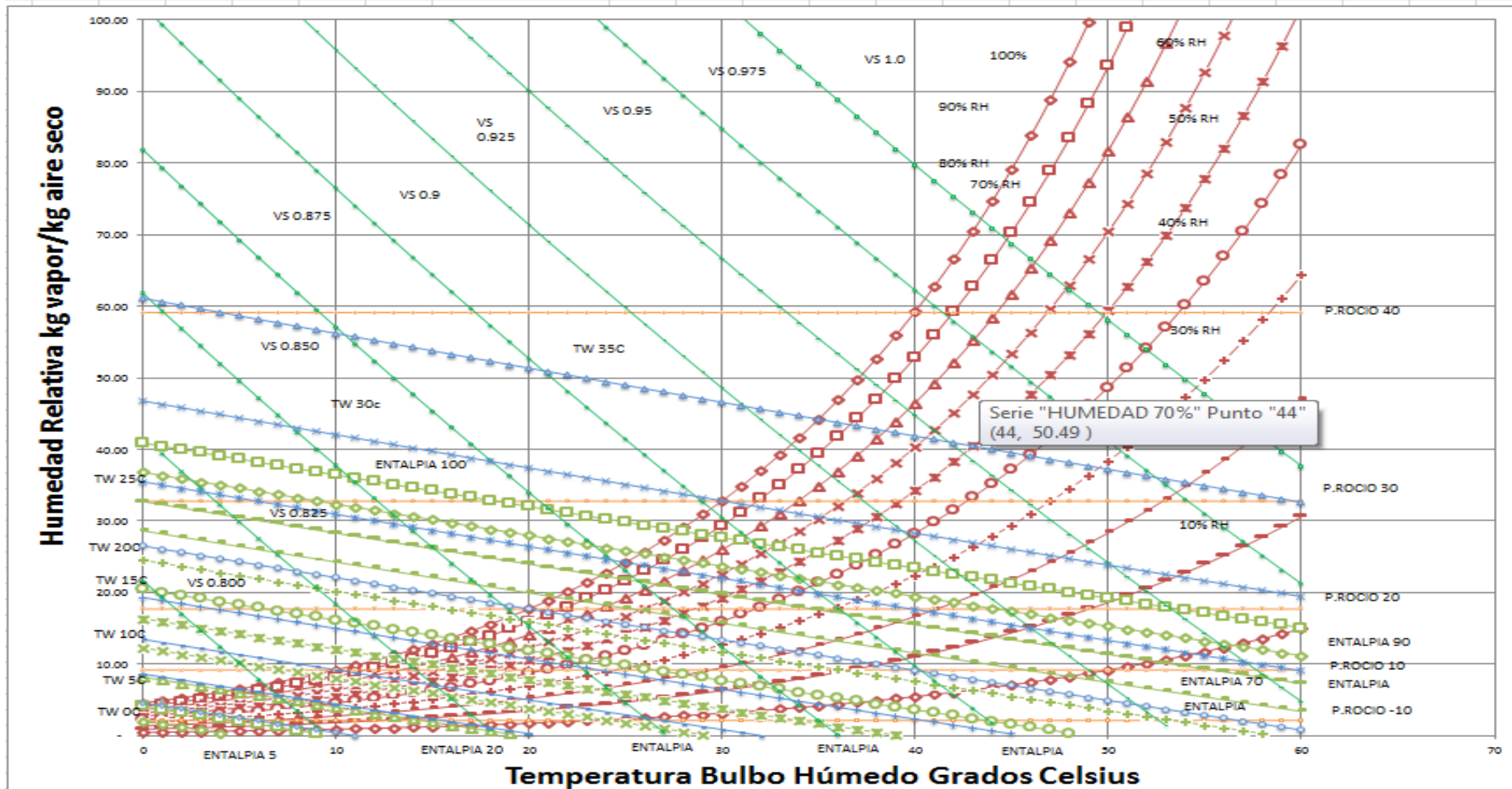


Ilustración 43. Diagrama detallado de la torre de enfriamiento

DIAGRAMA Y CONEXIÓN DE EQUIPOS A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

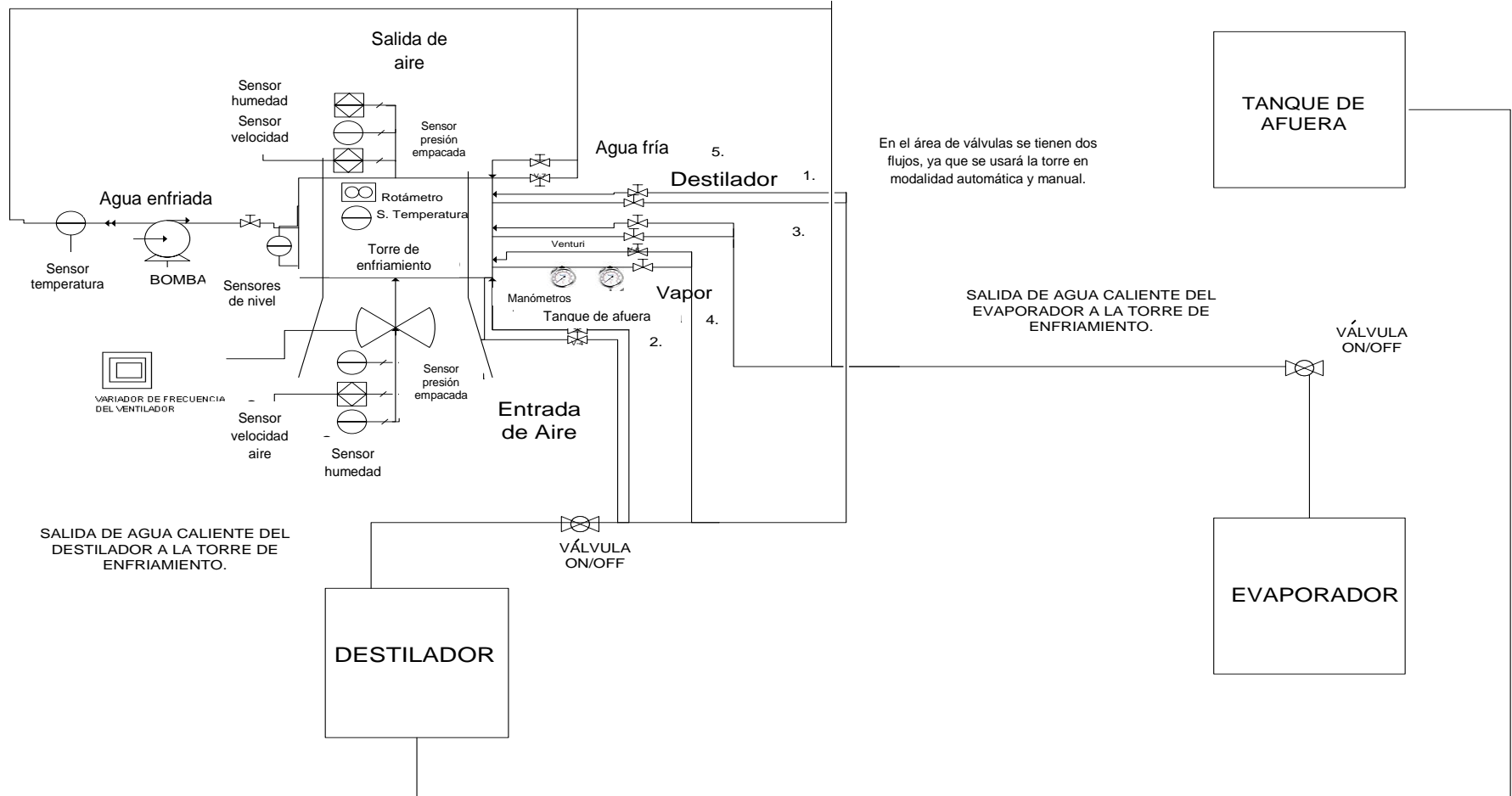
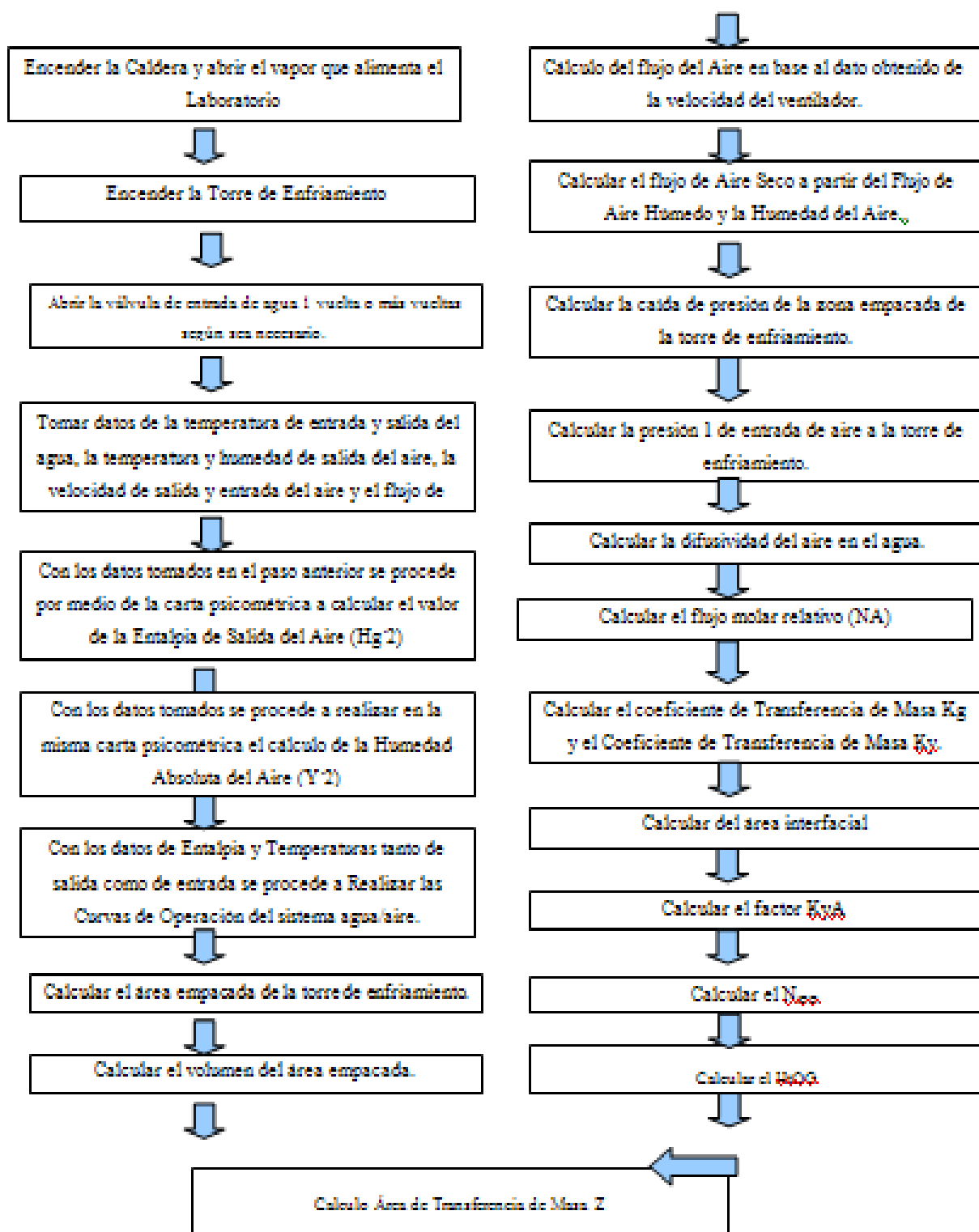


Ilustración 44. Procedimiento del funcionamiento torre de enfriamiento tanto manual como electrónico



Nota: Teniendo los dos valores Z para ambas modalidades se hará una comparación por medio de un cálculo de la variación de error.

1. Parámetros a controlar. De acuerdo a las especificaciones de la torre y con las ecuaciones del proceso de enfriamiento del módulo de asesoría técnica, se decidió monitorear los parámetros mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 46. Parámetros de la torre de enfriamiento a monitorear en el proceso

Parámetro	Ubicación
Temperatura	Entrada y salida de agua de la torre
Temperatura	Entrada y salida de aire de la torre
Presión	Entrada y salida de aire de la torre
Presión	Tubo de venturi de la entrada de vapor
Humedad relativa	Entrada y salida de aire de la torre
Velocidad	Entrada y salida de aire de la torre
Flujo	Entrada de agua a la torre
Nivel	Mínimo y máximo de agua de la torre

De acuerdo a las entradas de agua que existen en la torre y al equipo usado en el proceso de enfriamiento, se decidió controlar lo mostrado en la siguiente tabla:

Tabla 47. Equipo a controlar en el proceso de la torre de enfriamiento.

Equipo	Ubicación
Válvula	Entrada de agua del tanque exterior, torre de destilación, evaporador y agua fría.
Válvula	Vapor de agua.
Motor de bomba de agua	Motor de la bomba de agua colocado en el tanque de la torre donde se almacena el agua enfriada.
Variador de frecuencia	Variador de frecuencias del ventilador en la torre usado para el enfriamiento.

2. Investigación sensores y transmisores. Para decidir qué sensores se debían utilizar se obtuvieron rangos de operación de la torre para cada parámetro y características de tubería o formas de conexión de los sensores a la torre. A continuación se ven los resultados obtenidos de cada parámetro de la torre, seleccionado para medición:

a. Temperatura de agua, flujo de agua y válvulas de agua. Para los sensores que se utilizaron para la medición de temperatura y flujo de agua, y para la selección de las válvulas de entrada de agua, se utilizó la siguiente tabla de información de la torre:

Tabla 48. Parámetros del agua en la tubería de la torre de enfriamiento

Parámetro	Rango o valor usado en la torre
Temperatura de manejo del agua	25 – 51.6 °C
Tamaño de rosca de tubería	½" NPT
Presión del agua	0 – 100 PSI
Flujo de agua	5-9 Gal/min

Por el rango pequeño de temperatura a manejar, se decidió usar un RTD que pueda enroscarse a la tubería que pudiera manejar la presión y flujo mostrado. Para el flujo de agua se decidió utilizar un rotámetro de un rango de flujo bajo (10 gal/min máximo) con conexión de tubería de ½". Las válvulas de agua se escogieron de tipo On/Off que cumplan las características anteriormente mostradas.

b. Nivel de agua. Para el nivel de agua se tomaron las mediciones de nivel de agua que se manejan en la torre y la temperatura manejada en el tanque de agua, mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 49. Información sobre el tanque de almacenamiento de agua de la torre

Parámetro	Rango o valor usado en la torre
Temperatura de manejo de agua	25 – 35 °C
Alturas mínima para el manejo de la bomba de agua	0.20m desde la parte baja de la torre
Altura máxima del tanque de agua	0.40m desde la parte baja de la torre

Para el nivel de agua se escogió trabajar con switches de posición, debido a que solo es necesario saber el estado puntual mínimo y máximo.

c. Temperatura, presión, humedad y velocidad de aire. Para la medición de estos parámetros se realizó otra tabla para recopilar los rangos de operación usados en el proceso de enfriamiento.

Tabla 50. Información sobre el aire circulante de la torre

Parámetro	Rango o valor usado en la torre
Temperatura de aire	25 – 60 °C
Diferencia de presión de aire (P - Patm)	0.01 – 1.00 PSI
Velocidad de aire	0.0 – 50.0 m/s

Para la velocidad de aire de la torre, se decidió utilizar un sensor para medir el flujo de masa con transductor, para convertir el flujo de masa en medición de velocidad. Para la presión de aire se utilizó un sensor capacitivo diferencial de bajo rango para obtener la diferencia de presión en la torre. Para la humedad relativa se usó un sensor de humedad relativa que incluye un RTD para medir la temperatura del aire.

d. Presión de vapor en tubo de Venturi. Para seleccionar los sensores de presión a utilizar en el tubo de Venturi que alimenta el vapor a la torre de enfriamiento, se utilizaron los parámetros mostrados a continuación:

Tabla 51. Información del tubo de Venturi utilizado en la torre

Parámetro	Rango o valor usado en la torre
Presión manejada	0 – 100 PSI
Temperatura manejada	100 – 125°C
Tamaño de conexión	3/8" NPT

Para la presión del tubo de Venturi se utilizó un sensor capacitivo para medir la presión en ambos extremos del tubo con una conexión de 3/8" a tubería.

El conjunto de los sensores escogidos para la automatización del proceso son los siguientes:

Tabla 52. Listado de los diferentes sensores a utilizar

Variable a medir	Tipo de sensor a usar
Temperatura de agua	RTD
Flujo de agua	Rotámetro
Presión de vapor	Manómetro
Presión de aire	Sensor de presión capacitivo
Humedad y temperatura de aire	Sensor de humedad relativa con RTD para temperatura
Velocidad de aire	Sensor de flujo de masa
Nivel de agua	Switch de nivel
Válvula de entrada de agua	Válvulas On/Off y válvulas proporcionales

3. Listado de entradas y salidas. De acuerdo a los parámetros que necesitan ser monitoreados, se realizó un listado de los sensores que van a ser implementados como señales de entrada al PLC y el tipo de señal que se va a utilizar con cada una. Esta información se muestra en la Tabla 53.

Tabla 53. Listado de sensores de entrada al proceso y el tipo de señal

Variable medida	Tipo de señal
RTD temperatura inicial	Señal analógica
RTD temperatura final	Señal analógica
Flujo de agua de entrada	Señal analógica
Temperatura aire de entrada	Señal analógica
Temperatura aire de entrada	Señal analógica
Humedad de aire de entrada	Señal analógica
Humedad de aire de entrada	Señal analógica
Velocidad de aire de entrada	Señal analógica
Velocidad de aire de salida	Señal analógica
Presión de aire de entrada	Señal analógica
Presión de aire de salida	Señal analógica
Presión de vapor de agua	Señal analógica
Nivel de agua máximo	Señal digital
Nivel de agua mínimo	Señal digital

Las salidas analógicas de los sensores seleccionados son de 4-20mA y las salidas digitales utilizan un voltaje de 24V.

Además del listado de entradas, se realizó un listado de los actuadores que se van a implementar como salida del PLC y que realizarán una función sobre el proceso de enfriamiento. Las salidas también se clasificaron en digital o analógico.

Tabla 54. Listado de salidas del PLC a implementar en la torre de enfriamiento

Variable medida	Tipo de señal
Variador de frecuencias ventilador	Señal analógica
Válvula entrada de agua fría	Señal analógica
Válvula entrada de vapor	Señal analógica
Válvula entrada de agua tanque	Señal digital
Válvula entrada de agua evaporador	Señal digital
Válvula entrada de agua destilador	Señal digital
Motor de la bomba de agua	Señal digital

Las válvulas con señal digital son válvulas de tipo On/Off y las de salida analógica, son válvulas proporcionales. Para el control del motor se utilizó una salida de tipo On/Off digital y para el control del ventilador de la torre, el variador que se encontraba allí.

Con los listados de entradas y salidas, se buscó la configuración de módulos de necesarios para implementar todas las entradas y salidas al PLC.

Tabla 55. Lista de módulos de expansión a utilizar con el PLC instalado en la torre

Módulo expansión	Tipo	Cantidad
1762-IF4	4 entradas analógicas	3
1762-OF4	4 salidas analógicas	1
1762-IF2OF2	2 entradas 2 salidas analógicas	1
1762-IQ8OW6	8 entradas y 8 salidas con relé digitales	1

4. Selección del PLC. Primero se realizó el cálculo de corriente de los diferentes módulos de expansión usados a 5V DC y a 24V DC. Se utilizó una tabla de cálculos proporcionado por el manual del PLC Micrologix1400. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 56. Lista de módulos utilizados y la corriente calculada por módulo

Calculating the Current for Expansion I/O					
Catalog Number ⁽¹⁾	n	A		B	
		Device Current Requirements		Calculated Current	
		at 5V DC (mA)	at 24V DC (mA)	at 5V DC (mA)	at 24V DC (mA)
1762-IA8		50	0		
1762-IF4	3	40	50	120	150
1762-IF20F2	1	40	105	40	105
1762-IQ8		50	0		
1762-IQ16		60	0		
1762-IQ32T		170	0		
1762-IR4		40	50		
1762-IT4		40	50		
1762-OA8		115	0		
1762-OB8		115	0		
1762-OB16		175	0		
1762-OB32T		175	0		
1762-OF4	1	40	165	40	165
1762-OV32T		175	0		
1762-OW8		80	90		
1762-OW16		120	140		
1762-OX6I		110	110		
1762-IQ80W6	1	110	80	110	80
Total Modules (7 maximum):	6	Subtotal:		310	500

Se utilizó la hoja de cálculo de potencia consumida total consumida por los módulos de expansión seleccionados anteriormente para verificar que esta no superara la potencia máxima que puede utilizarse con el PLC. Además se verificó la corriente máxima de los módulos de expansión con esta hoja.

Tabla 57. Consumo de corriente y de potencia del PLC seleccionado usando los módulos definidos

Maximum Allowable Values		Calculated Values	
Current for Devices Connected to the +24V DC Sensor Supply:		Sum of all sensor currents	
250 mA at 24V DC		120 mA at 24V DC	
Current for MicroLogix Accessories and Expansion I/O:		Current (Subtotal from Table .)	
1225 mA at 5V DC	1155 mA at 24V DC	mA at 5V DC	310
		mA at 24V DC	500
System Loading:		System Loading:	
		= (120 mA x 24V) + (310 mA x 5V) + (500 mA x 24V)	
		= 2880 mW + 1550 mW + 12000 mW	
		= 16430 mW	
39.845 W		= 16.43 W	

Debido a que la corriente y la potencia consumida por los módulos es menor a lo requerido por el PLC, se utilizó el Micrologix 1400 de Allen Bradley. Además, con esto quedaron seleccionados los módulos a utilizar.

5. Instalación de sensores. Antes de poder realizar la instalación de los diferentes sensores se tuvo que realizar algunas modificaciones al equipo, las cuales consistieron en cambiar tubería, instalar canaletas y abrir agujeros donde se colocarían los sensores.

Se instaló tubería para que el agua que sale de la torre de enfriamiento, se pueda reutilizar en las prácticas como agua a calentarse con vapor y así reducir el consumo de agua de la torre. Esto se puede observar en la siguiente figura:

Ilustración 45. Tubería de la torre antes de la instalación de retorno de agua

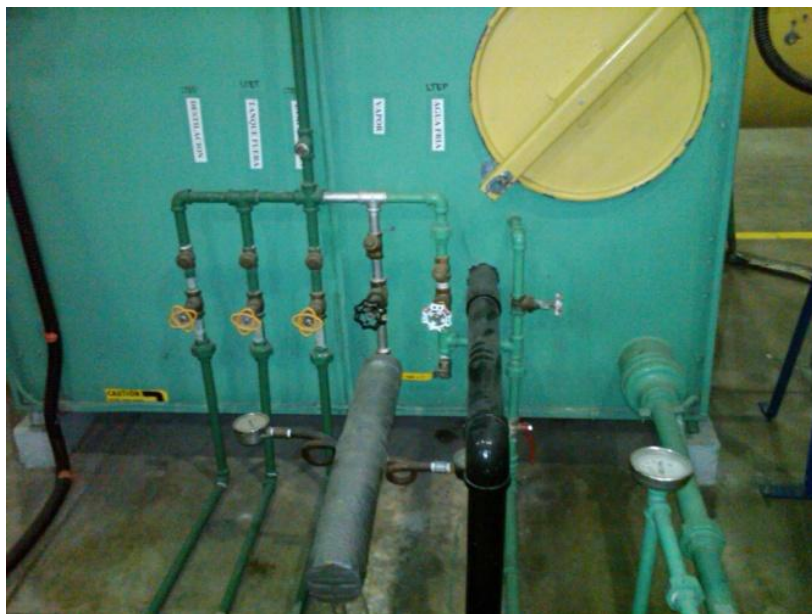
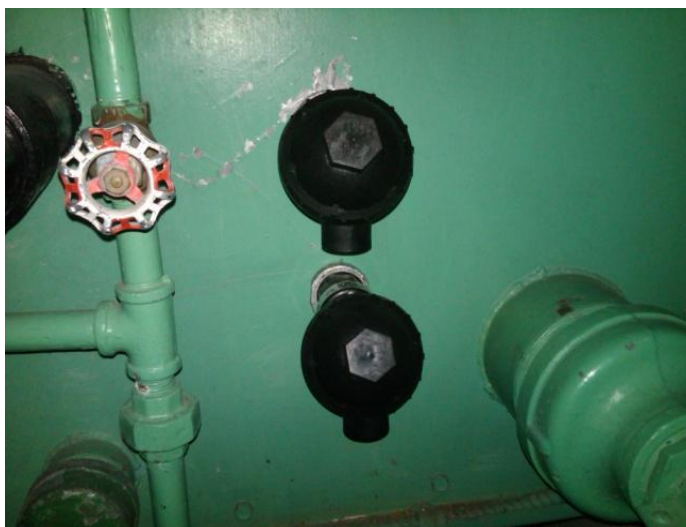


Ilustración 46. Modificación realizada sobre tubería de salida de agua



En la parte inferior de la torre se instalaron los dos sensores de nivel, uno en la posición mínima y otro en la posición máxima permitida, para el funcionamiento correcto de la bomba de agua.

Ilustración 47. Sensores de nivel colocados en el tanque de agua de la torre



Los sensores de temperatura de agua RTD se colocaron en la entrada y salida de agua de la torre.

Ilustración 48. Sensor RTD colocado en la entrada de agua de la torre

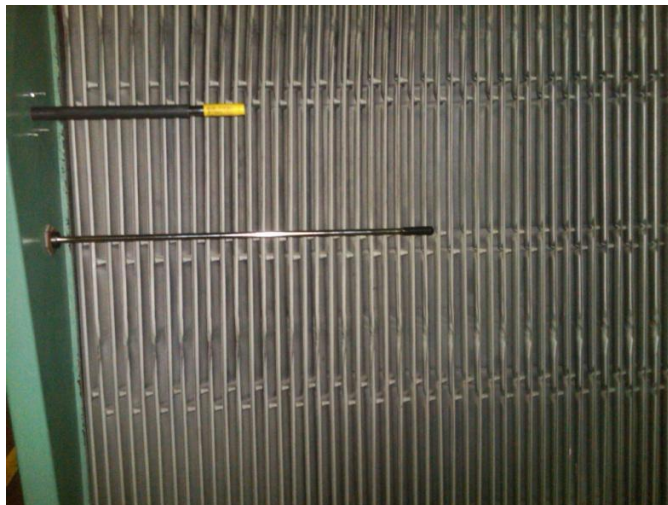


Para colocar los sensores de presión, velocidad y temperatura y humedad de aire, se hicieron agujeros en la pared de la torre y se colocaron empaques entre los sensores y la torre para mantener al equipo sin fugas. Estos sensores se colocaron en cada lado de la torre, para obtener una medición en la entrada y en la salida de aire en ambos sentidos de operación de la torre (inducido y forzado).

Ilustración 49. Sensor de humedad y temperatura (derecha) junto al tubo donde se obtiene la presión del aire de la torre en la entrada frontal



Ilustración 50. Sensores de humedad y temperatura y velocidad de aire colocados en la entrada trasera de la torre



En la siguiente figura se puede observar el lugar donde se colocó cada sensor de presión de aire de la torre.

Ilustración 51. Ubicación de los sensores de presión



Con respecto a la instalación de las válvulas On/Off y la válvula proporcional, fue necesario realizar ajustes en la tubería, para poder realizar los ByPass que permitirán al usuario utilizar el equipo tanto en modalidad manual como en automática. Se realizaron 4 Bypass para las tuberías de agua y 1 Bypass para la tubería de vapor. En la siguiente figura se observa la nueva estructura del Manifold de la torre de enfriamiento. Un dato importante es que la válvula proporcional de vapor se encuentra conectada a una reguladora de aire, ya que funciona mediante el suministro de un flujo de aire.

Ilustración 52. Estructura del nuevo Manifold que controla la torre de enfriamiento



Se realizó la instalación de un rotámetro que permite conocer el caudal o cantidad de agua que fluye por la tubería. El inconveniente de este rotámetro es que no genera señal para el PLC, por lo que el usuario deberá ingresar en el programa la cantidad de galones por minuto de agua caliente que se alimenta a la torre.

Ilustración 53. Rotámetro de la torre de enfriamiento



Para la instalación de los manómetros en el Venturi, se tuvo que modificar la tubería de vapor, ya que antes el Venturi se encontraba en posición horizontal. El Venturi fue colocado en posición vertical, con sus respectivos sensores de presión de vapor. Para la calibración de estos se agregó una tee y se colocó el manómetro que se tenía anteriormente. Adicionalmente, permite que el usuario controle la presión a través de este manómetro o simplemente observe el dato que envía el sensor al PLC.

Ilustración 54. Tubo de Venturi con sus respectivos sensores de presión de vapor



6. Instalación del gabinete. Para la instalación del gabinete donde se almacena el PLC y los transmisores de los sensores, se hicieron modificaciones para acomodar a estos y los demás accesorios como las borneras y el cableado.

Se instalaron rieles para colocar al PLC con sus módulos, las borneras para cableado y los portafusibles de la instalación. Además se instalaron canaletas para pasar el cable desde la entrada a las borneras y desde las borneras al PLC.

Ilustración 55. Instalación de rieles y canaletas en el gabinete



En el exterior del gabinete se instaló el botón de paro de emergencia del sistema. Además se colocaron puntos de entrada y salida de cable de los sensores en el lado inferior derecho del gabinete.

Ilustración 56. Puntos de entrada y salida de cables al PLC y sensores



Ilustración 57. Exterior del gabinete mostrando el botón de paro de emergencia



El gabinete se instaló usando una estructura de hierro que se colocó en la parte frontera del equipo. El gabinete se colgó de la estructura para permitir el acceso fácil del cableado. En la orilla de esta estructura se agregaron canaletas para colocar el cableado de una forma ordenada. Se puede observar esto en la siguiente figura:

Ilustración 58. Gabinete instalado en la torre de enfriamiento



7. Cableado de los sensores. Para el cableado de los sensores se utilizaron los manuales de instalación de cada uno y se instalaron usando una salida de 4-20mA para aquellos que tuvieran salidas analógicas y 24V DC para los sensores con salida digital.

Se utilizó cable de AWT de tamaño 18 para los sensores, utilizando las borneras que incluyen los sensores para la salida al PLC. En el caso de los sensores que ya incluían una salida con cable, se buscó un cable del mismo calibre y se utilizaron borneras para realizar las conexiones entre las puntas.

a. Sensor de temperatura de agua RTD.

Ilustración 59. Sensor RTD instalado en la salida de agua de la torre



Los sensores de temperatura RTD utilizados no tenían un transmisor de 4-20mA incluido, por lo que se utilizó un transmisor de RTD de 3 hilos para realizar esto. En la salida del transmisor se colocaron cables hacia el gabinete de donde se obtuvo una corriente de 4-20mA, según la temperatura medida por el RTD.

Ilustración 60. Transmisor de un RTD de 3 hilos implementado.



b. Sensor de flujo de agua.

Ilustración 61. Rotámetro con display utilizado en el proceso



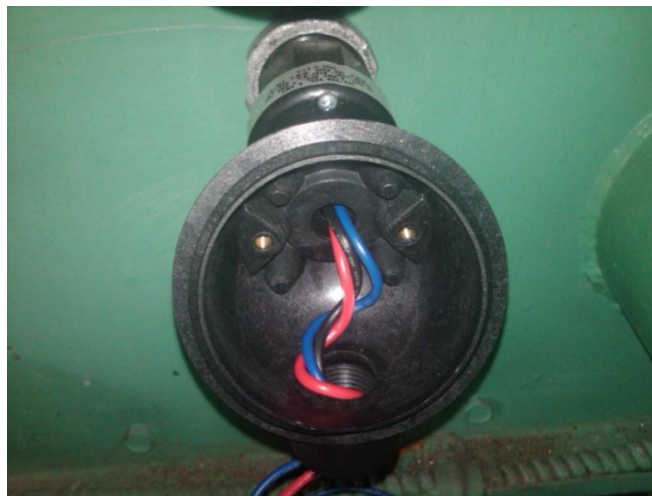
El rotámetro utilizado no incluía una salida de 4-20mA por lo que se utilizó un transmisor del rotámetro, el cual tiene como entrada una señal de pulso cuadrado de 6V que se obtiene del rotámetro y una salida de 4-20mA hacia el PLC.

Ilustración 62. Transmisor del rotámetro usado



c. Sensor de nivel de agua switch.

Ilustración 63. Interior del sensor de nivel de agua utilizado



Los sensores de nivel usados eran de tipo switch mecánico, que al estar alimentados con 24V DC y al llegar al tope máximo se cierra un contacto normalmente abierto y en la salida se obtienen 24V DC para el PLC.

d. Sensor de presión del aire. Para la medición de presión del aire, se colocaron unos tubos pequeños en unos agujeros en la torre y de ahí se pasó al sensor capacitivo para medir la presión ejercida sobre el diafragma y obtener una salida de 4-20mA, para introducirlo al PLC.

Ilustración 64. Transmisor de presión utilizado para la medición de presión del aire



e. Sensor de velocidad de aire.

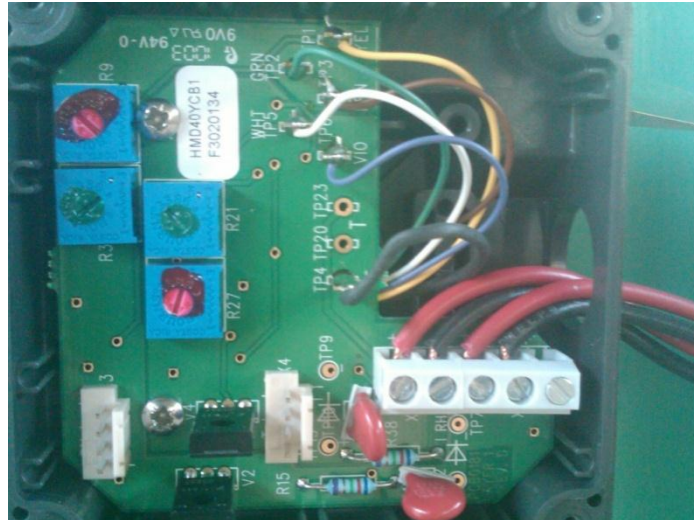
Ilustración 65. Interior del Sensor de velocidad de Aire con las conexiones en bornera



Los sensores de velocidad de aire incluían un transmisor de corriente de 4-20mA, por lo que se utilizaron las conexiones marcadas de salida para la conexión del dispositivo. Además se realizó la conexión de 24V DC del sensor para alimentación.

f. Sensor de humedad y temperatura de aire. El sensor de humedad trae además un RTD para la medición de la temperatura del aire en contacto. Las salidas de este sensor son dos salidas analógicas de 4-20mA hacia el PLC.

Ilustración 66. Interior del sensor de temperatura y humedad de aire mostrando las conexiones en bornera



g. Válvulas On/Off. Para la alimentación de agua proveniente de otras máquinas hacia la torre se implementaron válvulas de tipo On/Off. Estas válvulas son normalmente abiertas y al recibir un voltaje de 24V DC cierran el paso de agua hacia la torre.

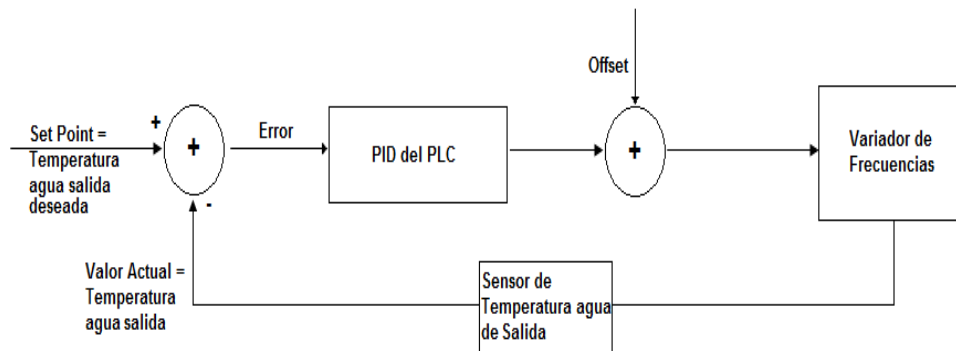
Ilustración 67. Válvula ON-OFF utilizado para la entrada de agua a la torre



8. Programación del PLC. Para la programación del PLC se utilizó el software RSLogix 500 pro de Allen Bradley en lógica escalera usando el algoritmo previamente elaborado. Para el manejo de las salidas digitales se usaron banderas que se activan o desactivan con condiciones del HMI o del estado de los sensores. El estado de estas banderas se utiliza para energizar las salidas del módulo de expansión con relé del PLC. Esto aplica para la operación de las válvulas de ingreso de agua y para la activación de la bomba de agua del tanque.

Para el manejo del variador de frecuencias de forma manual, se utilizó una opción de ajuste desde la terminal donde se encuentra el HMI, mientras que en el modo automático se implementó un PID digital en el PLC. El PID se implementó de la siguiente manera:

Ilustración 68. Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado PID usado para el control del variador de frecuencia



El manejo de los sensores analógicos consistió en la lectura de las variables y un posterior ajuste de los valores leídos para enviarlos al HMI de manera correcta y así poder utilizarlos en las ecuaciones de enfriamiento.

9. Diseño del programa. Se realizó un algoritmo que se implementó en el programa del PLC para poder medir todos los sensores que se instalaron en la torre de enfriamiento y que además permita manejar las diferentes salidas según el estado de los sensores.

Para el algoritmo se decidió utilizar un menú que permitiera seleccionar el modo de operación de la torre. La torre se puede utilizar para dar servicio a otras máquinas que calientan agua, o como una práctica de laboratorio donde se calienta agua que proviene del exterior y se enfría usando el equipo.

Como siguiente paso se deja al usuario seleccionar si va a trabajar de forma automática o de forma manual. En la modalidad manual, el usuario debe encargarse de la apertura de cada una de las válvulas, del funcionamiento del variador de frecuencia del ventilador y del encendido y apagado de la bomba de agua.

Después de seleccionar el modo de operación, se le pedirán al usuario algunos parámetros según el modo seleccionado. Posteriormente se dará inicio al funcionamiento. Durante el proceso se miden las diferentes variables por medio de los sensores y se ajusta el equipo si se está trabajando en modo automático, de lo contrario el usuario estará encargado de manejar el equipo desde la interfaz.

Teniendo el algoritmo, se procede a buscar una solución para el programa del PLC. Se utilizó el software RSLogix 500 de Allen Bradley para realizar esto. Se programó la obtención de las mediciones de los diferentes sensores y con un PID se ajustó la salida del variador de frecuencias. La bomba de agua y las válvulas se manejaron usando banderas de control que energizan las salidas.

Ilustración 69. Algoritmo del proceso a implementar en la automatización de la torre de enfriamiento

Menú inicial	<ul style="list-style-type: none"> •Selección de modo operación (práctica o servicio)
Menú modo uso	<ul style="list-style-type: none"> •Selección de modo de uso (automático o manual)
Modo ajuste datos	<ul style="list-style-type: none"> •Modo automático: ajuste valores finales deseados. •Se selecciona la válvula de uso •Se da inicio del proceso
Medición nivel de agua	<ul style="list-style-type: none"> •Verificar si el nivel de agua mínimo se alcanzó •Verificar si el nivel de agua máximo se alcanzó
Encendido/apagado bomba de agua	<ul style="list-style-type: none"> •Modo manual: Si se presiona encender bomba revisar condiciones para permitir utilizar la bomba de agua. •Automático: Encender o apagar bomba al cumplir condiciones.
Medición sensores del agua	<ul style="list-style-type: none"> •Se obtiene la temperatura y flujo de agua de entrada •Se obtiene la temperatura de agua de salida
Medición sensores del aire	<ul style="list-style-type: none"> •Obtener temp., humedad, presión y velocidad de entrada •Obtener temp., humedad, presión y velocidad de salida
Medición presión de vapor	<ul style="list-style-type: none"> •Obtener la medición de ambos sensores de presión del tubo de Venturi
Cálculo velocidad de aire	<ul style="list-style-type: none"> •Con el lazo de control ajustar la velocidad de aire para alcanzar la temperatura final deseada
Mostrar resultados	<ul style="list-style-type: none"> •Enviar datos al HMI y mostrar en pantalla los resultados obtenidos de las mediciones realizadas actualizados en una interfaz gráfica y para realizar las operaciones aritmeticas necesarias.
Finalizar proceso	<ul style="list-style-type: none"> •Al terminar el proceso, permitir exportar los resultados obtenidos

10. Resultados equipo modalidad manual

Tabla 58. Características de transferencia de masa de la torre de enfriamiento

Dirección ventilador	Ntog	Htog (m)	Z(m)
Inducido	0.0019	466.96 ± 170.99	0.905 ± 0.331
Forzado	0.0075	125.24 ± 45.84	0.940 ± 0.340

a. Gráficas equipo modalidad manual

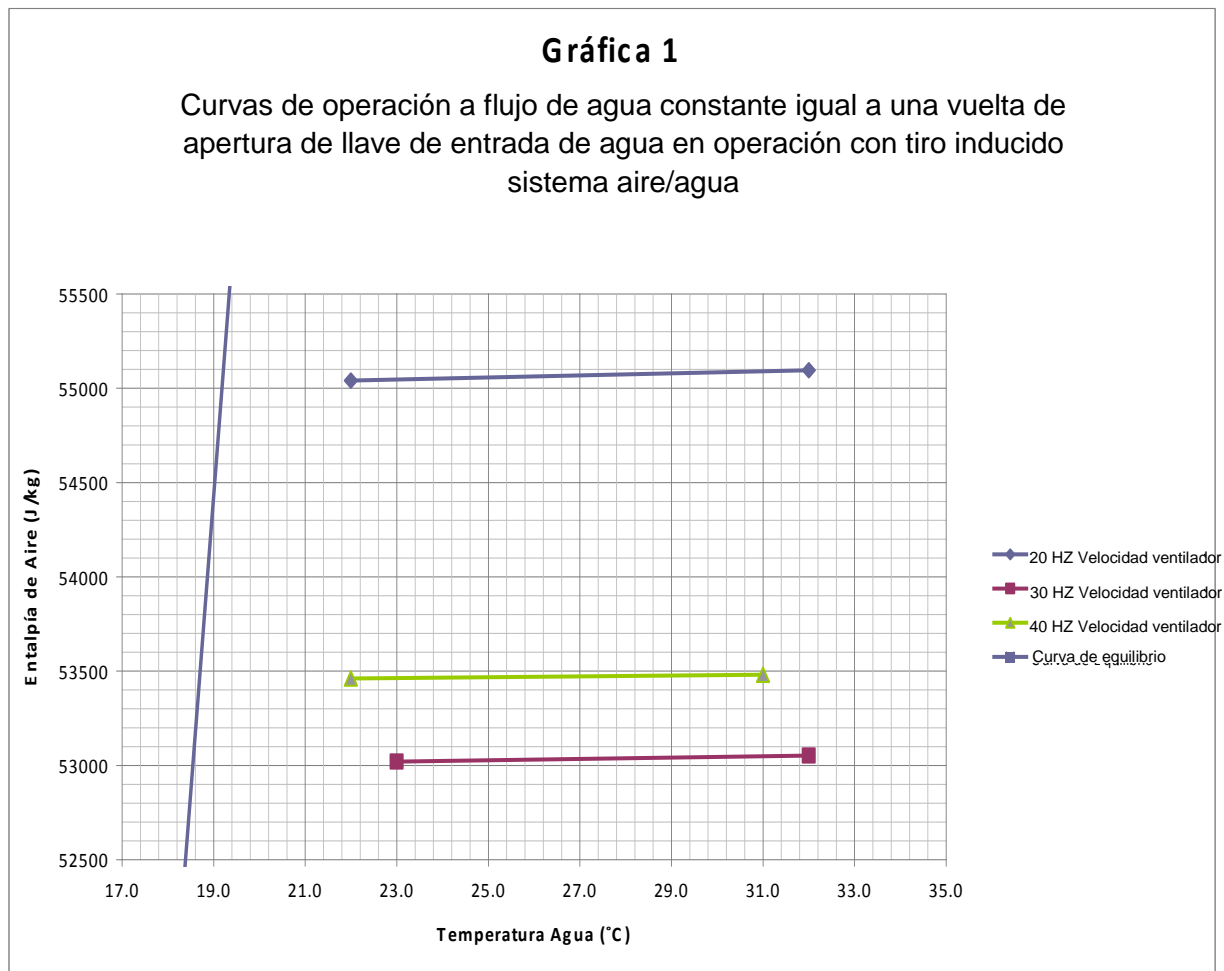
Ilustración 70. Curva de operación a flujo de agua constante igual a una vuelta de apertura de llave, en operación con tiro inducido en modalidad manual

Ilustración 71. Curva de operación a flujo de agua constante igual a tres vueltas de apertura de llave de entrada, en operación con tiro inducido en modalidad manual

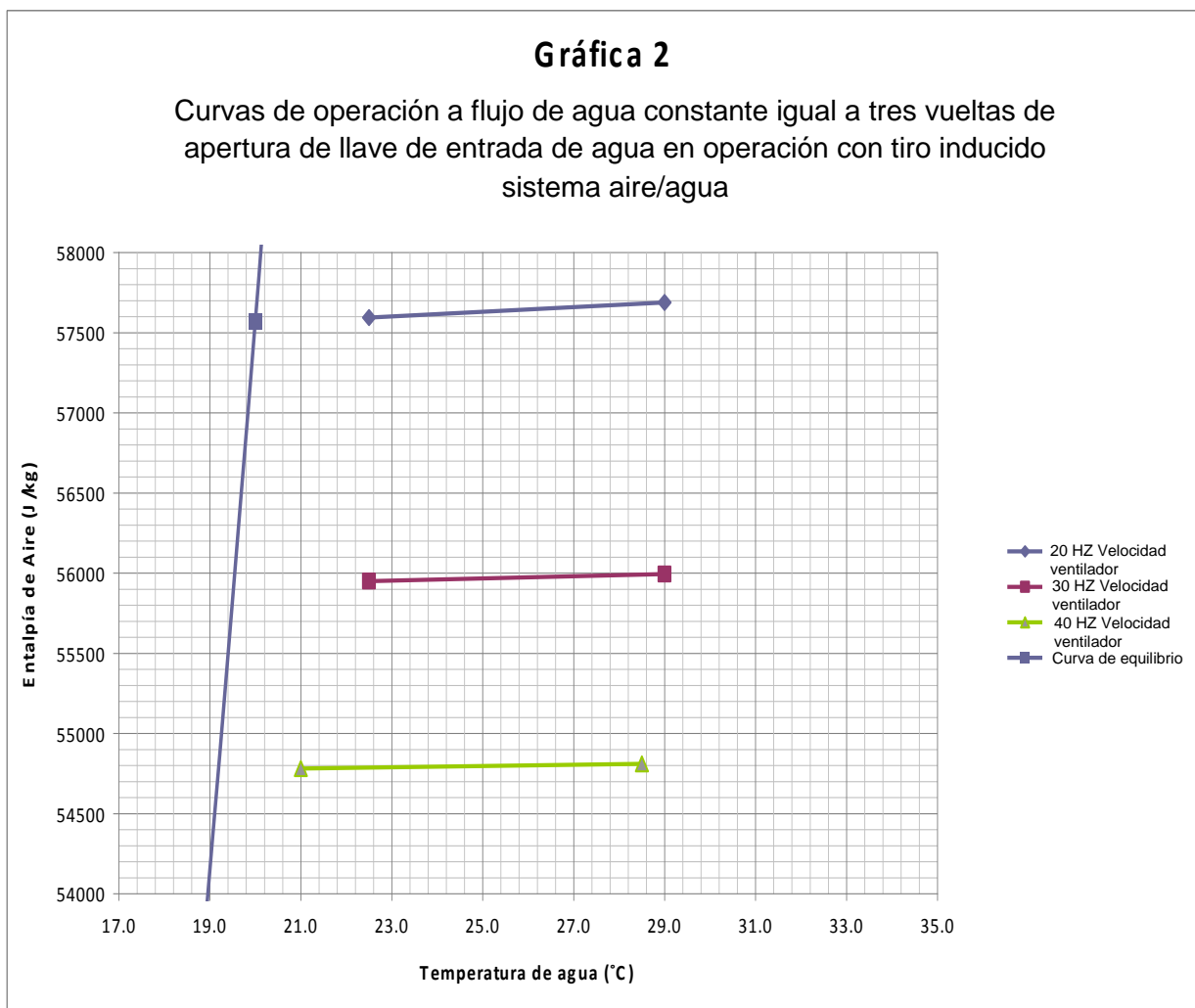


Ilustración 72 . Curva de operación a flujo de agua constante de válvula de entrada totalmente abierto en operación con tiro inducido en modalidad manual

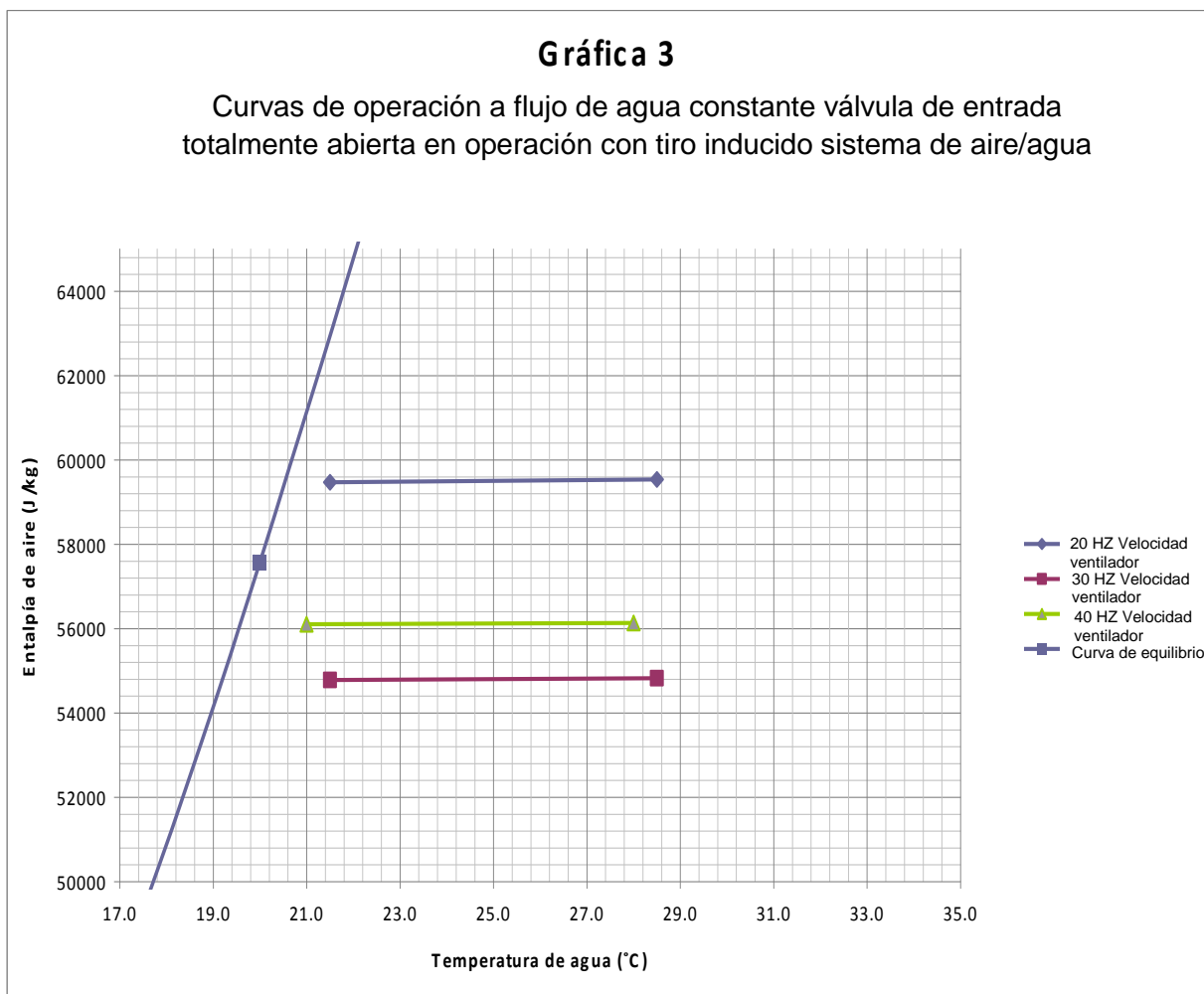


Ilustración 73 . Curva de operación promedio para enfriamiento de agua con torre de enfriamiento de tiro inducido en modalidad manual

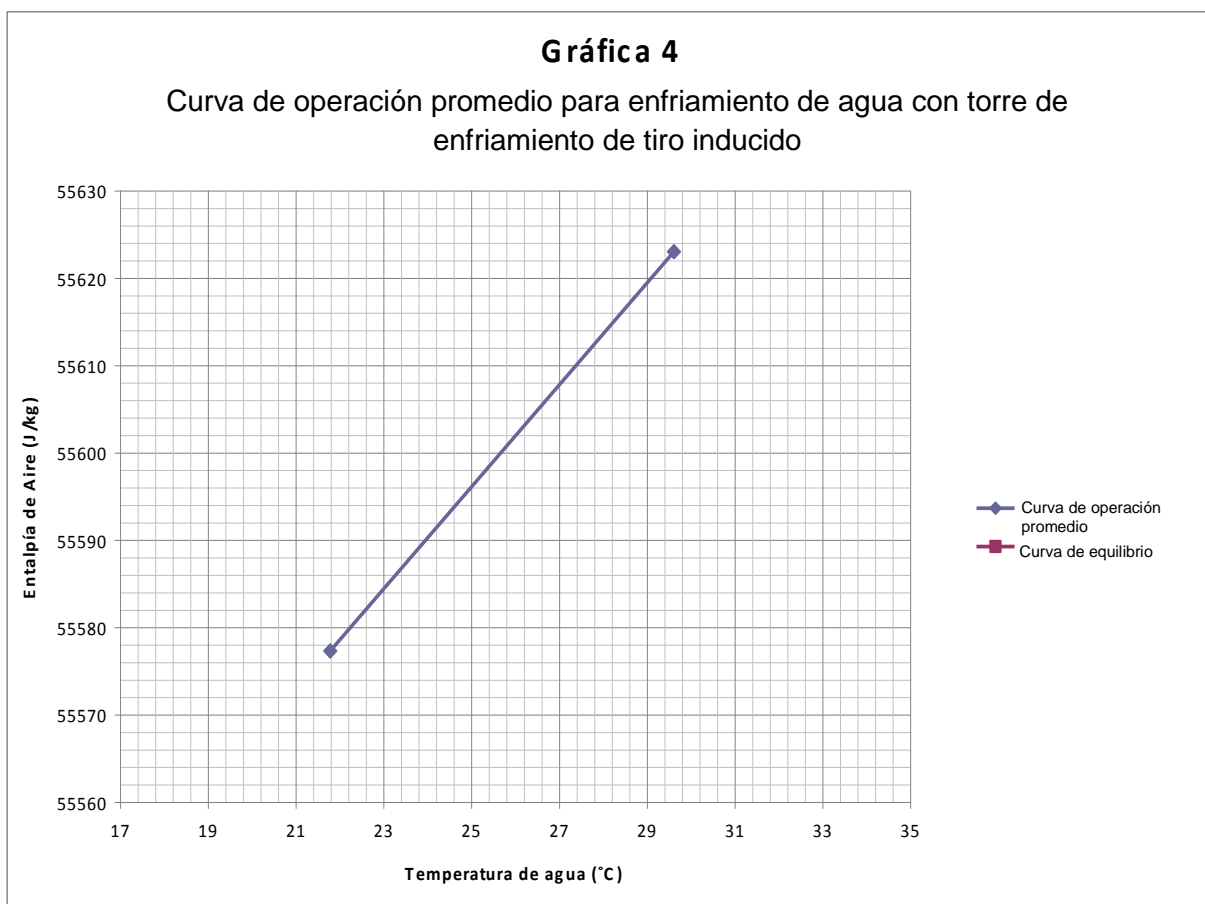


Ilustración 74 . Curva de operación a flujo de agua constante igual a una vuelta de apertura de llave de entrada, en operación con tiro forzado en modalidad manual

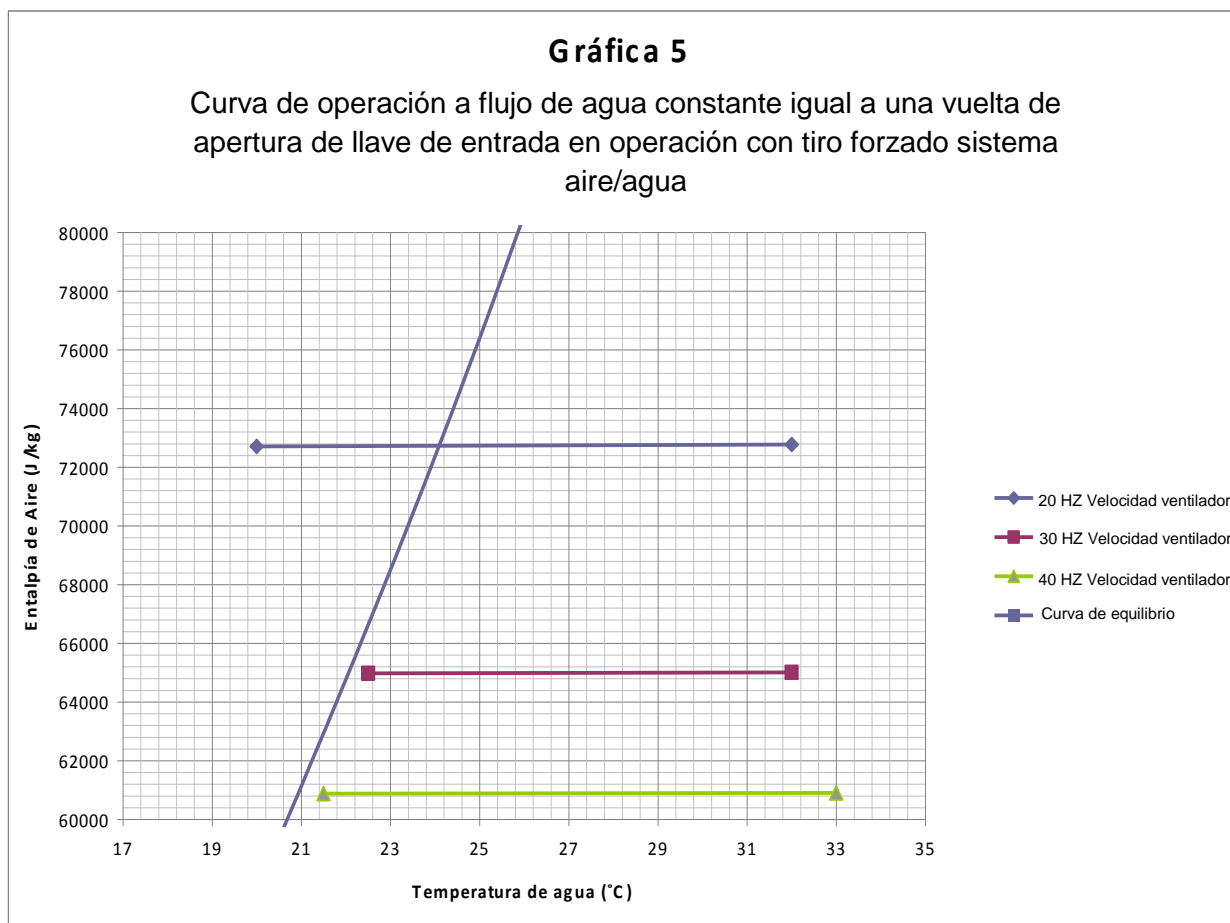


Ilustración 75 . Curva de operación a flujo de agua constante igual a tres vueltas de apertura de llave, en operación con tiro forzado en modalidad manual

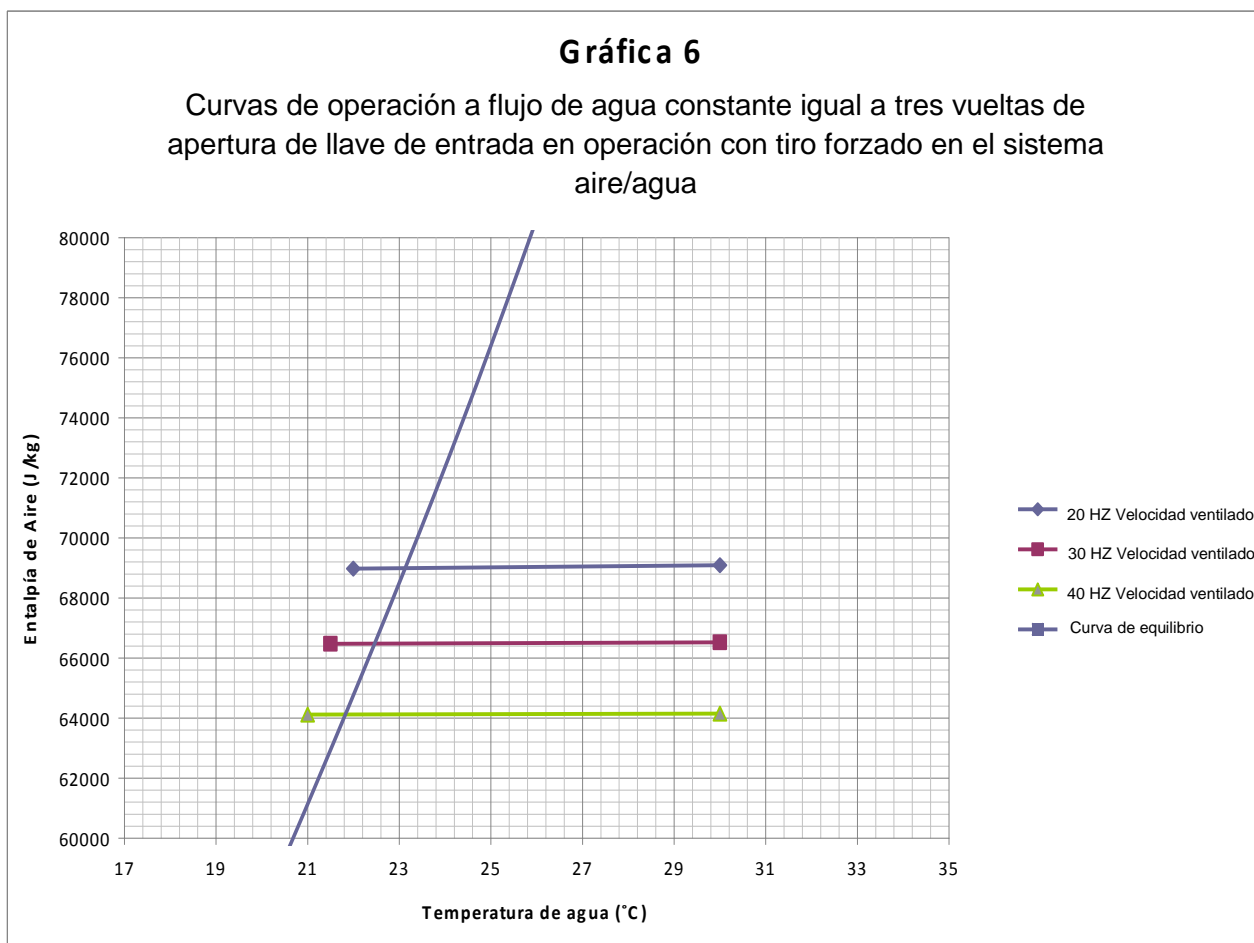


Ilustración 76 . Curva de operación a flujo de agua constante igual a válvula de entrada totalmente abierta, en operación con tiro forzado en modalidad manual

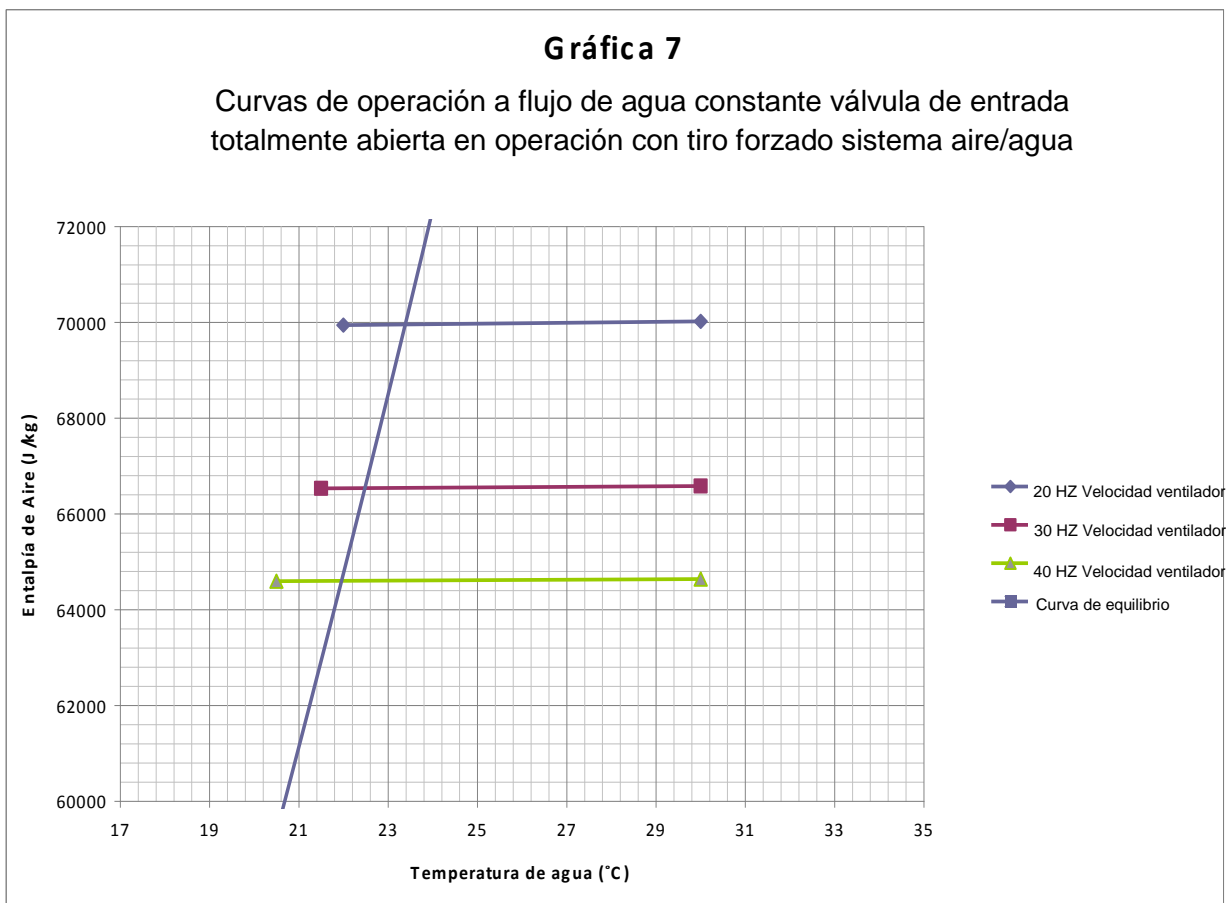
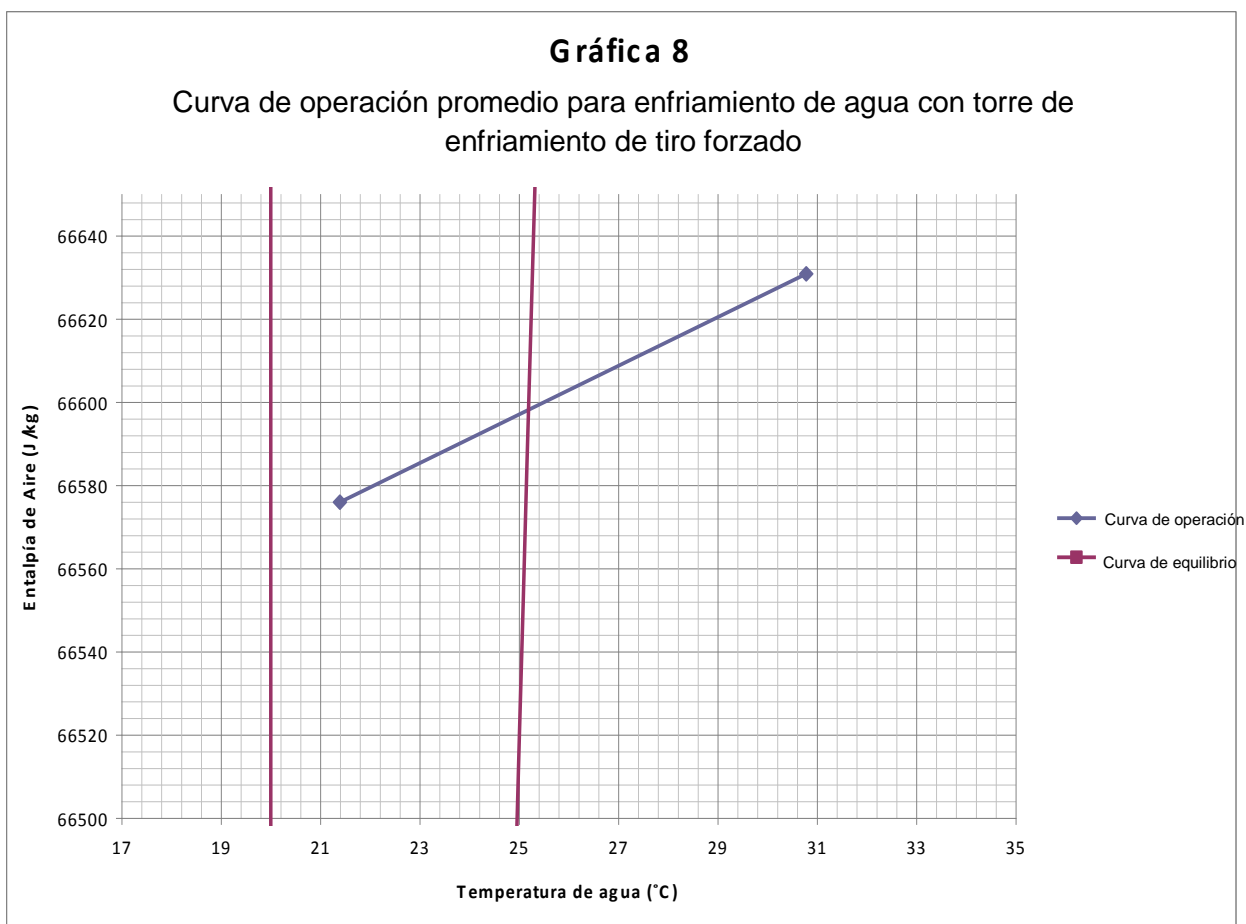


Ilustración 77 . Curva de operación promedio para enfriamiento de agua con torre de enfriamiento de tiro forzado en modalidad manual



C. Discusión

Para el cumplimiento de los objetivos mencionados en secciones anteriores, se definieron las herramientas y métodos a utilizar para obtener los resultados esperados, que serán de utilidad para todos los estudiantes de Ingeniería Química de la UVG que desee poner en funcionamiento la torre de enfriamiento.

Este trabajo está dirigido hacia el área de Automatización Industrial que comprende varios aspectos como: definir los sensores necesarios para controlar el funcionamiento de la torre de enfriamiento, el precio de dichos sensores, instalación de los sensores en el equipo y los beneficios que generará este trabajo a la Universidad del Valle de Guatemala.

La idea de automatizar los equipos del laboratorio se debe a que actualmente en toda Industria Química se trabajan con equipos controlados por computadora, por lo que es necesario que todo estudiante de Ingeniería Química se familiarice y conozca el funcionamiento de un equipo automatizado, específicamente de la torre de enfriamiento.

Al empezar la investigación del megaproyecto, se investigaron las soluciones posibles a implementar. Se consideró la opción de usar microcontroladores, sin embargo se optó por trabajar con un PLC debido a que el uso de éste trae robustez respecto al ruido y al manejo de entradas y salidas de equipo que funciona con 24V DC a 120V AC. Además, el uso de un PLC permite mayor facilidad en la implementación del programa, ya que se puede programar en el lenguaje escalera y, al momento en que se requiere hacer modificaciones, es más sencillo entender el código escrito en escalera, que cambiar el código de un programa de un microcontrolador. Otra ventaja es que, a diferencia de un microcontrolador, el programa del PLC puede ser modificado en tiempo real mientras está conectado al proceso.

Para implementar el programa a cargar en el PLC, se realizó un algoritmo de diseño de lo requerido en el programa. Para esto se listaron las diferentes entradas y salidas y se buscaron las condiciones que se debían cumplir en cada actuador para su funcionamiento. Esto permitió realizar el programa de una manera robusta y eficiente, ya que se contemplaron todas las condiciones de manejo, agilizando la parte de programación.

Al buscar el PLC a utilizar se observaron algunas características de los diferentes modelos. La principal característica que se buscó fue la capacidad de utilizar la cantidad de módulos de expansión necesarios para la implementación del proyecto. Para esto se calculó la potencia consumida para los Micrologix 1000, 1100, 1200 y 1300 hasta que se encontró el PLC que serviría para el proyecto, resultando ser el 1400 de Micrologix. Además de calcular la potencia, se observó si el PLC tenía la opción de implementar las operaciones matemáticas necesarias para desplegar los resultados necesarios en las prácticas realizadas por los estudiantes de Ingeniería Química. Por último, se observó el costo del PLC a utilizar. De acuerdo a estos requerimientos se escogió el Micrologix 1400 para la automatización de la torre de enfriamiento.

Cuando se realizó la instalación de los sensores fue necesario hacer modificaciones a la torre. Se abrieron agujeros para colocar los sensores de nivel de agua, presión del aire, velocidad de aire y temperatura y humedad del aire. Se realizaron modificaciones en la tubería de la torre, con el fin de utilizar el agua enfriada de la salida para calentarla nuevamente y repetir el proceso de enfriamiento. Con este cambio se eliminó la necesidad de usar dos rotámetros, ya que el flujo de agua de salida terminó siendo el mismo que el flujo de entrada. Además, al realizar esta modificación, el consumo de agua en el laboratorio disminuye debido a que se reutiliza el agua en este proceso.

La programación del PLC se redujo bastante debido a que para el control del proceso era necesario solamente saber el estado de la temperatura de salida del agua y ajustar el variador del ventilador dependiendo si la temperatura del agua era menor o mayor a la deseada. Esto se implementó usando un objeto PID del PLC que fue calibrado para el funcionamiento del variador de frecuencias del ventilador. Además de este lazo de control, se programó la selección de válvulas a usar en las prácticas y el uso del motor de la bomba de agua que expulsa el agua de la torre. Estas condiciones de operación se observaban usando bits de selección que provienen del programa elaborado en la interfaz gráfica del proyecto.

Se trató de minimizar la cantidad de sensores a implementar, manteniendo un control mínimo necesario de los parámetros que se utilizaron para los cálculos en computadora. Para tener un mayor control del proceso, se podría implementar un segundo rotámetro en la salida de agua que viene del tanque. No se implementó este

rotámetro debido a que se había recirculado el agua que salía de la torre y con un rotámetro era suficiente.

También se podrían implementar válvulas de tipo proporcional para las diferentes entradas de agua que tiene la torre, en lugar de usar válvulas de tipo On/Off. Esto permitiría que el flujo de agua que entra en la torre sea considerablemente diferente en cada uso, ya que se controlaría el flujo del agua con el porcentaje de apertura de la válvula. Además se tendría más control del calentamiento del agua cuando se utiliza este sistema en las prácticas de laboratorio.

Para esta automatización se requería realizar pruebas manuales para determinar los diferentes parámetros a controlar y poder determinar qué tan efectiva es la modalidad manual en comparación con la automática. Las pruebas manuales fueron realizadas variando la apertura de la llave de agua fría, vapor y flujos de aire.

Luego de tener los datos de las pruebas manuales, se procedió a utilizar las fórmulas de la Tabla 44 y 45 para poder obtener los parámetros que permitirán conocer la altura de transferencia de masa global. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 58, donde se pueden observar los diferentes parámetros que se obtienen a partir de la medición de las variables y de la carta psicométrica corregida a la presión y altura de operación.

Para la automatización de este tipo de equipo es necesario tener en cuenta que las cartas psicométricas estándares están diseñadas para parámetros de operación a 1 atm de presión y 25°C de temperatura. Es por esto que, para que el funcionamiento de la torre sea el correcto y que genere datos reales, es necesario tener una carta psicométrica corregida para contar con los parámetros de la mezcla agua-aire a las condiciones de operación. Las correcciones que se deben realizar son por condiciones de altura y presión.

Se realizó una carta psicométrica a partir de dos parámetros importantes: la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco de la mezcla agua-aire, considerando también que la altura de la ciudad de Guatemala es 1592m sobre el nivel del mar. Estos parámetros fueron utilizados para obtener entalpías, volúmenes específicos, temperaturas de bulbo húmedo y %HR, y con éstos poder trazar la nueva carta

psicométrica. Este procedimiento manual fue realizado tanto usando tiro inducido como tiro forzado. La Ilustración 42 muestra la carta corregida a las condiciones del laboratorio y es ésta la que se encuentra incorporada en el programa para facilitar la toma de datos de los estudiantes. Con esta carta psicométrica se podrán controlar los diferentes parámetros que permiten conocer el comportamiento de la mezcla agua-aire a las condiciones a las que se opere la torre de enfriamiento.

Con los resultados obtenidos en los procedimientos, se realizaron gráficas en las que se obtienen las curvas de operación y curvas de equilibrio del proceso. En las gráficas realizadas (Ilustraciones 70 a 77) se compara la temperatura del agua vs la entalpía del aire. Con estos parámetros se calculó la unidad global de transferencia de masa y la altura de unidad global de transferencia de masa, y con estos se obtiene la altura de transferencia de masa (Z) de la torre de enfriamiento a las condiciones de operación. Los valores obtenidos fueron muestran en la Tabla 58.

Por último, este tipo de proyectos tiene bastante beneficio para la UVG porque permite un mejor control del equipo y de los equipos que son alimentados por los flujos de agua que salen de la torre de enfriamiento. Además, servirá como enseñanza práctica para futuros Ingenieros Químicos.

IX. COSTO Y VENTAJAS DE LA AUTOMATIZACIÓN

A. Costos

Tabla 59 . Costos de automatización

PLANTA DE BIODIESEL	
Descripción	Total
Sensores	\$ 13,855.00
Equipo de cómputo	\$ 894.27
Estructura	\$ 3,201.59
Tubería y accesorios	\$ 3,164.59
Válvulas y bombas	\$ 9,223.83
Cables y accesorios	\$ 478.36
Gabinete y accesorios	\$ 1,247.42
Subtotal	\$ 32,065.06
COLUMNA DE EXTRACCIÓN	
Descripción	Total
Sensores	\$ 8,160.51
Equipo de cómputo	\$ 974.28
Bombas y motores	\$ 2,898.39
Variador y Arrancador	\$ 974.72
Válvulas y tubería	\$ 690.50
Estructura	\$ 3,966.43
Gabinete y Accesorios	\$ 240.15
Subtotal	\$ 17,904.99
TORRE DE ENFRIAMIENTO	
Descripción	Total
Sensores	\$ 6,670.90
Equipo de cómputo	\$ 1,081.98
Variador	\$ 1,108.90
Válvulas y tubería	\$ 2,743.52
Gabinete y Accesorios	\$ 184.91
Subtotal	\$ 11,790.22
TOTAL	\$ 61,760.27

B. Ventajas de la automatización

1. Planta de Biodiesel

- Disminución de riesgos de accidentes dentro del laboratorio. Uno de los procesos que se realizaba manualmente era el vertimiento de aceite dentro del reactor. Esto representaba riesgos potenciales, ya sea por derrames y pérdida de materia prima, o lesiones en los estudiantes si se soltaba por completo el recipiente. Además, los derrames podrían ocasionar tropiezos o deslices provocando accidentes mayores. Actualmente, este proceso se realizará a través de una bomba, evitando dichos incidentes.
- Mejor aprovechamiento de materia prima. Con anterioridad se realizaban cálculos para determinar las cantidades de los reactivos (metanol, ácido sulfúrico y KOH) que se requerían. Debido a que generalmente se utiliza el mismo tipo de aceite, estas cantidades no se recalculaban. Sin embargo, siempre existen variaciones en las propiedades de éste, por lo cual, en ocasiones se utilizaba más reactivos de los necesarios. Gracias al control mediante el PLC, con el software RSLogix 500 se programaron los cálculos que deben realizarse para conocer las cantidades exactas que se necesitan según el aceite que se emplee. Esto ayuda a eliminar los desperdicios.
- Exactitud en el proceso. Como se mencionó en el inciso anterior, se añaden las cantidades exactas según la acidez del aceite, por lo que el proceso se realiza a cabalidad.
- Recuperación de metanol. Cuando se genera presión en el reactor, ésta debe aliviarse dejando escapar el vapor de metanol. Sin embargo, con la implementación de un condensador, este vapor puede recuperarse y utilizarse en procesos posteriores.
- Eliminación de riesgos de sobrepasar presiones o temperaturas críticas que afecten el proceso. Se cuenta con un sistema de seguridad que detiene el proceso cuando se alcanzan los límites máximos de presión y temperatura.

De este modo la reacción se lleva a cabo dentro de los parámetros establecidos. Anteriormente, este control se realizaba midiendo la temperatura dentro del reactor y luego fuera de éste para obtener una relación de temperaturas y calcular cuando éstas fueran críticas. Es evidente que los datos no eran tan confiables como los que se generan a través del sistema.

- Mejor aprovechamiento de los ácidos grasos libres. Anteriormente no se realizaba la catálisis ácida, por lo que no se lograban aprovechar los ácidos grasos libres.
- Evitar errores de medición durante el proceso. Debido a una mala organización de los estudiantes pueden ocasionarse errores de medición, ya que no están pendientes de ciertos parámetros indispensables para que la obtención del biodiesel sea la adecuada. Gracias al monitoreo constante de estas variables y del proceso en todo momento, se disminuyen en gran medida este tipo de errores.

2. Columna de extracción líquido-líquido

- Disminución de riesgos de accidentes dentro del laboratorio. Se evita el contacto de los estudiantes con el éter dietílico y el ácido acético, ya que las mediciones de concentración de la alimentación, disolvente, refinado y extracto, se realizan automáticamente y no es necesaria la manipulación de estas sustancias durante el proceso. Lo anterior asegura la integridad física de los estudiantes, evitando accidentes graves dentro del laboratorio.
- Mejor aprovechamiento de materia prima. Se cuenta con una unidad de recuperación de solventes. Anteriormente todo el éter dietílico era desechado, pero con este sistema se puede recuperar hasta un 80% éter dietílico, por lo que puede utilizarse posteriormente para otros procesos.
- Exactitud en el proceso. Se tiene un control computarizado de las bombas de alimentación, válvula del condensador y demás parámetros, mejorando los resultados obtenidos porque las mediciones son certeras. Asimismo, se evitan

errores humanos al realizar los cálculos, asegurando una operación adecuada.

- Eficiencia del proceso. El agitador de velocidad variable mejora la extracción creando turbulencia. Además, éste es controlado electrónicamente a través de un variador de frecuencia, minimizando errores en el proceso.
- Eliminación de riesgos de daño a la propiedad (equipo). Gracias a la interfaz gráfica de control, se puede advertir al usuario sobre una inadecuada operación del equipo. Además posee sensores de nivel en los tanques de alimentación, que apagan las bombas automáticamente al llegar al nivel más bajo, evitando daños en las mismas. Esto representa un ahorro de \$ 2,748.46 en el caso que se dañaran las dos bombas con las que se cuenta. Finalmente, se tiene un sistema de seguridad, ya que el usuario no puede operar fuera de los límites requeridos para el buen funcionamiento del equipo.
- Facilita el aprendizaje. La columna está diseñada para trabajar tanto manual como automáticamente, por lo que los estudiantes pueden tener una mejor comprensión del proceso al realizarlo manualmente y luego complementar el aprendizaje operándola de forma automática, para observar las diferencias entre cada proceso y determinar experimentalmente los porcentajes de error resultantes de la operación manual.

3. Torre de enfriamiento

- Facilita el proceso de operación. La mezcla de vapor y agua se realiza de forma automática, por lo que no es necesario que los estudiantes calculen la apertura de cada válvula para obtener la temperatura deseada.
- Mejora el control del proceso. Se puede controlar la velocidad del aire para enfriar al agua hasta la temperatura deseada. Previamente no se contaba con este control, por lo que era más difícil determinar cuándo se obtenía la temperatura requerida.

- Mejor aprovechamiento de materia prima. Toda la tubería se encuentra recirculada, de manera que el agua que sale fría de la torre vuelve a calentarse con vapor para iniciar nuevamente el proceso.
- Facilita el aprendizaje. Al igual que la planta de biodiesel y la columna de extracción, en la torre de enfriamiento se tiene la opción de operar tanto manualmente como de manera automática. Esto permite a los estudiantes familiarizarse con el equipo y adquirir el conocimiento para operarlo de ambas formas. Además es un sistema preventivo, ya que si se arruinara alguna válvula electrónica, puede continuarse con el proceso manualmente.
- Eliminación de daños a la propiedad (equipo). Se establecieron ciertas limitantes al momento de realizar el programa en el PLC con el fin de evitar el uso inadecuado del equipo. Por ejemplo, si el usuario agrega sólo vapor, éste sube por toda la tubería hasta la parte superior de la torre y, debido a que el vapor se encuentra aproximadamente a 125°C, puede dañar toda la tubería. Sin embargo, con el sistema de seguridad se impide que se libere el vapor hasta que se abra la válvula de agua fría. Por otro lado, el rotámetro tiene un límite de 10 galones/minuto. Si en algún momento la torre alcanzara los 15 galones/minuto, el rotámetro se dañaría. Por esta razón se colocó un límite en la cantidad máxima de agua y vapor, para no sobrepasar el caudal máximo. Esto representa un ahorro de \$1,780.00 en el caso que se averiaran los rotámetros.
- Eficiencia y exactitud en el proceso. Debido a que se cuenta con una interfaz gráfica, se puede monitorear el proceso en todo momento, lo cual facilita la identificación del mal manejo o funcionamiento del equipo. Asimismo, el control de las variables permite agregar las cantidades exactas de cada sustancia y operar dentro de los límites correspondientes para obtener mejores resultados.

4. Ventajas para los tres módulos

- Facilitar el aprendizaje y el proceso de operación. A los futuros estudiantes de Ing. Química, les permite familiarizarse con la manipulación de equipo automatizado. Esto los prepara para desenvolverse en su práctica profesional, ya que cuentan con conocimientos que aplicarán en un futuro. Asimismo, les permite comprender con mayor facilidad el proceso de producción de biodiesel, extracción líquido-líquido y enfriamiento. Para las personas involucradas en el desarrollo del proyecto, es una experiencia enriquecedora, pues en determinado momento pueden implementar mejoras en las industrias donde laboren al estar familiarizados con los beneficios de la automatización. Por otro lado, se disminuye el tiempo invertido en cálculos, titulaciones, entre otros, para determinar la acidez de los aceites, proporción de las mezclas, medición de concentraciones, etc., con lo cual se disminuye el tiempo de operación.
- Posicionar a la UVG como una institución vanguardista. La UVG se caracteriza por ser una casa de estudios enfocada a impulsar profesionales de éxito. Por tal motivo, cuenta con herramientas especializadas para facilitar el aprendizaje como es el caso de la planta piloto de biodiesel, la columna de extracción líquido-líquido y la torre de enfriamiento, que ofrecen características similares a las que se encuentran en cualquier industria. Debido a lo anterior se reconocen las ventajas de formar parte de la comunidad UVG, garantizando una formación integral en comparación con otras universidades del país.

X. CONCLUSIONES

1. La estructuración del grupo de megaproyecto en módulos de trabajo independientes, facilitó la concretización de las tareas, ya que cada estudiante estaba al tanto de sus responsabilidades.
2. Las variables críticas del proceso de extracción líquido-líquido son las concentraciones de los flujos de alimentación, la concentración del refinado, la concentración del extracto y los flujos de alimentación de la mezcla y el disolvente.
3. Las variables críticas del proceso de enfriamiento son las temperaturas y flujo de agua, además de las temperaturas, presiones, porcentaje de humedad relativa y velocidad de aire en la entrada y salida de la torre.
4. Las variables críticas del proceso de la planta de biodiesel son la presión, temperatura, humedad y conductividad de los diferentes reactivos y productos del proceso.
5. Se realizó la automatización de los diferentes procesos usando un PLC, sensores y actuadores industriales, permitiendo el monitoreo y control de cada proceso desde una computadora instalada en el Laboratorio de la UVG.
6. El costo total del megaproyecto fue de \$61,760.27, de los cuales \$32,065.06 fueron incurridos en la planta de biodiesel, \$17,904.99 en la columna de extracción líquido-líquido y \$11,790.22 en la torre de enfriamiento. Por lo tanto, el equipo que representa el costo más elevado fue la planta de biodiesel, con un 52% del costo total, debido a la complejidad del proceso y la necesidad de más instrumentación, válvulas y tuberías.
7. Con la implementación de un sistema automatizado en la planta de biodiesel, columna de extracción líquido-líquido y torre de enfriamiento se obtuvieron los

siguientes beneficios: exactitud del proceso, eficiencia en las operaciones, disminución de riesgos de accidentes, protección de los equipos, mejor aprovechamiento de materia prima, facilitar el aprendizaje y posicionar a la UVG como una institución vanguardista.

XI. RECOMENDACIONES

1. Implementar válvulas proporcionales en las entradas de agua de la torre de enfriamiento y un rotámetro en la salida de agua, para obtener un mejor control del proceso de enfriamiento y obtener mejores resultados en el proceso.
2. Se recomienda implementar varios cambios a la planta de biodiesel: Cambiar el agitador neumático del reactor en la planta de biodiesel por uno que funcione con energía eléctrica, cambiar las válvulas de bronce de bola y de globo de los by-pass de vapor en la planta de biodiesel por válvulas de globo de hierro al carbón, cambiar el sensor de humedad instalado en la planta de biodiesel para determinar la humedad del aceite en la marmita con uno que pueda resistir temperaturas de hasta 100°C.
3. Además se recomienda agregar a la planta de biodiesel un sensor de humedad en el tanque de tratamiento de glicerina, una separadora por centrifugación y un sistema de drenaje para el agua que proviene de las trampas de vapor.
4. Se recomienda incorporar un sistema o procedimiento para realizar pruebas de contenido de mono, di y triglicéridos, y de glicerina libre y glicerol total en el biodiesel, para verificar la eficiencia de conversión del aceite y asegurar la buena calidad del biodiesel.
5. Se recomienda instalar una válvula proporcional en la parte inferior de la columna de extracción líquido-líquido y la implementación de rotámetros en las salidas de la columna, además de la sustitución de la manta de calentamiento por un equipo de calentamiento más eficiente.
6. Por último se recomienda continuar con la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de Ingeniería Química, en posteriores megaproyectos, ya que esto es de beneficio tanto para los estudiantes como para el Departamento de

Ing. Química. A través del desarrollo de estos proyectos se alcanzan ahorros significativos al momento de realizar mejoras en las instalaciones y conlleva ventajas competitivas para quienes hacen uso de este equipo.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acosta, Fernando; P. Castro y E. Cortijo. 2008. *Manual de construcción y uso de Reactor para producción de biodiesel a pequeña escala*. Serie Manuales 37. Lima, Perú, Soluciones prácticas ITDG. Localizado en Internet en: <http://www.itdg.org.pe/publicaciones/pdf/Manualconstruccion.pdf>
- [2] Bozuto, A. M. *Introducción a los Controladores Lógicos Programables*.
- [3] Bucknell University. (2009). *Temperature Sensor- The Thermocouple*. Obtenido de Bucknell University: <http://www.fascstaff.bucknell.edu/mastascu/elessonsHTML/Sensors/TempThermCpl.html>.
- [4] Campero, E. B. (1995). *Instalaciones Eléctricas, 2da Edición*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- [5] Castro, Paula; J. Coello y L. Castillo. 2007. *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Serie Libros N° 51. Lima, Perú, Soluciones prácticas ITDG. Localizado en Internet en: <http://www.itdg.org.pe/publicaciones/pdf/prousbio.pdf>
- [6] Creus Solé, A. (2006). *Instrumentación Industrial, Séptima Edición*. México: Alfaomega.
- [7] Demirbas, Ayhan. 2008. *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Inglaterra, Springer-Verlag. Localizado en Internet en: http://books.google.com.gt/books?id=0vBalrSH_OEC&pg=PR1&dq=biodiesel&client=firefox-a#v=onepage&q=&f=false
- [8] Departamento de Ingeniería Química UNAM. (2009). *Generalidades de Torres de Enfriamiento*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de México (UNAM): <http://depa.pquim.unam.mx/~generalidades.html>
- [9] Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. (2009). *Torre de Refrigeración*. Obtenido de Universidad del País Vasco: <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/Torre.htm>
- [10] Felder, Richard y R. Rousseau. 2007. *Principios elementales de los procesos químicos*. 3ª ed. México, Limusa Wiley. 681 págs.
- [11] Galicia, M. (2006). *Procesos de Separación*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de México (UNAM)
- [12] Girón, Otto. 2009. "Automatización de la Torre de Absorción en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala". *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*. Publicación No. 19, Agosto.
- [13] Instserv. (2009). *Thermocouple Technical Reference Data*. Obtenido de Instserv.

- [14] Lanzo, S. E. (2009). *Thermocuple Application Note*. Obtenido de <http://www.lanzo.se/applications/thermocouple.html>.
- [15] McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7ª ed. México: McGraw-Hill. 1189 págs.
- [16] Migatron Corp. (2009). *RPS-3000PVC, RPS-4000 Ultrasonic Level Sensor*. Obtenido de Migatron Corp: www.migatron.com/products/rps-3000/rps-3000.htm
- [17] Miliarium Aureum, S.L. 2004. *Biodiesel*. Madrid. Localizado en Internet en: <http://www.miliarium.com/monografias/Biocombustibles/Biodiesel/Biodiesel.asp>
- [18] Morris, A. S. (2005). *Measurement & Instrumentation Principles, First Edition*. . Oxford, Elsevier. NI (2009). *Measuring Pressure with Pressure Sensors*. Obtenido de NI: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3639>
- [19] Ox.ac.uk. (2009). *Coriolis massflow meter research*. Obtenido de Ox.ac.uk: http://seva.eng.ox.ac.uk/research_coriolis.html
- [20] Perry, R., Green, D., & Maloney, J. (2007). *Manual del Ingeniero Químico*. España: McGraw Hill.
- [21] Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. México, McGraw Hill. 2582 págs.
- [22] Salvador, Byron. 2010. «Automatización de Planta de Producción de Biodiesel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala». Trabajo de Graduación Universidad del Valle de Guatemala. 80 págs.
- [23] Treybal, R. E. (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa*. McGraw-Hill. Universidad Nacional Experimental del Táchira. (2009). *Sensores de Temperatura*. Obtenido de Universidad Nacional Experimental del Táchira: <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/Sensores%20de%20Temperatura.htm>.
- [24] Van Gerpen, J., & Knothe, G. (2005). Basics of the Transesterification Reaction. *The Handbook of Biodiesel*. American Oil Chemist's Society (AOCS) Press , págs. 34-46.
- [25] Van Gerpen, J, et al. 2004. *Biodiesel Production Technology*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Colorado, Estados Unidos. Localizado en: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36244.pdf>
- [26] Wearcheck Ibérica. 2004. "Especificaciones del gasóleo (A) y biodiesel". *Boletín Mensual sobre Lubricación y Mantenimiento*. Localizado en Internet en: http://www.wearcheckiberica.es/boletinMensual/PDFs/ESPECIFICACIONES_DEL_GASOLEO_Y_BIODIESEL.pdf

XIII. APÉNDICE

A. Modelos de la planta piloto de biodiesel en Autocad

Ilustración 78. Vista de planta del modelo de la planta piloto

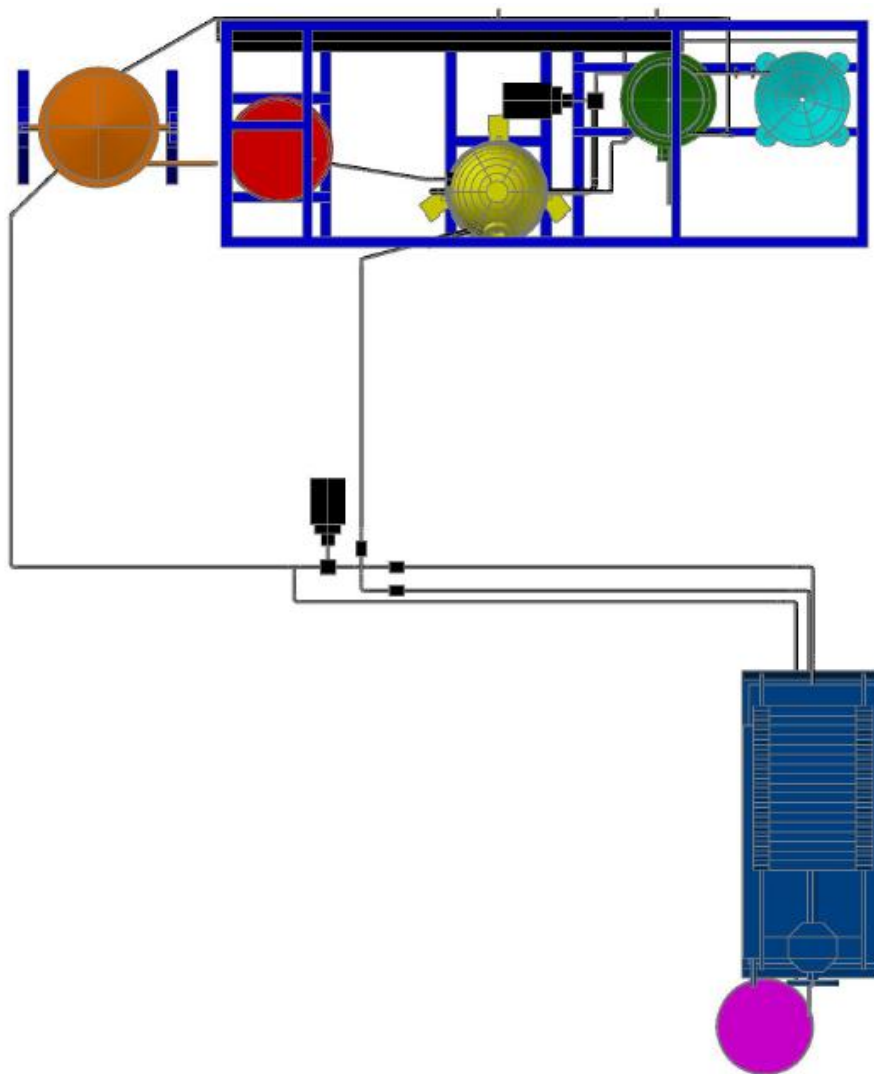


Ilustración 79. Vista frontal del modelo de la planta piloto

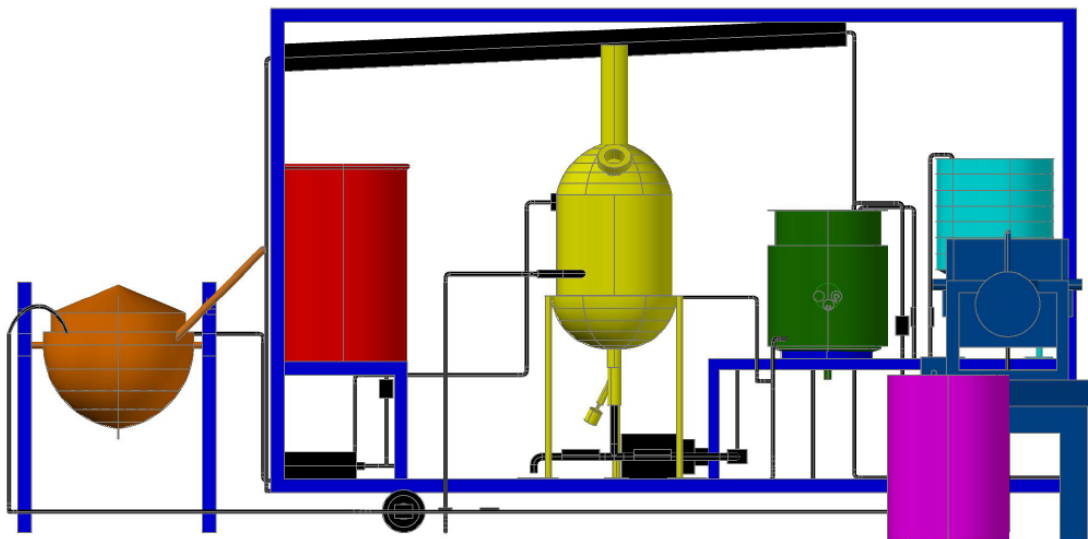


Ilustración 80. Vista lateral izquierda del modelo de la planta piloto

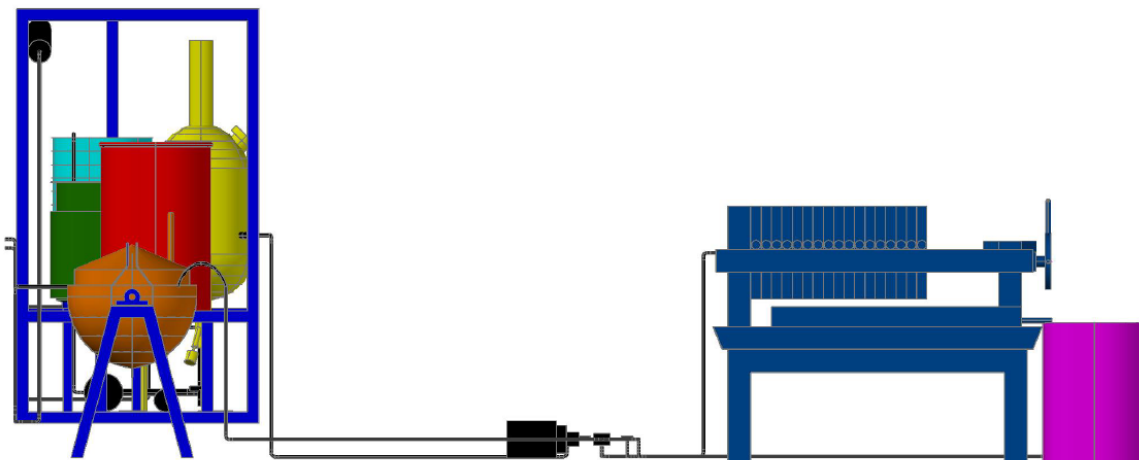


Ilustración 81. Vista isométrica derecha del modelo de la planta piloto

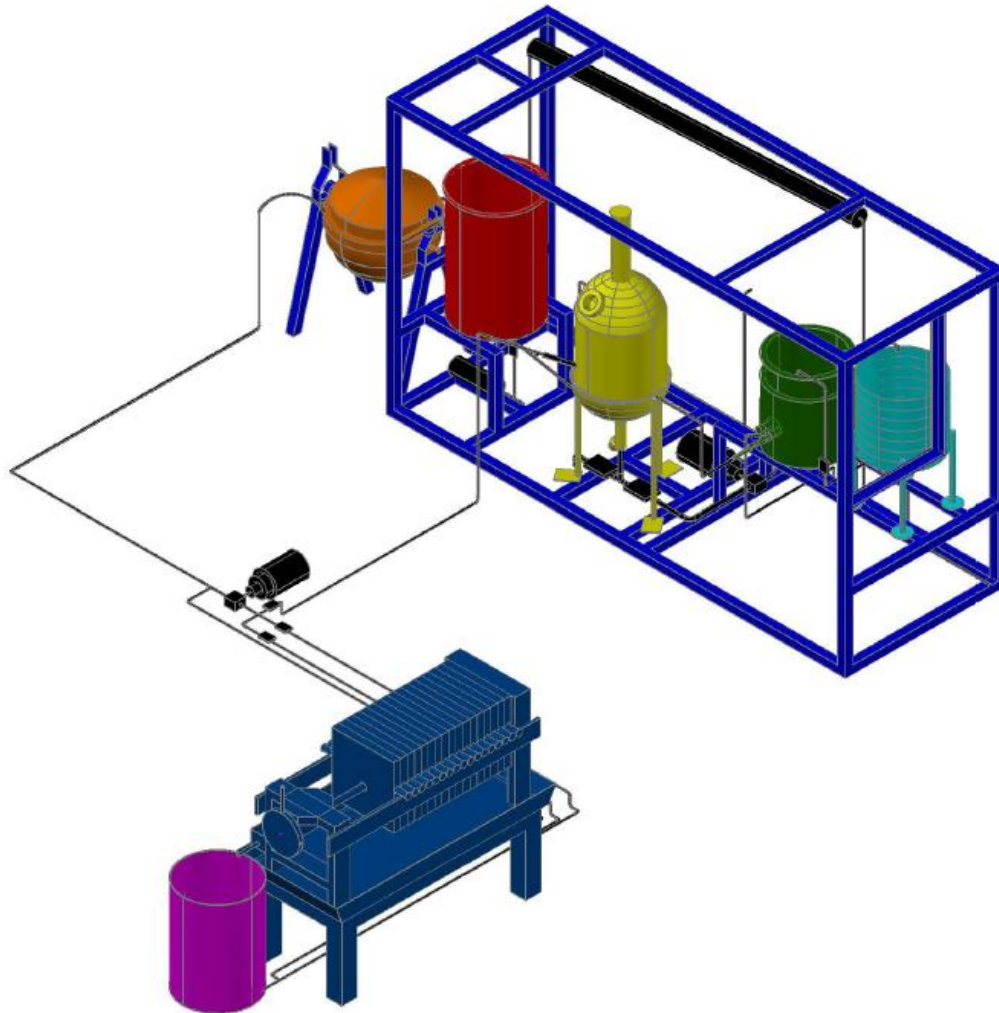


Ilustración 82. Vista isométrica posterior del modelo de la planta

