

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



DISEÑO DE UN SISTEMA CONTINUO DE SATURACIÓN DE SALMUERA

Trabajo de graduación presentado por Juan Diego Asturias Tercero para optar al grado
académico de
Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2013

DISEÑO DE UN SISTEMA CONTINUO DE SATURACIÓN DE SALMUERA

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería



DISEÑO DE UN SISTEMA CONTINUO DE SATURACIÓN DE SALMUERA

Trabajo de graduación presentado por Juan Diego Asturias Tercero para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química


Guatemala
2013

Vo.Bo.

(f) 
Ing. Cristián Rossi

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gamal el Zambrano

(f) 
Ing. Luis Nuñez

(f) 
Ing. Cristián Rossi

Fecha de aprobación: Guatemala, 25 de enero del 2013

Contenido

Lista de tablas.....	vi
Lista de gráficas.....	viii
Lista de imágenes.....	ix
Resumen	x
I. Introducción	1
II. Marco teórico.....	2
A. Cloruro de sodio.....	2
B. Conductividad	6
C. Cristalización y disolución.....	7
D. Equilibrio líquido – sólido:	9
E. Equipos.....	11
III. Antecedentes	22
IV. Justificación	23
V. Objetivos.....	24
A. Generales	24
B. Específicos.....	24
VI. Metodología	25
VII. Resultados	28
VIII. Discusión	39
IX. Conclusiones:.....	47
X. Recomendaciones:	49
XI. Bibliografía:	50
XII. Apéndices	52
A. Datos originales	52
B. Cálculo de muestra	59
C. Datos calculados	76
D. Gráficas	105
E. Equipos.....	119
F. Terminología	137

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1: Concentración de distintas sales en agua de mar.....	4
Tabla No. 2: Solubilidad de diferentes compuestos presentes en agua marina.....	6
Tabla No. 3: Conductividad de solución de NaCl saturada a diferentes temperaturas.	7
Tabla No. 4: Entalpía de formación de cloruro de sodio.....	11
Tabla No. 5: Capacidades caloríficas en cal/g°C de soluciones de NaCl	11
Tabla No. 6: Límites para la aplicación del método de sistemas de mezclado jet	13
Tabla No. 7: Selección de alimentador basado en consideraciones del material	14
Tabla No. 8: Selección de alimentador basado en consideraciones de aplicación	15
Tabla No. 9: Límites del diseño de cada alimentador.....	15
Tabla No. 10: Ecuación cinética en rango de concentración a temperaturas	29
Tabla No. 11: Listado de equipos diseñados para el proceso de saturación.	29
Tabla No. 12: Dimensiones de tanque de saturación de salmuera.....	33
Tabla No. 13: Dimensiones de la tolva de almacenaje de la sal.....	35
Tabla No. 14: Dimensionamiento del alimentador vibratorio	36
Tabla No. 15: Bomba de descarga de salmuera.	36
Tabla No. 16: Bomba de alimentación de salmuera agotada.	36
Tabla No. 17: Bomba de alimentación de agua desionizada.....	36
Tabla No. 18: Dimensionamiento de soplador para agitación de sistema.	37
Tabla No. 19: Especificaciones de boquilla Jet para agitación	37
Tabla No. 20: Cálculo de valor presente neto y tasa interna de retorno para proyecto.....	38
Tabla No. 21: Medida de humedad de sal utilizada.....	52
Tabla No. 22: Datos de masa obtenida en probeta de 1 litro para cálculo de densidad. ..	52
Tabla No. 23: Medición de velocidad de agitador magnético	52
Tabla No. 24: Mediciones de granulometría de partículas de sal	53
Tabla No. 25: Mediciones de ángulos específicos de sal.	54
Tabla No. 26: Conductividad de sal industrial utilizada para curva de calibración.	54
Tabla No. 27: Medidas de muestra de NaCl grado reactivo 45°C.	54
Tabla No. 28: Conductancia para las corridas de disolución 1 – 4.	55
Tabla No. 29: Continuación de Tabla No. 28	56
Tabla No. 30: Conductancia para las corridas de disolución 5 – 7.	57
Tabla No. 31: Continuación de Tabla No. 30	58
Tabla No. 32: Conductividad en los puntos de descarga de tanque piloto.	59
Tabla No. 33: Tamaño de partícula para las 40 muestras de sal industrial.	76
Tabla No. 34: Continuación Tabla No. 33 para resultados granulométricos.	77
Tabla No. 35: Densidad calculada de sal	77
Tabla No. 36: Resumen de propiedades de sal utilizada	78
Tabla No. 37: Promedio de velocidad de agitador magnético.	78
Tabla No. 38: Regresión lineal de sal industrial 45°C.....	78
Tabla No. 39: Análisis ANOVA regresión lineal conductividad contra concentración ^{0.5} . ..	79
Tabla No. 40: Regresión lineal de sal industrial 55°C.....	79
Tabla No. 41 : Análisis ANOVA regresión lineal conductividad contra concentración ^{0.5} . ..	80
Tabla No. 42: Regresión lineal de sal industrial 55°C.....	80

Tabla No. 43: Análisis ANOVA regresión lineal conductividad contra concentración ^{0.5} ...	81
Tabla No. 44: Comparación entre sal industrial utilizada y sal grado reactiva a 99.95% .	81
Tabla No. 45: Análisis ANOVA $-\ln 1 - XA - t$ para una cinética de primer orden.	81
Tabla No. 46: Análisis ANOVA $\log_{10} dCNaCl dt - \log_{10} CNaCl$	82
Tabla No. 47: Análisis ANOVA $-\ln 1 - XA - t$ para una cinética de primer orden.	82
Tabla No. 48: Análisis ANOVA $\log_{10} dCNaCl dt - \log_{10} CNaCl$	82
Tabla No. 49: Análisis ANOVA $-\ln 1 - XA - t$ para una cinética de primer orden.	83
Tabla No. 50: Análisis ANOVA $\log_{10} dCNaCl dt t \log_{10} CNaCl$	83
Tabla No. 51: Corrida No. 3 a 45°C para cinética de primer orden.	84
Tabla No. 52: Continuación de Tabla No. 51.	85
Tabla No. 53: Datos calculados de la corrida No. 3 a 45°C para cinética de orden n.	86
Tabla No. 54: Continuación de Tabla No. 53.	87
Tabla No. 55: Corrida No. 4 a 45°C para cinética de primer orden.	88
Tabla No. 56: Continuación de Tabla No. 55.	89
Tabla No. 57: Corrida No. 4 a 45°C para cinética de orden n.	90
Tabla No. 58: Continuación de Tabla No. 57	91
Tabla No. 59: Corrida No. 1 a 23°C para cinética de primer orden.	92
Tabla No. 60: Continuación de Tabla No. 59.	93
Tabla No. 61: Corrida No. 1 a 23°C para cinética de orden n.	94
Tabla No. 62: Continuación de Tabla No. 61.	95
Tabla No. 63: Corrida No. 2 a 55°C para cinética de primer orden.	96
Tabla No. 64: Continuación de Tabla No. 63	97
Tabla No. 65: Corrida No. 2 a 55°C para cinética de orden n.	98
Tabla No. 66: Continuación de Tabla No. 65.	99
Tabla No. 67: Orden y constante de la cinética de reacción a diferentes temperaturas.	100
Tabla No. 68: Energía de activación de la reacción para cada rango de concentración.	100
Tabla No. 69: Diámetro óptimo de tubería en cada sistema.	100
Tabla No. 70: Caracterización de bomba de descarga de salmuera saturada.	101
Tabla No. 71: Caracterización de bomba de alimentación de salmuera agotada.	102
Tabla No. 72: Caracterización de bomba de alimentación de agua desionizada.	103
Tabla No. 73: Inversión de capital necesaria para la ejecución del proyecto.	104
Tabla No. 74: Composición de sal industrial.	119
Tabla No. 75: Precisión del puente de conductividad YSI 35.	119
Tabla No. 76: Pérdidas de presión de tubería para PVC y CPVC cédula 40.	125
Tabla No. 77: Pérdidas de presión de tubería para PVC y CPVC cédula 80.	126
Tabla No. 78: Largo de tubería con misma pérdida de presión que.	126
Tabla No. 79: Datos técnicos de soplador GAST R4H.	133
Tabla No. 80: Tamaño ideal de tubería para flujo de aire de sopladora.	134
Tabla No. 81: Correspondiente largo de tubería para accesorios.	134

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica No. 1: Producción total de sal en millones de toneladas.....	3
Gráfica No. 2: Concentración de elementos en agua marina (Partes por millón)	3
Gráfica No. 3: Determinación de la concentración de NaCl a partir de un hidrómetro	4
Gráfica No. 4: Solubilidad de distintas sales respecto a la temperatura	10
Gráfica No. 5 : Velocidad terminal de una partícula dentro de un sistema de agitación. .	13
Gráfica No. 6: Distribución de partículas de sal con un intervalo de 0.035 cm	105
Gráfica No. 7: Distribución de partículas de sal con un intervalo de 0.055 cm	106
Gráfica No. 8: Concentración contra conductividad para sal industrial.....	107
Gráfica No. 9: Regresión lineal de conductividad contra concentración ^{0.5} .	
Resultado demostrado de Tabla No. 39 a la Tabla No. 43.....	108
Gráfica No. 10: Variación concentración contra tiempo de tres corridas a 45°C.....	109
Gráfica No. 11: Variación de concentración contra tiempo de medida de disolución a diferente temperatura.....	110
Gráfica No. 12: Variación de concentración contra tiempo a 45°C y solución con concentración inicial de Sal industrial.	111
Gráfica No. 13: Regresión de $-\ln(1-X_a)$ contra tiempo a 23°C en un rango de concentración de 0 a 142 g/L.....	112
Gráfica No. 14: Regresión lineal de $\log(C_a)$ contra $\log(dC_a/dt)$ para una rango de concentración de 142 – 245 g/L a 23°C.	113
Gráfica No. 15: Regresión de $-\ln(1-X_a)$ contra tiempo a 55°C en un rango de concentración de 0 a 221 g/L.....	114
Gráfica No. 16: Regresión lineal de $\log(C_a)$ contra $\log(dC_a/dt)$ para una rango de concentración de 221 – 257 g/L a 55°C.	115
Gráfica No. 17: Regresión de $-\ln(1-X_a)$ contra tiempo a 45°C en un rango de concentración de 0 a 191 g/L.....	116
Gráfica No. 18: Regresión lineal de $\log(C_a)$ contra $\log(dC_a/dt)$ para una rango de concentración de 191 – 251 g/L a 45°C.	117
Gráfica No. 19: Nomograma de viscosidad de líquidos.....	123
Gráfica No. 20: Cálculo del número de potencia para agitadores de placas planas	123
Gráfica No. 21: Caída de presión por electroválvula George Fisher.....	127
Gráfica No. 22: Familia de bombas IWAKI SMX.	127
Gráfica No. 23: Curva característica de la familia de bombas SMX – (F) 54 IWAKI.	128
Gráfica No. 24: Curva de familia de bomba MX- F IWAKI.....	129
Gráfica No. 25: Curva característica de bomba MX – F250 IWAKI	130
Gráfica No. 26: Curva característica de bomba STA RITE serie DPC 0.5 hp.....	131
Gráfica No. 27: Dimensiones de bomba STA RITE serie DPC 0.5 hp.....	131
Gráfica No. 28: Curva característica soplador GAST ® para altas presiones.....	132
Gráfica No. 29: Curva característica de soplador GAST R4H.	132
Gráfica No. 30: Caída de presión de aire por agujero.	134
Gráfica No. 31: Caída de presión de aire por tubería y accesorios para soplador.....	135

LISTA DE IMÁGENES

Imagen No. 1: Proceso de purificación de sal a partir de productos químicos.....	5
Imagen No. 2: Proceso de Hidro extracción.....	5
Imagen No. 3: Proceso de purificación de sal a partir de productos químicos.....	12
Imagen No. 4: Agitador Jet incorporado a un tanque de mezclado	12
Imagen No. 5: Alimentador vibratorio.....	17
Imagen No. 6: Alimentadores vibratorios gemelos	18
Imagen No. 7: Representación de un soplador de impulsor curvo	21
Imagen No. 8: Balance de masa y energía de sistema diseñado.....	28
Imagen No. 9: Esquema de tanque construido para prueba piloto.....	30
Imagen No. 10: Distribución interna de tanque piloto	30
Imagen No. 11: Vista de sistema completo propuesto de disolución de sal.	31
Imagen No. 12: Vista de elevación de tanque de disolución.	32
Imagen No. 13: Vista lateral de tanque de disolución:.....	32
Imagen No. 14: Dimensiones de tanque de disolución.....	33
Imagen No. 15: Vista de planta de distribución de tolvas de recepción de sal.....	34
Imagen No. 16: Vista lateral de tolvas de recepción.....	34
Imagen No. 17: Dimensiones de tolvas de almacenamiento de sal.....	35
Imagen No. 18: Dimensiones de alimentador vibratorio	36
Imagen No. 19: Distribución de tuberías dentro de tanque de agitación.....	37
Imagen No. 20: Balance de masa y energía del sistema	118
Imagen No. 21: Sistema utilizado para la medición de conductividad versus tiempo. ...	120
Imagen No. 22: Sistema de tanque piloto	120
Imagen No. 23: Lazo de control diseñado para el sistema.....	121
Imagen No. 24: Vista de sistema completo.	122
Imagen No. 25: Hoja técnica de alimentador por vibración 52A - Eriez.....	124
Imagen No. 26: Dimensiones de bomba IWAKI SMX – (F) 54 IWAKI.	129
Imagen No. 27: Dimensiones de soplador GAST R4H.....	133
Imagen No. 28: Cotización de tanque de fibra de vidrio	136
Imagen No. 29: Cotización de bomba IWAKI para relacionar inversión de capital.	136

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue realizar el diseño de un sistema continuo de saturación de salmuera. La necesidad de este diseño fue el implementar un sistema continuo automatizado para mejorar la sincronización con el resto de la línea de manufactura en la cual la salmuera es materia prima de un proceso electrolítico que se encuentra instalado en una empresa donde se utiliza la sal como materia prima. Además, con la implementación de este sistema, se facilitaría el proceso de mantenimiento que actualmente se realiza, evitando costos asociados a dos intervenciones anuales de seis días. Para poder realizar el diseño, se determinó la cinética de disolución la sal industrial utilizada (99.43% NaCl) y utilizando agua desionizada como solvente a la temperatura de operación de 45°C. Se realizó el diseño y construcción de un sistema piloto usando un tanque de 0.15 m³ (55 gal), una bomba de 187 W para emular el flujo dentro del tanque diseñado y un sistema de válvulas para tomar muestras a diferentes ubicaciones del tanque, con esto se determinó el comportamiento interno de la agitación y los puntos óptimos de alimentación y descarga de material. Con las mediciones realizadas en este tanque se determinó que la alimentación al mismo sería en la parte superior y la descarga en la parte inferior.

En la medición de la cinética se obtuvo dos ecuaciones para dos rangos de concentración distintos. Debido a que actualmente la planta requiere un reactor de flujo continuo, se utilizó la ecuación para altas concentraciones, obteniendo un tanque con volumen de 6.03 m³ para poder obtener salmuera saturada a un flujo de 4.8 m³ /h. Se procedió a dimensionar los equipos auxiliares para el sistema, estos son tres bombas de las cuales se especificaron dos con sello magnético y una bomba centrífuga simple, un soplador de 3,148 W, dos tolvas de descarga con volumen de 18.10 m³ cada uno y dos alimentadores vibratorios. Se determinó el costo de inversión de capital necesario para la instalación de este sistema, el cual se estimó en Q 535,000, obteniendo un VPN de Q 178,752 a un período de operación de 10 años con una TIR de 19%.

Se realizó la distribución de los equipos en el área destinada, que actualmente es utilizada por el sistema actual, con un ancho de 6 m, largo de 6 m y una profundidad de 7 m, para no afectar otras áreas de la línea de manufactura. Se diseñó el sistema para seguir operando con el mismo procedimiento de descarga de camiones de sal, evitando agregar mayor complejidad al proceso. Para el proceso diseñado se utilizan las mismas materias primas utilizadas actualmente: sal, salmuera agotada y agua desionizada para así lograr obtener salmuera saturada en la descarga.

ABSTRACT

The objective of this work, was to design a continuous brine saturation system. The need of this design was to implement an automated continuous system in order to improve the synchronization with the rest of the production line. With this design, the maintenance that currently is done would be improved, reducing costs associated with two annual interventions of six days. In order to execute the design, the dissolution kinetic of industrial salt was determined, using a sample with 99.43% of NaCl & deionized water as solvent at an operating temperature of 45°C. A scale system was design and constructed using a tank with capacity of 0.15 m³ (55 gal), and a pump of 187 W in order to resemble the flow patter inside the designed tank. A set of valves was placed in order to take different samples from the tank, which helped determine the agitation pattern and the optimum feeding and discharge point. With the results obtained in the scale system, it was determined that the optimum feeding point would be at the upper part and the discharge at the lower part of the tank.

Two kinetic ecuations were calculated for two different concentration ranges. Considering that the site is in need of a continuous reactor, the equation for high concentrations was used. A tank with a volume of 6.03 m³ In order to obtain saturated brine at a flow of 4.8 m³ /h. The auxiliary equipment for the system consists of three pumps, two with magnetic seal and a simple centrifugal pump. A blower of 3,148 W, two discharge hoppers with a volume of 18.10 m³ each and two vibratory feeders. The capital investment needed for this system is Q 535,000, with an NPV of Q 178,752.

I. INTRODUCCIÓN

Con el presente trabajo, se hizo un diseño para un equipo de saturación de salmuera de manera continua para condiciones específicas en una industria que la utiliza salmuera saturada en un proceso electroquímico. Esta industria utiliza actualmente un proceso por lotes o “batch”, por medio de fosa para la saturación el cual presenta costos por necesitar períodos de mantenimiento de seis días semestrales en comparación con la disponibilidad de tres días de mantenimiento al mes. Para poder realizar este trabajo, se buscó identificar el comportamiento específico de disolución de la sal utilizada actualmente. Para esto, se hicieron mediciones en laboratorio con las cuales se determinó la relación entre conductividad y concentración de sal en solución. Luego de determinada la curva de calibración, se llevaron a cabo cinco mediciones de avance de la conductividad con el tiempo con lo que se logró determinar la cinética de disolución del cloruro de sodio. Con la cinética obtenida y el orden de la reacción se determinó el volumen del tanque necesario en satisfacer un flujo de $4.8 \text{ m}^3/\text{h}$ el cual se diseñó en 6 m^3 .

Con el dimensionamiento del sistema a utilizar, se fabricó un sistema piloto en donde se probó agitación por flujo y agitación con aire. Con las especificaciones de operación determinadas, se dimensionaron los equipos a utilizar. Con el diseño de este sistema se buscó encontrar una solución a las intervenciones semestrales realizadas para el mantenimiento y limpieza de la fosa al contar con un proceso por lotes. Además al contar con un sistema continuo de saturación se tiene el beneficio de un mayor control de la operación. Se realizó el dimensionamiento de dos bombas de alimentación, una bomba de descarga, dos tolvas de alimentación y recepción de la sal además de dimensionar un soplador para realizar el proceso de agitación y favorecer el proceso de disolución. Con el equipo dimensionado se realizó la distribución apropiada en el área disponible con el proceso actual y no impactar otras áreas de la operación.

De esta manera, mediante una investigación inicial, seguida por la realización de cálculos matemáticos y el análisis completo de un sistema de saturación de salmuera, se obtuvo el diseño pertinente al presente trabajo. Finalmente, se hizo el análisis económico para determinar la inversión de capital necesaria para ejecutar este trabajo y calcular un análisis financiero para determinar la factibilidad de la inversión. Se obtuvo un VPN positivo con lo que los beneficios obtenidos por la inversión de capital son justificados por el ahorro obtenido.

II. MARCO TEÓRICO

A. Cloruro de sodio

Comúnmente conocido como sal, ha sido de gran influencia en el desarrollo de las actividades humanas de comercio y de industria. La sal es una fuente directa de sodio y cloro, dos de los doce elementos dominantes en el cuerpo humano. Otra gran importancia de este compuesto, es que debido a su bajo costo y amplia disponibilidad, es usado como materia prima en muchos procesos industriales hoy en día, siendo utilizada en 14,000 diferentes maneras. (Mannar, 1982)

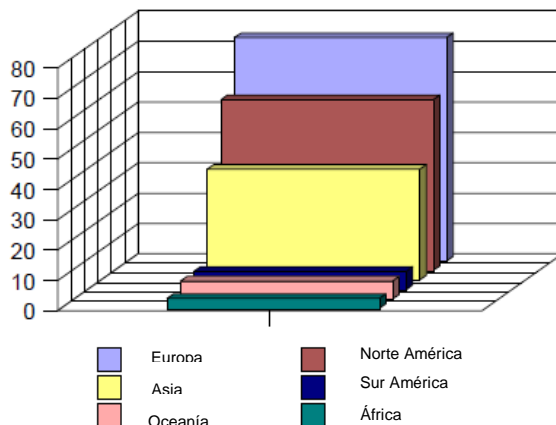
Actualmente, se utiliza el 6% de la producción mundial de cloruro de sodio para consumo humano el resto empleado en industrias químicas. Se encuentra catalogada como uno de los cinco químicos más importantes, conjuntamente con el petróleo, azufre, carbón y piedra caliza. La industria cloro-alcalina cuenta con el mayor consumo de este compuesto, siendo precursor de soda cáustica, ácido clorhídrico, carbonato de sodio y cloro. El cloro es utilizado en la producción de resinas de cloruro de vinilo para la producción de plásticos. El cloro también se utiliza en la industria de papel, tratamiento de agua y desagües, como blanqueador de textiles, síntesis de compuestos inorgánicos y orgánicos y en la industria de fertilizantes. La soda cáustica y el gas hidrógeno son subproductos del proceso electrolítico de formación de gas cloro. La soda cáustica es utilizada en procesos de manufactura de químicos, pulpa de papel, jabones, detergentes y refinamiento de petróleo. La soda caustica es tan importante a nivel industrial, que su consumo es utilizado como un indicador del crecimiento industrial de un país. El hidrógeno es utilizado principalmente en la síntesis de amoníaco. El consumo de carbonato de sodio producido usando sal ha disminuido notablemente tras el descubrimiento de carbonato de sodio en reservas subterráneas. El carbonato de sodio es utilizado principalmente en la manufactura de vidrio, detergentes y jabones en la industria. Una pequeña cantidad de sal es utilizada en la producción de sodio metálico, sulfato de sodio, nitrato de sodio, clorato de sodio y cianuro de sodio. (Kurlansky, 2006)

El cloruro de sodio es utilizado como flujo para la producción de aleaciones de aluminio de alta pureza, como un reactivo en la fabricación de pulpa y papel. La sal y el ácido acético son utilizados para separar emulsión de latex además de ser una importante materia prima para el tratamiento de telas. (Kurlansky, 2006)

En la industria química, la sal es generalmente disuelta en forma de salmuera para su uso. Las impurezas que esta lleva son filtradas antes de su utilización. Como ejemplo, en el proceso electrolítico, exceso de magnesio causará evolución del hidrógeno en el ánodo. La unión de gas cloro con hidrógeno es altamente explosivo con lo que se puede tener una repercusión seria. En procesos donde se utilizan membranas de intercambio iónico, el calcio y magnesio dañan las membranas debido a la dureza que generan. El costo más alto asociado con la purificación de salmuera es el costo de los productos químicos utilizados para su tratamiento. Para poder realizar esta limpieza se utilizan productos floculantes que sedimentan los compuestos en suspensión. (Sedivy, 1996)

1. Producción. La sal es producida por evaporación de agua de mar y minería de depósitos de roca subterránea. En Latinoamérica, la mayor producción de sal se realiza en México. En el desierto de Baja California, se producen 6 millones de toneladas al año por evaporación, siendo la empresa productora más grande del mundo por este método. Brasil es el productor más grande del mundo por todos los métodos de separación. Venezuela es considerado el segundo productor más grande del mundo. (Kurlansky, 2006)

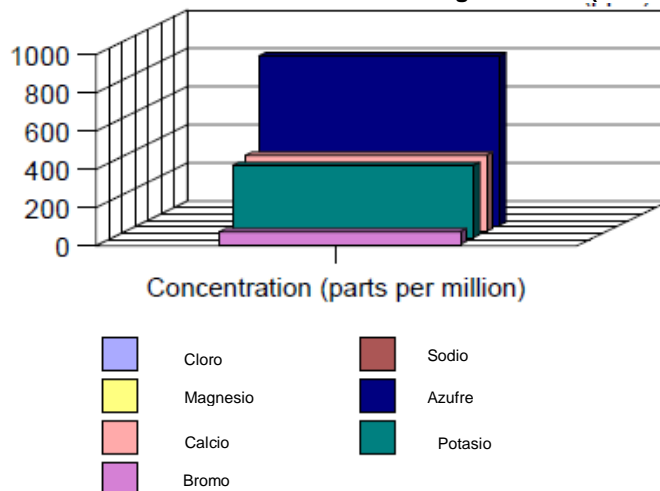
Gráfica No. 1: Producción total de sal en millones de toneladas.



Fuente: Kurlansky. 2006. The story of salt

La producción de sal a partir de agua de mar constituye cerca de 50%, siendo la fuente más variada de cloruro de sodio. Las reservas marinas están estimadas en 50 millones de billones de toneladas de sal. El agua marina también es fuente de varios elementos como potasio, magnesio y bromo. El 65 % del magnesio metálico y el 68% de bromo a nivel mundial son producidos a partir de agua de mar. (Kurlansky, 2006)

Gráfica No. 2: Concentración de elementos en agua marina (Partes por millón)



Fuente: Kurlansky. 2006. The story of salt

Tabla No. 1: Concentración de distintas sales en agua de mar

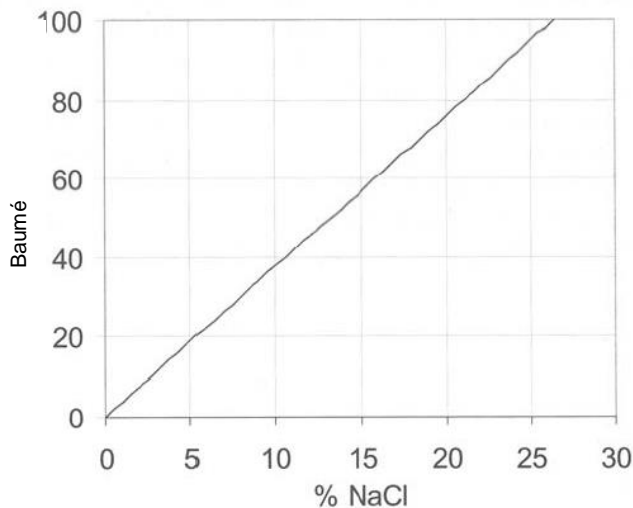
Sal disuelta	Concentración (g/L)	Porcentaje en peso
Carbonato de calcio	0.12	0.34
Sulfato de calcio	1.26	3.61
Cloruro de sodio	27.21	77.74
Sulfato de magnesio	1.66	4.74
Cloruro de potasio	0.86	2.46
Cloruro de magnesio	3.81	10.88
Bromuro de magnesio	0.08	0.23

Fuente: (Mannar. 1982. *Guidelines for the establishment of solar salt facilities from seawater, underground brines and salted lakes*. UNIDO)

La concentración de sal en agua se presenta por medición de grados Baumé.

$$^{\circ}\text{Be} = 145 - \frac{145}{\text{Gravedad específica de salmuera a } 15.6^{\circ}\text{C}} \quad (1)$$

Gráfica No. 3: Determinación de la concentración de NaCl a partir de un hidrómetro

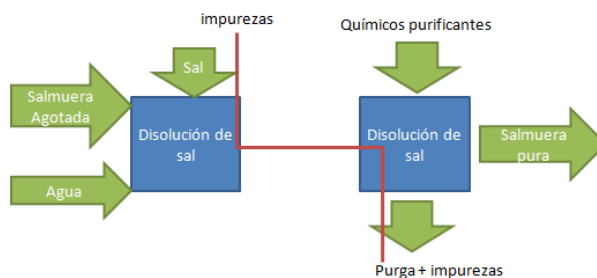


Fuente: Bremer, J. 1983. *Solar Salt Production at Exportadora de Sal*. Sixth International Symposium on salt.

En la industria química, la sal es generalmente disuelta en forma de salmuera para su uso. Las impurezas que esta lleva son filtradas antes de su uso. Como ejemplo, en el proceso electrolítico, el exceso de magnesio generará hidrógeno gaseoso en el ánodo. La unión de gas cloro con hidrógeno es altamente explosiva y se podría tener una

repercusión seria. En procesos donde se utilizan membranas de intercambio iónico, el calcio y magnesio dañan las mismas por deposición. El costo más alto asociado con la purificación de salmuera es el costo de los productos químicos utilizados. Para realizar esta limpieza se utilizan productos flocculantes que sedimentan los compuestos en suspensión. (Sedivy, 1996)

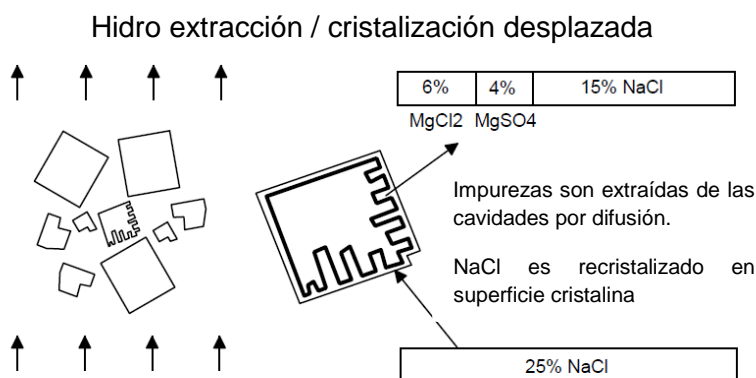
Imagen No. 1: Proceso de purificación de sal a partir de productos químicos



Fuente: V.M. Sedivy. 1996. *Purification of salt for chemical and human consumption*

La sal con el mayor grado de pureza, se obtiene a partir de cristalización al vacío. El proceso de vacío se utiliza en el proceso de evaporación, lo cual permite obtener porcentajes de pureza de 99.95%. La sal puede ser purificada por un proceso conocido como hidroextracción. En este proceso, se forma salmuera saturada la cual fluye en flujo vertical, en contracorriente con cristales de sal siendo ingresados en la parte superior del sistema. Conforme la salmuera fluye verticalmente, disuelve magnesio presente en los cristales de sal, debido a que el magnesio incrementa la densidad del sistema, el líquido saturado por contaminantes permanece en la parte inferior del sistema. La pérdida de este sistema es casi nula ya que la sal disuelta en el proceso, permanece en el sistema y es utilizada nuevamente. Esto es conocido como hidro extracción con cristalización de desplazamiento. (Sedivy, 1996)

Imagen No. 2: Proceso de Hidro extracción



Fuente: V.M. Sedivy. 1996. *Purification of salt for chemical and human consumption*.

Tabla No. 2: Solubilidad de diferentes compuestos presentes en agua marina.

Compuesto	Solubilidad a 30°C (en 100 g de agua)
CaCO ₃	0
CaSO ₄ * 2 H ₂ O	0.2
NaCl	36.3
KCl	37.0
MgSO ₄ *7H ₂ O	40.8
MgCl ₂	56.0
MgBr ₂	104.0

Fuente: (Mannar. 1982. *Guidelines for the establishment of solar salt facilities from seawater, underground brines and salted lakes. UNIDO*)

El proceso de cristalización de Cloruro de Sodio ocurre entre 24.5 °Be y 30°Be. El 72% de toda la sal es precipitada en 29°Be y un 79% ocurre a 30°Be. El cloruro de sodio se cristaliza en pequeños cristales cúbicos. Con una gravedad específica de 2.165 y una pequeña variación de la solubilidad dependiendo de la temperatura. En concentraciones altas cercanas a 30°Be, también se presenta la cristalización de bromuros, cloruro de potasio y sulfato de magnesio. Los productores de sal realizan cristalizaciones fraccionadas para obtener cloruro de sodio en una pureza mayor. La pureza de cloruro de sodio industria va desde 98.5% hasta 99% dependiendo de las aplicaciones. (Mannar, 1982)

2. Equilibrio de fase. Debido a los componentes dominantes en la sal marina, se realiza una separación en un equilibrio de cinco compuestos. Esto es de gran utilidad para determinar el grado de separación de los diferentes compuestos en la sal, aunque al utilizar sal refinada (NaCl > 98.5%), se omite este equilibrio por la poca influencia que presenta en los diferentes procesos. Al trabajar el equilibrio quinario se considera sodio, potasio, magnesio, sulfato y cloro. (Mannar, 1982)

B. Conductividad

La medida estándar de la conductividad de un electrolito es la conductancia específica. Está definido como el recíproco de la resistencia en ohms de un cubo de 1 cm de líquido a temperatura específica. Entre las unidades para medir conductancia se utilizan mhos y siemens. 1 siemens/metro = 1 mho/100 cm. (YSI, 2001)

En un puente de conductividad se obtiene la lectura de conductancia de una solución al variar la amplitud de una onda cuadrada y lograr mantener constante el voltaje del equipo. Las celdas de conductividad se encuentran calibradas a 25°C. Si se opera a otra temperatura se debe corregir el valor obtenido por la alta variación de la conductancia con

la temperatura. En donde k_T es la conductividad a la temperatura medida y α es un coeficiente de corrección para cada electrolito por variación en temperatura. (YSI, 2001)

$$k_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{k_T}{1 + \alpha \Delta T} \quad (2)$$

Para el cloruro de sodio se tiene una variación promedio de 2% por grado de modificación de temperatura. Para soluciones saturadas se tiene un valor de conductividad teórico.

Tabla No. 3: Conductividad de solución de NaCl saturada a diferentes temperaturas.

Cloruro de sodio (NaCl) Soluciones saturadas a varias temperaturas

$^{\circ}\text{C}$	millimhos/cm	%/ $^{\circ}\text{C}$ (to 25°C)
0	134.50	1.86
5	155.55	1.91
10	177.90	1.95
15	201.40	1.99
20	225.92	2.02
25	251.30	2.05
30	277.40	2.08

Fuente: (YSI, 2001)

C. Cristalización y disolución

1. Proceso general. El proceso de cristalización analiza los equilibrios entre fases distintas para que la transición de como resultado un sólido a partir de un compuesto en una fase fluida. El proceso de disolución consiste en el proceso inverso. De los diagramas de fase para cristalización, se debe utilizar la siguiente información: Temperatura de equilibrio, rangos de solución líquida, composición, estado de transición sólido, solubilidad en flujos y solventes y presiones de vapor de la solución. Para este tipo de sistemas, la restricción de solución es limitada por la transferencia de calor. (Rosenberg, 1981)

El sistema ideal de cristalización tiene las siguientes características:

- Elemento puro
- Presión de vapor baja
- Bajo punto de fusión
- Alta conductividad térmica
- Bajo calor de solidificación

- No cuenta con fase de transición en estado sólido entre el punto de fusión y la temperatura ambiental.

Según la teoría del potencial químico, dos fases pueden existir en equilibrio únicamente si alcanzan el mismo potencial químico μ . Para alcanzar el proceso de disolución, se tiene que manipular las variables de tal forma que la función de Gibbs del sólido sea mayor que la de los componentes en el sistema. La ecuación de Gibbs – Duhem, establece las variables con las cuales se puede aumentar el potencial químico del sólido o disminuir el potencial químico del líquido puede realizarse por variación de la temperatura y la presión. (Rosenberg, 1981)

Ecuación de Gibbs- Duhem:
$$\sum_{i=1}^I N_i d\mu_i = -SdT + VdP$$
 (3) (Smith, 2007)

En donde μ es el potencial químico de cada especie, N representa el coeficiente estequiométrico, S representa la entropía de la reacción, dT representa el cambio de temperatura de la reacción, V representa el volumen utilizado y dP es la variación de la presión por la reacción. (Smith, 2007)

La cristalización es una importante operación de transferencia de masa que es utilizada en la preparación de productos puros. La separación de un sólido en solución con un líquido, solamente ocurre si hay un desbalance que involucra a una fuerza motriz de transferencia de masa, el potencial químico. Para que esto pueda ocurrir en cualquiera de las dos direcciones, se debe cumplir la restricción que la solución debe estar supersaturada. (Theodore, 2010)

La cristalización puede ocurrir por enfriamiento, evaporación o en un proceso de evaporación adiabática. Si no se llegan a controlar con gran detalle las variables de proceso, se pueden presentar los siguientes problemas: tasa de obtención de producto, pureza del producto, energía requerida para el proceso, tamaño de los cristales y forma de los cristales. Debido a que la energía en la forma sólida del compuesto es menor que la energía de los iones con el agua, al generarse la cristalización se libera energía en el sistema conocida como entalpía de cristalización. (Theodore, 2010)

Las impurezas en la cristalización son introducidas por la alimentación primaria de solución saturada que no son removidas del producto sólido. La aglomeración de pequeños cristales en grandes bloques, hace que el proceso de lavado sea más difícil, resultando en baja pureza del producto. La agitación del sistema, disminuye la tendencia del sistema a aglomerarse. La mejor manera de evitar esta contaminación, es mantener la solución a un nivel de supersaturación bajo, de esta manera grandes cristales son formados. Materiales granulares formados por cristalización, tienen tendencia de formar aglomerados o rocas en almacenaje. Esto obliga a un proceso de trituración antes de poder utilizar los cristales libremente. (Theodore, 2010)

D. Equilibrio líquido – sólido:

Los equilibrios líquido- sólido ejemplifican la interacción entre la composición del cristal en el líquido y algún variable independiente, por lo general temperatura. En una solución sólida donde se genera un sistema de equilibrio, la solubilidad decrece proporcionalmente con la temperatura. Esto debido al comportamiento del potencial químico alrededor de la temperatura crítica de disolución. Disminuyendo la temperatura de la solución, aumentará el potencial químico del sólido, favoreciendo la cristalización, el mismo comportamiento para el caso contrario. (Rosenberg, 1981)

En equilibrios que presentan interacción entre dos compuestos y un solvente, se sigue un comportamiento en el cual la temperatura de disolución del sistema se ve afectada por la concentración de cada compuesto. Cada compuesto individualmente tiene una interacción específica con el solvente y su propia temperatura de disolución. Como se observa en el diagrama, la temperatura de disolución de la mezcla disminuye al aumentar la concentración de cada compuesto hasta llegar a la temperatura eutéctica y la composición eutéctica, que es la temperatura más baja a la cual se disuelve una solución de dos componentes. Los diagramas de equilibrio por composición, trabajan bajo operación de isotermas (Louis, 2010)

El depósito de cristalización es un tanque en el cual se permite que baje la temperatura de la solución por convección natural. Por la baja velocidad de enfriamiento, se necesita amplio espacio para su proceso. No permite ningún control de tamaño o distribución de cristales lo que genera baja calidad de producto. El equipo con mayor rendimiento de proceso es el cristizador de vacío. Este equipo disminuye la presión de operación con lo que se alcanza el punto de ebullición del solvente de manera más rápida por medio de un proceso de *flasheo*, lo que resulta en enfriamiento y condensación de la solución. El problema más grande de este equipo es que el cristal se tiene que evacuar por eyectores debido al sistema de baja presión dentro del reactor. (Louis, 2010)

El límite termodinámico de la energía de disolución es la energía ideal requerida para movilizar agua de una solución salina a una fase pura. La energía mínima teórica está dada por la ecuación (1), en donde ΔG es la energía libre de Gibbs requerida para movilizar un mol de agua de una solución, a es la actividad de agua pura ($^{\circ} 1$) y a_s es la actividad de agua en la solución salina. (Prudich, et Al., 2008)

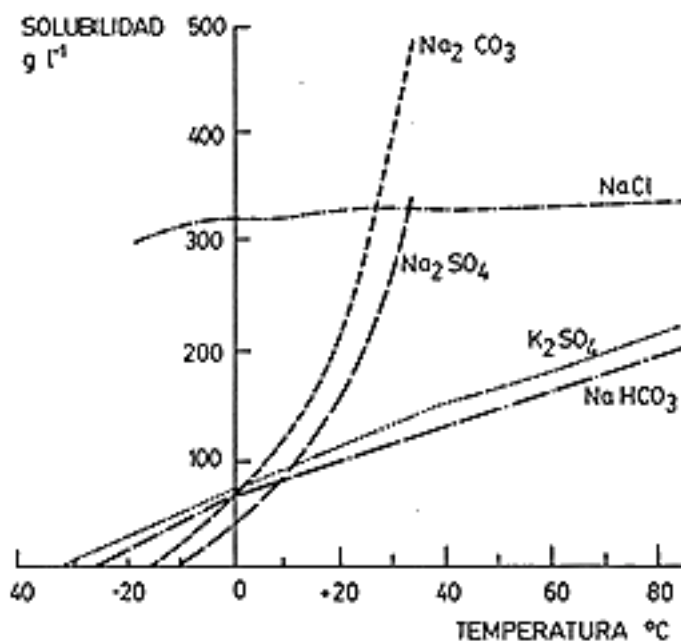
$$\Delta G = RT \ln(a/a_s) \quad (4)$$

En una solución, la actividad de agua es aproximadamente igual a la fracción molar de agua en la solución. De esta manera, la actividad aproximada está dada por la ecuación (2), en donde n_s es el número de moles de agua en la solución salina, n es el número de átomos en la molécula de sal y s_s es el número de moles de sal en la solución de sal. (Prudich, et Al., 2008)

$$a_s = \frac{h_s}{h_s + nS_s} \quad (5)$$

Según la derivación de la ecuación de la energía libre de Gibbs, es posible obtener un gráfico de la solubilidad de las sales contra la temperatura. Dicho gráfico se muestra a continuación. La solubilidad de muchas sales se ve afectada fuertemente por la temperatura, lo que provoca que estas se concentren en la superficie del suelo. Se observa en la Gráfica No. 5 que la solubilidad de las sales es menor en bajas temperaturas.

Gráfica No. 4: Solubilidad de distintas sales respecto a la temperatura



Fuente: Aureum. 2004. Salinidad de los suelos.

El comportamiento de mezclado de una solución de salmuera con agua se ha estudiado utilizando diferentes colorantes para determinar los perfiles de fluidos que se manejan en un tanque. El proceso de mezclado trabajado a contracorriente es dependiente del tiempo que se realice y afecta directamente a la concentración de salmuera en toda la solución. Debido a que se manejan diferentes concentraciones de sal de manera vertical en el tanque, se crea un gradiente de concentración vertical. (Aureum. 2004)

El proceso de disolución de sólidos o gases en líquidos representa un cambio de energía del sistema por diferencias en entalpías entre las especies. La entalpía final de una solución está relacionada con las entalpías puras de los componentes con la contribución térmica del proceso de disolución. En donde H es la entalpía final de una

solución y ΔH corresponde al calor de disolución. La capacidad calorífica de cloruro de sodio a 25°C es de 50.8097 J/molK. (Smith, 2007)

$$H = x_1H_1 + x_2H_2 + \Delta H$$

(6) (Smith, 2007)

En donde H representa la entalpía de cada compuesto y x representa el porcentaje peso peso de cada compuesto en la solución.

Tabla No. 4: Entalpía de formación de cloruro de sodio.

Estado	Entalpía de formación a 25 °C (kcal/mol)
NaCl sólido	-98.321
NaCl (1 mol/ 400 mol agua)	-97.324
Entalpía de disolución	0.998

Fuente: Perry. 2007. Capítulo 2: Propiedades físicas.

Tabla No. 5: Capacidades caloríficas en cal/g°C de soluciones de NaCl

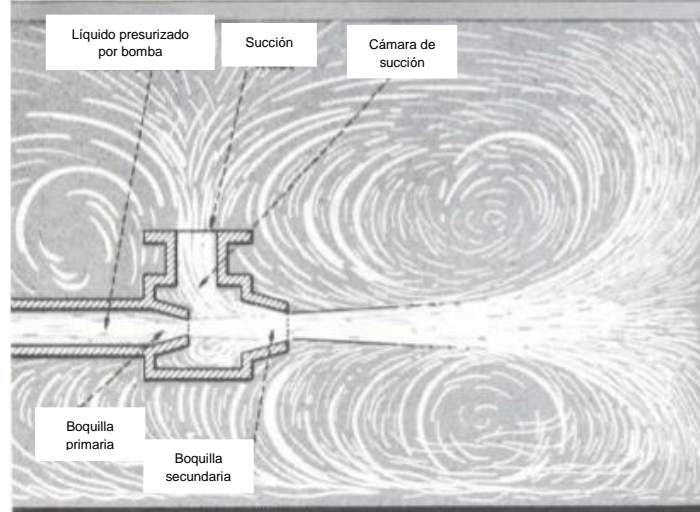
Porcentaje mol NaCl/H ₂ O	6°C	20°C	33°C	57°C
0.249		0.99		
0.99	0.96	0.97	0.97	
2.44	0.91	0.915	0.915	0.923
9.09	0.805	0.81	0.81	0.82

Fuente: Perry. 2007. Capítulo 2: Propiedades físicas.

E. Equipos

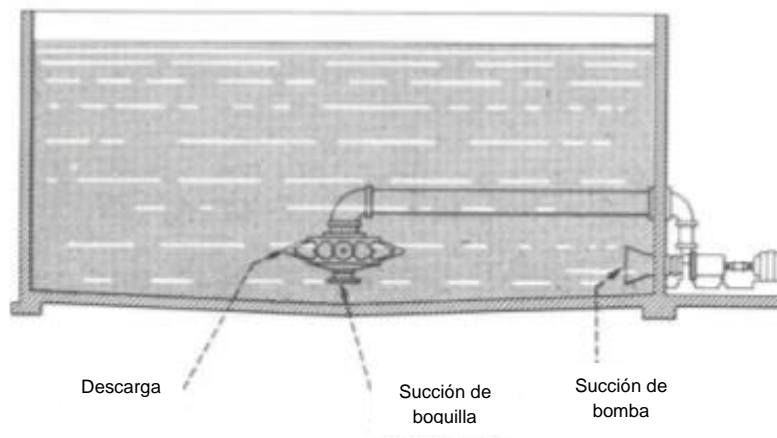
1. Mezclador Jet. En la industria química, es común utilizar el mezclado jet, el cual es un tipo de agitación mecánica que consiste de dos boquillas concéntricas con una cámara de succión entre ellas. A medida que el fluido presurizado fluye a través de la boquilla primaria hacia la cámara, este genera una succión debido a su alta velocidad típicamente entre 6 y 10 m/s para mezclados menos intensos y entre 10 y 20 m/s para mezclados intensos. Dentro del jet, los gradientes de velocidad se encuentran en el orden de 6,000/s, lo que indica que la velocidad podría ir de cero a 20 m/s a lo largo de una distancia de 1/300 m. El fluido mezclado luego se expulsa del jet a través de la boquilla secundaria. Un agitador jet es mostrado en la Imagen No. 3. De la misma manera, se muestra en la imagen No. 4 un agitador jet empleado en la mezcla de una solución que se encuentra en un tanque. (Bathija, 1982)

Imagen No. 3: Proceso de purificación de sal a partir de productos químicos



Fuente: P.R. Bathija. 1982. *Jet mixing design and applications*.

Imagen No. 4: Agitador Jet incorporado a un tanque de mezclado



Fuente: P.R. Bathija. 1982. *Jet mixing design and applications*.

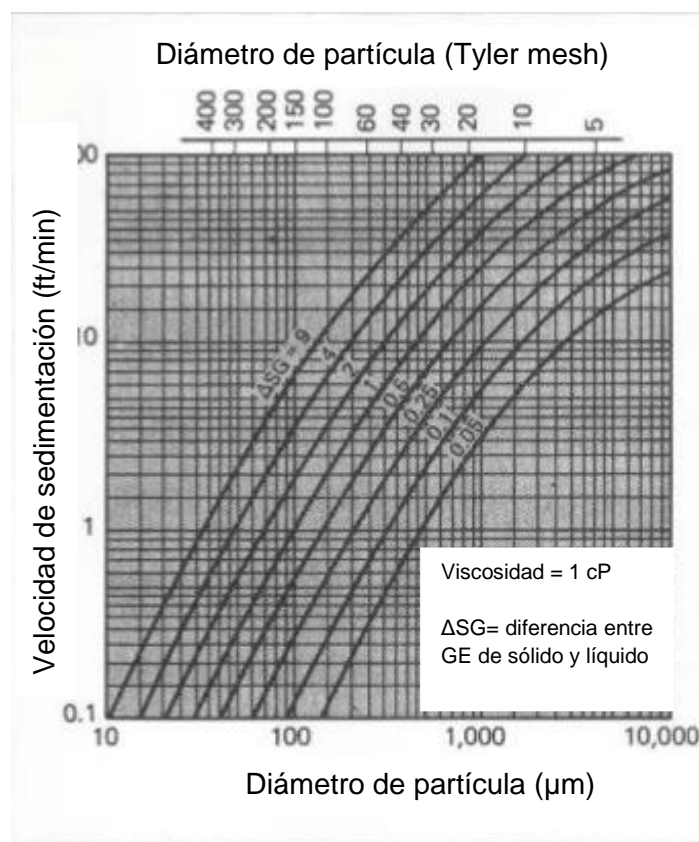
Los sistemas de mezclado de jet son utilizados para aplicaciones de sólidos en suspensión como cristalización, disolución, floculación y lixiviación. La siguiente técnica de diseño permite dimensionar y evaluar el mezclado jet para una aplicación particular. Este método únicamente funciona dentro de los límites que se encuentran en la Tabla No. 6. El primer paso del proceso consiste en determinar la velocidad terminal de asentamiento. La Gráfica No. 6 muestra la velocidad de asentamiento como función del diámetro de la partícula. (Bathija, 1982)

Tabla No. 6: Límites para la aplicación del método de sistemas de mezclado jet

Factor	Límite
Diámetro del tanque	3-12 m
Nivel líquido	0.5-9 m
Volumen total del tanque	Hasta 1,360 m ³
Viscosidad	Hasta 30 cP

Fuente: P.R. Bathija. 1982. *Jet mixing design and applications*.

Gráfica No. 5 : Velocidad terminal de una partícula dentro de un sistema de agitación.



Fuente: P.R. Bathija. 1982. *Diseño y aplicaciones de mezclado en jet*.

El segundo paso del diseño consiste determinar la potencia de la bomba. La Ilustración 5 muestra los caballos de fuerza por cada 1,000 galones requeridos por la bomba para una suspensión sobre el fondo del tanque en un fluido de 1-cP de viscosidad. La velocidad terminal de asentamiento y el porcentaje de sólidos por peso son parámetros para esta determinación. El tercer paso consiste en calcular los caballos de fuerza nominales para el volumen del tanque. Este cálculo se realiza según la ecuación (7), mostrada a continuación. (Bathija, 1982)

$$\text{Poder nominal hp} = (\text{hp por 1,000 gal})(\text{Volumen}/1,000 \text{ gal}) \quad (7)$$

Seguidamente, se ha de determinar el área primaria de las boquillas, la capacidad de la bomba, el número de boquillas y el área por boquilla. Finalmente, se calcula los caballos de fuera del motor impartiendo una corrección al cálculo nominal según la gravedad específica del fluido, como se muestra en la ecuación (8). (Bathija, 1982)

$$\text{hp final} = (\text{hp nominal})(\text{gravedad específica}) \quad (8)$$

2. Alimentadores vibratorios. Los alimentadores son una parte extremadamente importante en un sistema de movimiento de sólidos, debido a que es el medio por el cual los sólidos fluyen desde un contenedor. Cuando un alimentador se enciende, debe haber una correlación cercana entre su velocidad de operación y la velocidad de descarga del sólido. (Carson y Petro, 2006)

Los criterios para seleccionar el tipo de alimentador son los siguientes:

1. Un flujo confiable e ininterrumpido de material de un contenedor externo.
2. El grado de control de descarga deseado para el rango necesario.
3. Retiro uniforme de material a través de la salida del contenedor externo.
4. Interfaz con el contenedor externo de manera que las cargas que actúan en el alimentador desde el contenedor sean mínimas. (Carson y Petro, 2006)

Las Tablas No. 7, 8 y 9 presentan los criterios para seleccionar el tipo de alimentador según las consideraciones de material y de aplicación y según los límites del diseño. (Carson y Petro, 2006)

Tabla No. 7: Selección de alimentador basado en consideraciones del material

Variable	Tornillo	Cinta	Válvula rotatoria	Alimentador vibratorio
Máximo tamaño de partícula	Hasta 1/3 de la apertura.	15 ¼ cm	1 ¼ cm	30 ½ cm<
Facilidad de degradación de partícula	Satisfactorio	Bueno	Satisfactorio	Bueno
¿Material es un polvo seco?	Bueno	Satisfactorio	Excelente	Malo
¿Material es sensible a sobrepresión?	Satisfactorio	Bueno	Satisfactorio	Malo

Fuente: Carson y Petro. 2006. How to Design Efficient and Reliable Feeders for Bulk Solids.

Tabla No. 8: Selección de alimentador basado en consideraciones de aplicación

Variable	Tornillo	Cinta	Válvula rotatoria	Alimentador vibratorio
habilidad para tolerar impacto directo	Satisfactorio	Pobre	Pobre	Bueno
Configuración de tolva de descarga	Cuadrado, redondo o rectangular	Cuadrado, redondo o rectangular	Cuadrado o redondo	Cuadrado o redondo
Operación gravimétrica o volumétrica	Volumétrica	Cualquiera	Volumétrica	Volumétrica
Habilidad para sellar ante altas presiones de gas	Pobre	N/A	Bueno	N/A
Habilidad para controlar el polvo	Bueno	Malo	Bueno	Bueno (si cerrado)
Facilidad de limpieza	Mala	Bueno	Satisfactorio	Bueno

Fuente: Carson y Petro. 2006. How to Design Efficient and Reliable Feeders for Bulk Solids.

Tabla No. 9: Límites del diseño de cada alimentador

Variable	Tornillo	Cinta	Válvula rotatoria	Alimentador vibratorio
Máxima temperatura	537.78 °C	232.22 °C	537.78°C	537.78°C
Máximo flujo (ton/h)	750	3000	500	500
Velocidad de alimentador	2-40rpm	1.5 m/min – 31 m/min	2 – 40 rpm	0 – 25 m/min
Máxima relación entrada/largo	6	Dictado por la profundidad de la cama	N/A	Ilimitado

Fuente: Carson y Petro. 2006. How to Design Efficient and Reliable Feeders for Bulk Solids.

Los alimentadores vibratorios se usan en superficies horizontales o con una inclinación menor para poder regular el flujo. Pueden ser utilizados para transportar material en superficies con poca inclinación (15°). El desplazamiento del alimentador se realiza en relación al ángulo de activación del sistema. El desplazamiento del sistema S_T puede ser calculado en función de la frecuencia del motor que se está utilizando. (MGingley, 2008)

$$S_T = \lambda(1 - \cos 2\pi ft) \quad (10) \text{ ((MGingley, 2008))}$$

Para que un material pueda ser movilizado en el sistema, debe de generarse suficiente aceleración vertical en el sistema y poder vencer la aceleración gravitacional. La relación entre aceleración vertical y la aceleración de la gravedad se conoce como coeficiente dinámico del material. El valor de K se encuentra entre 1 – 4 para transportadores vibratorios y hasta 12 para alimentadores. La partícula se encuentra mayor cantidad de tiempo en el aire que en contacto con el transportado, lo que genera mayor eficiencia de transporte y menor daño a la partícula. (MGingley, 2008)

$$\Gamma = \frac{y_{T_{max}}''}{g} = \frac{\lambda (2\pi f)^2 \sin \beta}{g} \quad (11) \text{ (MGingley, 2008)}$$

$$K = \frac{\Gamma}{\sin \beta} \quad (12) \text{ (MGingley, 2008)}$$

En donde f es la frecuencia eléctrica, β es el ángulo con la vertical, G es la carga del condensado en kg/m-h, \ddot{y} es la aceleración vertical, T_{max} es la temperatura máxima, g es la gravedad de la Tierra, λ es la longitud de onda de la solución y K es el coeficiente de transportadores vibratorios.

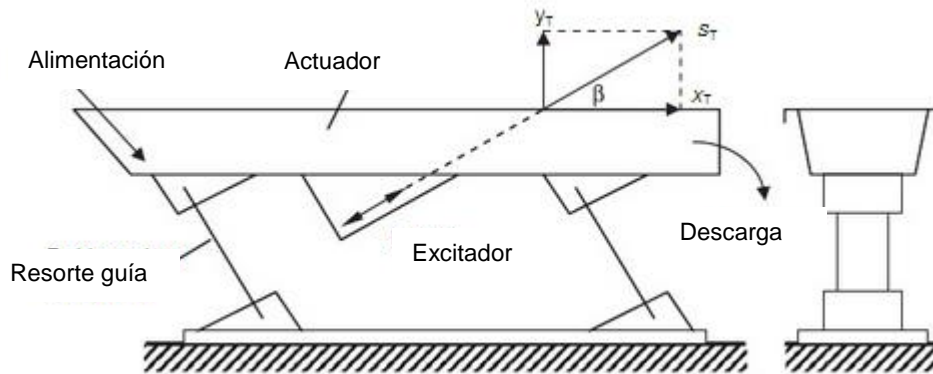
La velocidad de transporte del sólido se puede estimar por la siguiente expresión, en donde η_u es la eficiencia del transportador.

$$u_s = \eta_u \dot{x}_{T_{max}} = \eta_u \lambda 2\pi \cos \beta \quad (13) \text{ (MGingley, 2008)}$$

El efecto de las propiedades de los materiales se encuentra incluido en el término F_m que debe ser determinado experimentalmente, para sólidos granulares se obtiene un valor de 0.9. Otro término relacionado a la operación es la altura del material dentro del vibrador F_h con valores desde 1 para pequeña profundidad hasta 0.75 de una profundidad de 300 mm. La pendiente del alimentador se incluye en el término F_j teniendo valores de 1 para un alimentador completamente horizontal, inclinado menor que 1 y declinado mayor que 1. El flujo másico \dot{m} se calcula con el área transversal de la cama de sólido dentro del sistema.

$$u_s = \eta_u F_m F_h F_j \lambda 2\pi f \cos \beta \quad (14) \text{ (MGingley, 2008)}$$

Imagen No. 5: Alimentador vibratorio

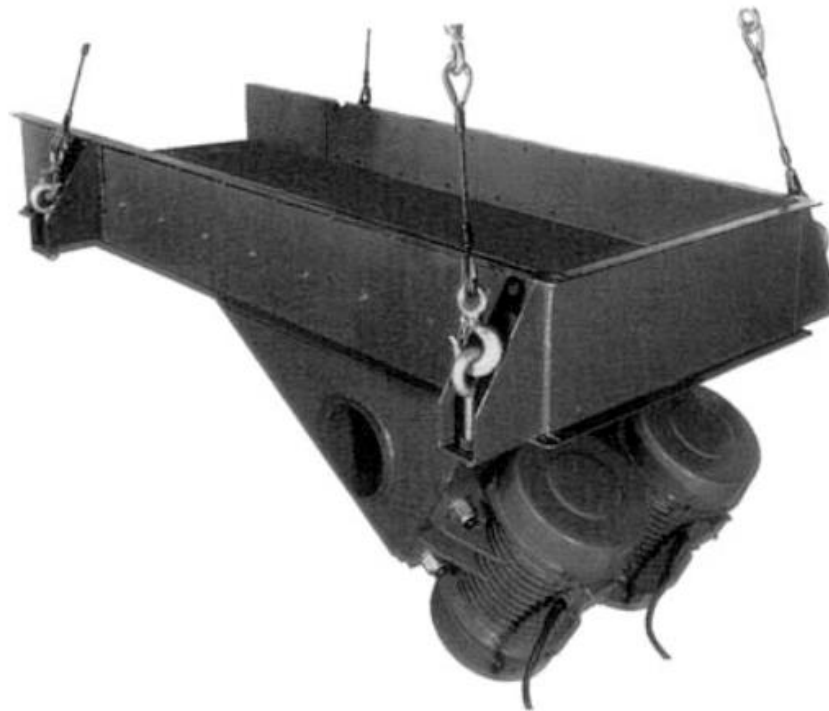


Fuente: (MGingley, 2008)

Los alimentadores vibratorios operados por aire ofrecen una operación libre de contaminación auditiva y de duración mayor que cualquier otro tipo de vibratorios. Estos son idealmente utilizados para el flujo controlado de materiales sólidos a operaciones secundarias de proceso como pesado, empackado y mezclado. Los canales son ofrecidos en una variedad de distintas formas como ve, tubular y plano. (MGingley, 2008)

Los alimentadores vibratorios gemelos están diseñados para transportar un producto creando una línea recta de movimiento. Dos motores que rotan inversamente proporcionan la acción lineal requerida. A medida que los motores rotan uno en contra del otro, las fuerzas de lado se cancelan y las fuerzas lineares se combinan. Con los motores ajustados apropiadamente y localizados en un canal rígido adecuado para las fuerzas que están siendo creadas, la acción de transporte es callada y positiva, no se requieren cintas. Los motores sincronizados proporcionan un diseño semi-balanceado, el cual elimina el rebote descontrolado al apagarlos. La Imagen No. 3 es un ejemplo de este tipo de alimentadores vibratorios. (Eriez Vibratory Feeders and Conveyors, 2012)

Imagen No. 6: Alimentadores vibratorios gemelos



Fuente: Eriez Vibratory Feeders and Conveyors, Models HVF, TM, HVC, SM, AND VMC. 2012

La capacidad de un alimentador vibratorio está dada por la ecuación (7), en donde Q es la capacidad, W es el ancho de la superficie, d es la profundidad del material, D es la densidad lb/ft^3 y v es la velocidad de flujo y K es una constante. (Eriez Vibratory Feeders and Conveyors, 2012)

$$Q = \frac{W \times d \times D \times v}{K} \quad (14)$$

Se obtiene un control preciso del flujo mediante el control estándar, i.e. la llave manual ajustable. Un control de voltaje variable y un control de frecuencia variable pueden ser incorporados al sistema para dar una mayor estabilidad. En la práctica, generalmente se utiliza resortes de hule para amplificar los resultados del canal con requerimientos bajos de caballos de fuera. El poder es proporcionado al sistema por un motor estándar. Un diseño más específico de alimentadores vibratorios incluye una variedad de tamaños y tipos de canales, los cuales deben ser de acero inoxidable, polietileno, hule, u otros materiales. (Eriez Vibratory Feeders and Conveyors, 2012)

3. Mecánica de fluidos. El número de Reynolds establece la región crítica en donde un flujo laminar cambia a flujo turbulento.

$$Re = \frac{D\bar{V}\rho}{\mu}$$

(15) (McCabe, 2007)

D = diametro de tubo
 \bar{V} = velocidad promedio
 ρ = densidad del líquido
 μ = viscosidad del líquido

Las tuberías se clasifican en función de su diámetro y espesor de pared. El espesor de la pared está expresado por el número de norma con valores de 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160. Al determinar el diámetro idóneo de tubería se debe considerar la relación entre costos, el costo de la tubería incremental con el diámetro de la tubería con una potencia de 1.5, el costo de operación por potencia varía en potencia de 4.8 con el diámetro de la tubería. Para el agua y fluidos similares se obtiene un flujo óptimo de 0.9 a 1.8 m/s y para aire o vapor es de 6 a 24 m/s. (McCabe, 2007)

$$\bar{V}_{opt} = \frac{12m^{0.1}}{(GE * 62.4)^{0.36}}$$

(16) (McCabe, 2007)

En donde m = velocidad másica del fluido (lb/s); \bar{V}_{opt} = velocidad óptima (ft/s) y GE = gravedad específica del fluido.

a. Pérdidas de fricción. La relación entre el esfuerzo cortante y la carga de velocidad por la densidad es el valor de Fanning. Para pérdidas de fricción por tubería:

$$\frac{\Delta p_s}{L} = \frac{2f\rho\bar{V}^2}{D}$$

(17) (McCabe, 2007)

$$\frac{\Delta p_s}{\rho} = h_f$$

(18) (McCabe, 2007)

En donde Δp_s es el cambio en la presión dentro de la tubería, L es la longitud del tubo, f es el factor de fricción de fanning, ρ es la densidad del líquido, \bar{V} es la velocidad promedio del flujo, D es el diámetro del tubo y h_f es la pérdida de fricción en la tubería.

En el caso de la pérdida de fricción por expansión, h_{fe} , se utiliza la velocidad promedio de la velocidad previo al ingreso al expansor, \bar{V}_a .

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

(19) (McCabe, 2007)

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

(20) (McCabe, 2007)

En donde K_e es el parámetro de rugosidad por expansión, S_a es el área del conducto previo al ingreso al expansor y S_b es el área del conducto después del ingreso al expansor.

Para la pérdida de fricción por compresión, h_{fc} , se utiliza la velocidad promedio de la velocidad luego de compresión, \bar{V}_b^2 .

$$h_{fc} = \frac{K_c \bar{V}_b^2}{2}$$

(21) (McCabe, 2007)

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

(22) (McCabe, 2007)

En donde K_c es el parámetro de rugosidad por compresión, S_a es el área del conducto previo a la expansión y S_b es el área del conducto luego de la compresión.

Las válvulas y accesorios tienen un coeficiente de pérdida por fricción específico, h_{ff} , como se muestra en la siguiente ecuación. Dicho coeficiente es dependiente del factor de fricción de la tubería, K_f .

$$h_{ff} = \frac{K_f \bar{V}_a^2}{2}$$

(McCabe, 2007)

Para agrupar todos los términos de pérdida de fricción se utiliza la siguiente expresión:

$$h_f = \left(\frac{4fL}{D} + K_c + K_e + K_f\right) \frac{\bar{V}_a^2}{2}$$

(23) (McCabe, 2007)

b. Bombas. Las bombas son utilizadas para incrementar la energía mecánica del líquido aumentando la velocidad, presión o elevación. En las bombas centrífugas el líquido ingresa a través de la conexión concéntrica al eje del impulsor. Por lo general las bombas están conectadas directamente a un motor de velocidad constante normalmente en 1750 o 3450 r/min. En una bomba real hay pérdidas de presión por fricciones y cambios de dirección con lo que no se tiene una eficiencia perfecta. El comportamiento de una bomba específica se ilustra por gráficas de cabeza real, consumo de potencia y eficiencia versus el flujo volumétrico. La eficiencia de la bomba es la relación entre la potencia del fluido y la potencia total consumida. (McCabe, 2007)

Para el cálculo del dimensionamiento de la bomba, se utiliza la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_b}{\rho} + \frac{gZ_b}{g_c} + \frac{a_b \bar{V}_b^2}{2} + h_f = \frac{P_a}{\rho} + \frac{gZ_a}{g_c} + \frac{a_a \bar{V}_a^2}{2} + \eta W_p$$

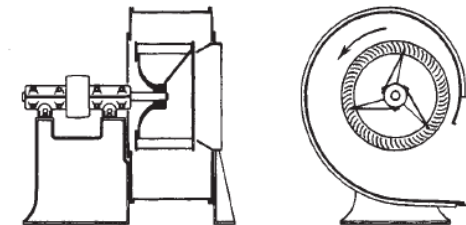
(24) (McCabe, 2007)

4. Soplador. Existen cuatro tipos de agitación mecánica, ultrasónica, de cavidad y mediante aire. El aire no solamente es el más fácil de usar, también ofrece una forma de agitación sin ninguna parte movible en el baño. Para el lavado, la agitación mediante aire permite deshacerse de partículas de suciedad y grasa disuelta y asegura el contacto continuo con la solución de limpieza. Un soplador tiene las ventajas de tener un costo efectivo, ser silencioso, contribuir a un proceso limpio y un montaje simple. (Gast, 2009)

Para diseñar un soplador, es muy importante poner atención a las tuberías y al rociador. Existen tres partes principales en la plomería: la tubería de abastecimiento (empieza en el soplador y termina en el fondo del tanque), la tubería de encabezado (tubería que está conectada a la tubería de abastecimiento) y la tubería de rocío (tubería burbujeante que se extiende a lo largo del tanque). (Gast, 2009)

Los sopladores son aparatos rotatorios de alta velocidad ad que desarrollan una presión máxima de cerca de 2 atm. En los sopladores la variación de la densidad es demasiado elevada para poderse asumir constante. Los sopladores de impulsor curvo pueden llegar a tener 50 hojas con una velocidad alta de 3600 rpm a 60 Hz. Cuando la presión del aire varía con la temperatura, la presión y la potencia de la unidad varían inversamente. (Perry, 2007)

Imagen No. 7: Representación de un soplador de impulsor curvo



La potencia necesaria para impulsar el soplador o ventilador es:

$$Potencia (kW) = 2.72 \times 10^{-5} \text{ flujo } \left(\frac{m^3}{h} \right) * Presión de descarga (in H_2O)$$

$$Flujo ideal = area de tanque * \Delta SG$$

(Perry, 2007)

III. ANTECEDENTES

La salmuera obtenida en el sistema utilizado actualmente para saturación, se utiliza como materia prima en un proceso electrolítico posterior. La salmuera se obtiene a una temperatura de 45°C y un flujo de 4,800 m³/h. El área utilizada para la saturación consiste en una fosa de 6 m de ancho, 6 m de largo y 7 m de profundidad en donde se realiza una saturación por lotes. En este sistema se descarga un lote completo de sal por día que consiste en 18,000 kg. Al sistema se recircula salmuera agotada proveniente del sistema de electrolisis con una concentración de cloruro de sodio de 195 g/L, una temperatura de 55°C y un pH 11. Al sistema se alimenta agua desionizada a temperatura ambiente. Ambas soluciones se encuentran almacenadas en tanques con una altura de 7 m, con lo que no se es necesaria actualmente la adición de estos líquidos por medio de bombas. La saturación de la solución se realiza por lotes, midiendo la concentración por medio de la densidad de la solución y correlacionándola a la escala de grados Baumé. En el momento que se determina que la solución se encuentra en el punto de saturación, se procede a realizar la descarga a un tanque con una altura de 7 m y una capacidad de 518m³ para la posterior distribución a los tanques de sedimentación con floculante. La sal utilizada actualmente es transportada desde una bodega de almacenaje por camiones de volteo con una capacidad de 20,000 kg. La sal es descargada por los camiones dentro de la fosa donde se realiza la saturación. Para todo este proceso no se utiliza la intervención del personal ni de un equipo. En el sistema actual solamente se cuenta con un soplador que realiza la agitación necesaria para la disolución batch y una serie de bombas de desplazamiento positivo que descargan el tanque cuando se llega al punto de saturación del NaCl. La sal utilizada tiene un tamaño de partícula medio de 0.227 cm equivalente a un tamiz Tyler No. 7.

La línea del proceso electrolítico se opera de manera continua y con equipos de automatización instalados para el control a distancia. El único proceso que requiere la intervención manual de operadores durante las 24 horas es el proceso de saturación, lo que agrega complejidad al sistema y la necesidad de contar con operadores dedicados a la operación de saturación durante todo el turno de producción. En los mantenimientos semestrales realizadas en el área se necesita retirar con martillos mecánicas la capa cristalina en la parte inferior del tanque, la cual está formada por residuos de compuestos insolubles que se van acumulando luego de cada despacho. El área de manufactura proyecta un crecimiento anual de producción del 3% debido al crecimiento de ventas. El diseño del proceso debe ser suficiente para satisfacer la demanda durante un período de 10 años.

Considerando la falta de sincronización que se tiene con el resto de la línea de manufactura de hipoclorito al contar con un proceso por lotes operado de manera manual y los costos incurridos por el período de seis días de mantenimiento, el mejoramiento del proceso de saturación se considera como punto clave en el análisis de pérdidas de la línea de manufactura.

IV. JUSTIFICACIÓN

Debido a la acumulación de sólidos insolubles en la fosa de saturación, se requiere realizar dos mantenimientos al año con un tiempo de mantenimiento de seis días cada uno. En el resto de la operación de manufactura se tienen programados mantenimientos con una duración de tres días al mes, lo que no es suficiente para la limpieza de la fosa de saturación. El realizar estas intervenciones tiene un costo elevado debido a que se debe aumentar el consumo energético en el período previo a la intervención para poder contar con inventario suficiente para satisfacer la demanda durante los días de mantenimiento, este costo se estima en Q240,000 anuales considerando ambos mantenimientos. El costo se genera por elevado consumo de electricidad al aumentar la carga del electrolizador y tener penalizaciones por el factor de potencia incurrido.

Se busca dejar claramente documentado las condiciones óptimas de operación y mantenimiento para el equipo ya que actualmente toma tres horas preparar un batch de salmuera saturada que cumpla con las condiciones de pH y temperaturas necesarias en el proceso.

Al realizar el diseño con un lazo de control en una operación continua, se logra obtener mayor autonomía del proceso reduciendo la intervención del personal. Con este diseño se logra evitar el tener una persona dedicada a la operación, cumpliendo con las metas de productividad de la empresa. Además al contar con una medición de la concentración y flujo de salmuera de manera continua, se logra controlar la operación de manufactura con mayor precisión desde un cuarto de control centralizado, logrando tener registros exactos de la calidad del producto intermedio que se agrega a la operación.

Con el diseño de este proceso, se propone una manera de evitar el costo relacionado actualmente con los mantenimientos de semestral, reflejándose directamente en ahorros para la compañía, además de poder tener mayor control en las variables de procesos sin la intervención del personal.

V. OBJETIVOS

A. Generales

Diseñar un sistema para realizar un proceso continuo de saturación de salmuera, a una temperatura de 45°C y una concentración de 99.43%, en agua a partir de sal granular con una pureza de 99.43 % NaCl para mantener un flujo de descarga estable de 4.8 m³/h.

B. Específicos

1. Realizar la caracterización física de la sal industrial utilizada en el proceso.
2. Determinar la cinética de disolución de la sal a las temperaturas de operación, 23°C, 45°C y 55°C.
3. Diseñar un sistema de saturación continua, que permite mantener flujo de salmuera para una operación estable, calculado en 4,800 m³/h.
4. Realizar el dimensionamiento de los equipos necesarios para el transporte de la sal hacia el sistema de saturación, desde el punto de descarga de camión hasta el sistema diseñado para la saturación.
5. Estudiar y definir la distribución de los equipos calculados dentro del área disponible para la operación, dimensionada en 6 x 6 metros.
6. Diseñar un lazo de control que permite controlar los equipos previstos para la operación continua del sistema.
7. Determinar la factibilidad económica por medio de valor presente neto y tasa interna de retorno de la inversión de capital necesaria.

VI. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proyecto de diseño se siguió la siguiente metodología:

- *Mediciones en laboratorio:* Se determinó las propiedades mecánicas de la sal industrial utilizada como materia prima. Se determinó el ángulo de reposo, ángulo de fricción contra superficie metálica, tamaño de partícula, humedad y densidad. Esto se realizó descargando sal sobre una superficie plana y determinando el ángulo que formaba con la horizontal. Estas características propias de la sal utilizada, fueron medidas para poder dimensionar correctamente las tolvas de descarga y los alimentadores vibratorios al sistema de disolución. Con el ángulo de fricción obtenido se determinó el ángulo necesario de la tolva para que pudiera operar en flujo másico. La humedad de la sal se midió con una balanza OHAUS en donde se determinaba el porcentaje de humedad de la muestra, además se comparó este valor al secar muestras de sal y determinar la diferencia de masa. Para poder realizar correctamente el balance de masa y calcular la concentración final de la solución en las pruebas de cinética. Debido a que el tamaño de partícula de la sal utilizada era mayor que el de los tamices disponibles, se midieron las dimensiones de los cristales para obtener el volumen y el diámetro equivalente. Con esto se generó una dispersión de tamaño de partícula para obtener el diámetro de partícula medio y poderlo utilizar en el cálculo de la apertura de la tolva.

- *Determinación de cinética:* Para poder dimensionar el tanque de disolución de manera continua, fue necesario determinar la cinética de disolución para una temperatura de operación de 45°C. A nivel laboratorio se realizaron curvas de calibración de conductividad versus concentración de sal industrial a una temperatura de 23°C, 45°C y 55°C. Para comparar la medición de conductividad de sal industrial con la obtenida por NaCl puro, se realizaron tres mediciones de conductividad de NaCl grado reactivo a diferentes concentraciones, mostradas en la Tabla No. 44 (pág. 81). Posterior a la realización de las curvas de calibración, se midió la evolución de la conductividad contra tiempo en el proceso de disolución a diferentes temperaturas. Para esto se utilizó un vaso de precipitados de vidrio de 2 L colocado sobre una estufa, la agitación se realizó por medio de un agitador magnético con las velocidades mostradas en la Tabla No. 23 (pág. 52). La sal fue agregada al sistema de manera manual, emulando un flujo continuo al descargar desde un contenedor plástico sin ningún control mecánica. Para emular las condiciones de operación, las corridas de calibración y las corridas de medición de velocidad fueron realizadas con una solución de pH 10.75. La medición de la conductividad se realizó en el centro del vaso de precipitados de vidrio, en el mismo punto en el cual se colocó un termómetro de bulbo para la medición de la temperatura. Se utilizó el sistema mostrado en la Imagen No. 21. Para determinar la velocidad del agitador utilizado se determinó por medio de un estroboscopio y un tacómetro en las diferentes intensidades en las cuales se podía graduar el agitador, en una escala de 0 a 10, con lo que se pudo escalar el régimen de agitación de la prueba de laboratorio.

- *Fabricación de tanque piloto:* Para determinar el proceso de disolución en el tanque dimensionado con la cinética obtenida en la prueba de laboratorio, se fabricó un tanque piloto de 0.015 m³, el tanque tenía una altura de 0.9 m y un diámetro de 0.7 m. Para determinar el punto óptimo de alimentación se instalaron dos puntos de alimentación con alimentación tangencial. Los puntos de alimentación se fabricaron al colocar tubería de PVC dentro del tanque y reduciendo el diámetro hasta 0.635 cm. Para determinar el punto de óptimo de succión se instalaron tres puntos de muestreo al colocar válvulas de globo a diferentes alturas del tanque. Se realizaron varias corridas de disolución para comparar las posibles combinaciones de alimentación – descarga del sistema. Además se realizó agitación tangencial por la misma entrada del fluido y por burbujeo con aire comprimido. Las corridas de prueba se realizaron al agregar agua con una bomba de 187 W, lo que generó un flujo tangencial dentro del tanque. La sal fue agregada de manera manual en la parte superior manteniendo un flujo estable en la descarga. Para determinar la combinación óptima, se midió la conductividad con un sensor HACH en cada muestra obtenida. Este sistema se muestra en la Imagen No. 22 y la Imagen No. 10 Con la alimentación tangencial de flujo al sistema se evaluó la opción de no utilizar un sistema de agitación para favorecer la disolución, lo cual fue rechazado por el poco movimiento que causó la alimentación dentro del tanque. Con la determinación del punto óptimo de alimentación se estableció el modo de operación del fluido en relación a la alimentación de la sal en la parte superior, comparando un flujo en contracorriente y corriente paralela.

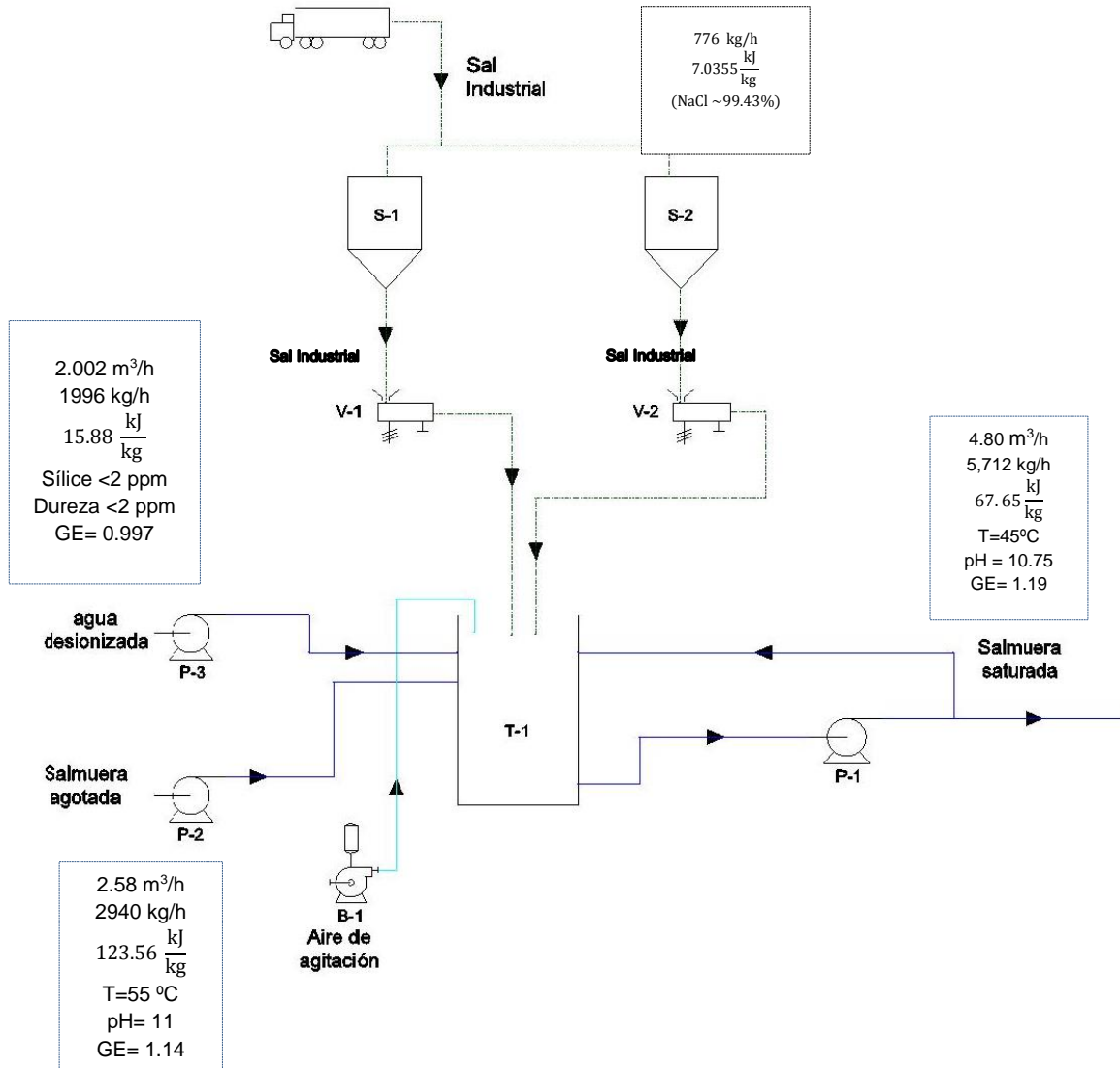
- *Diseño y especificación de equipo periférico:* Dentro del equipo periférico diseñado se toman en cuenta con tres bombas centrífugas, dos alimentadores vibratorios, dos tolvas de descarga y un soplador de aire. El tanque de disolución de sal fue dimensionado utilizando el valor de espacio tiempo obtenido en las mediciones a escala laboratorio. Tomando como base el flujo de 4.8 m³/h y la diferencia de concentración entre la entrada y el punto de saturación se logró determinar el volumen necesario para operar el sistema de manera continua. Las dimensiones del tanque fueron diseñadas manteniendo la misma proporción altura-diámetro presente en los beakers empleados como cristalería de laboratorio. Para la determinación de la altura de los puntos de alimentación y descarga del tanque se tomó la relación del tanque piloto fabricado. Para la descarga se consideró una altura de 0.30 m para evitar que los compuestos insolubles afecten los procesos posteriores de filtración. Con el dimensionamiento de tanque y las propiedades de la materia prima de alimentación se diseñaron los equipos necesarios para el proceso. Para el cálculo de las bombas de alimentación se realizó un balance de energía considerando el nivel del tanque de almacenamiento y la caída de presión por las tuberías y accesorios. Para el dimensionamiento de las tolvas, se utilizaron los valores medidos de las propiedades de ángulo de reposo y fricción de la sal utilizada para evitar tener flujo volumétrico y problemas flujo no homogéneo dentro del equipo.

- *Cálculo financiero:* Se determinó el costo estimado de las bombas y el soplador por medio de cotizaciones de equipos similares y luego ajustando el valor a la capacidad dimensionada del equipo utilizando el método de Lang. Con esto se determinó la inversión de capital necesaria para ejecutar este trabajo. Se realizó un análisis de valor presente neto para determinar la rentabilidad de realizar la inversión con los beneficios que genera el tener un proceso continuo de disolución de salmuera y reducir los períodos de mantenimiento.

VII. RESULTADOS

Imagen No. 8: Balance de masa y energía de sistema diseñado

Base: 4.8 m³/h de salmuera saturada producida.



Etiqueta	Equipo
P1	Bomba de salmuera saturada
P2	Bomba de salmuera agotada
P3	Bomba de agua desionizada
B1	Soplador
S1	Silo de descarga de sal #1
S2	Silo de descarga de sal #2
V1	Alimentador vibratorio # 1
V2	Alimentador vibratorio # 2
T1	Tanque de disolución

Tabla No. 10: Ecuación cinética en rango de concentración a temperaturas

Corrida	Temperatura [°C]	Rango [g/L]	Ecuación cinética
1	23	0 - 142	$-r_{NaCl a 23^{\circ}C} = (0.006772 \pm 0.000047) \frac{1}{s} * [NaCl]$
		142 -245	$-r_{NaCl a 23^{\circ}C} = \left(0.00613 \pm 0.00001 \frac{g^{-0.716455}}{L^{-0.716455} * s} \right) * [NaCl]^{0.39014 \pm 0.00244}$
2	55	0 - 221	$-r_{NaCl a 55^{\circ}C} = (0.013802 \pm 0.000061) \frac{1}{s} * [NaCl]$
		221-257	$-r_{NaCl a 55^{\circ}C} = \left(0.00613 \pm 0.00001 \frac{g^{-0.6099}}{L^{-0.6099} * s} \right) * [NaCl]^{0.28355 \pm 0.00082}$
3 y 4*	45	0 -191	$-r_{NaCl a 45^{\circ}C} = (0.011578 \pm 0.000090) \frac{1}{s} * [NaCl]$
		191-251	$-r_{NaCl a 45^{\circ}C} = \left(0.006176 \pm 0.000031 \frac{g^{-0.611256}}{L^{-0.611256} * s} \right) * [NaCl]^{0.388744 \pm 0.002165}$

* Las corridas 3 y 4 se hicieron a 45° debido a que era la temperatura en la cual se alimenta la salmuera al sistema.

Tabla No. 11: Listado de equipos diseñados para el proceso de saturación.

	Equipo
1	Tanque de disolución de salmuera
2	Tolvas de descarga
3	Alimentador vibratorio
4	Bomba de alimentación de salmuera agotada
5	Bomba de alimentación de agua desionizada
6	Bomba de descarga de salmuera saturada
7	Soplador para agitación de sistema

Imagen No. 9: Esquema de tanque construido para prueba piloto

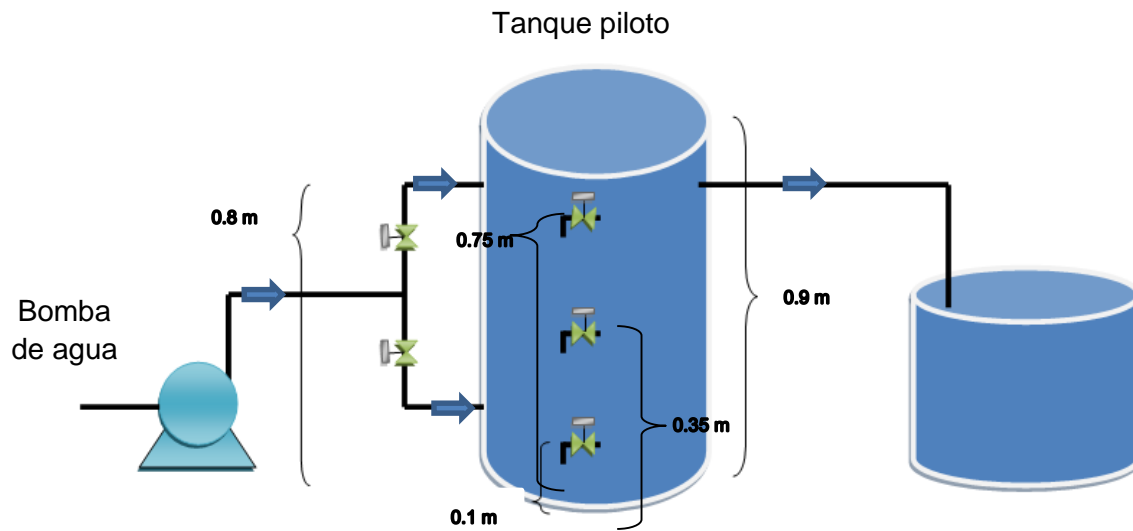


Imagen No. 10: Distribución interna de tanque piloto

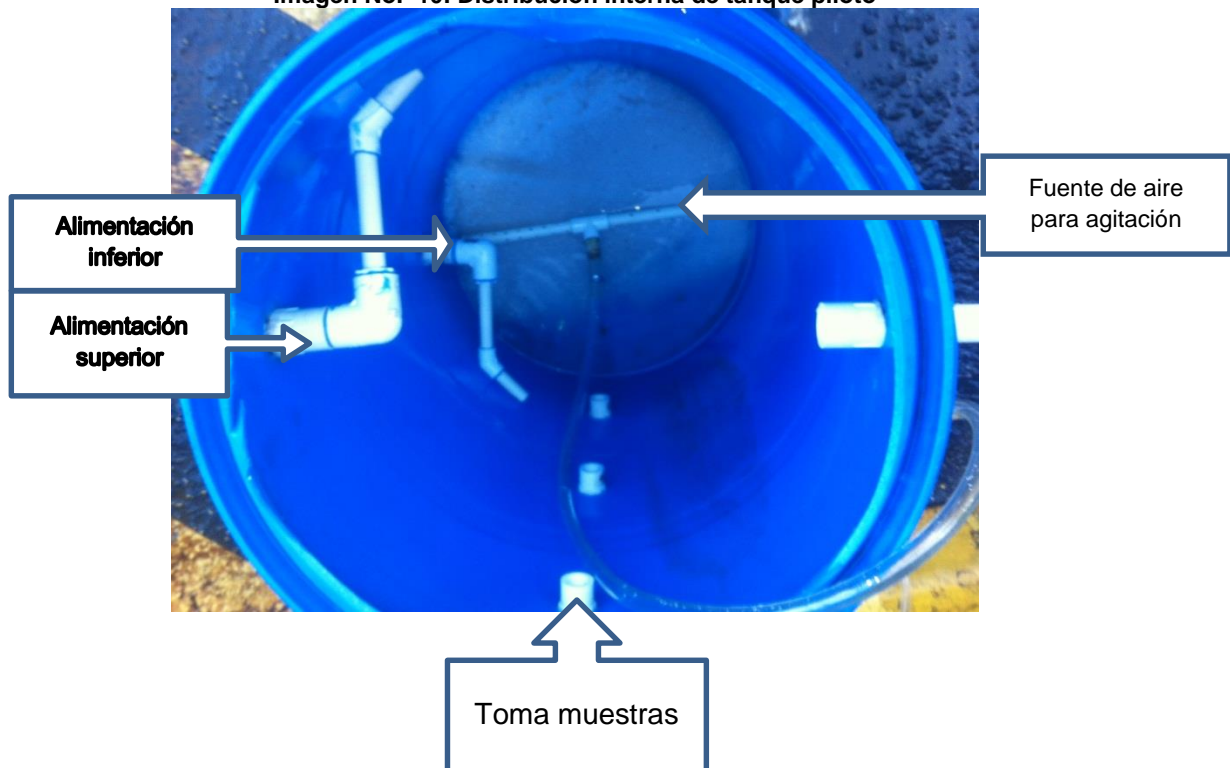


Imagen No. 11: Vista de sistema completo propuesto de disolución de sal.

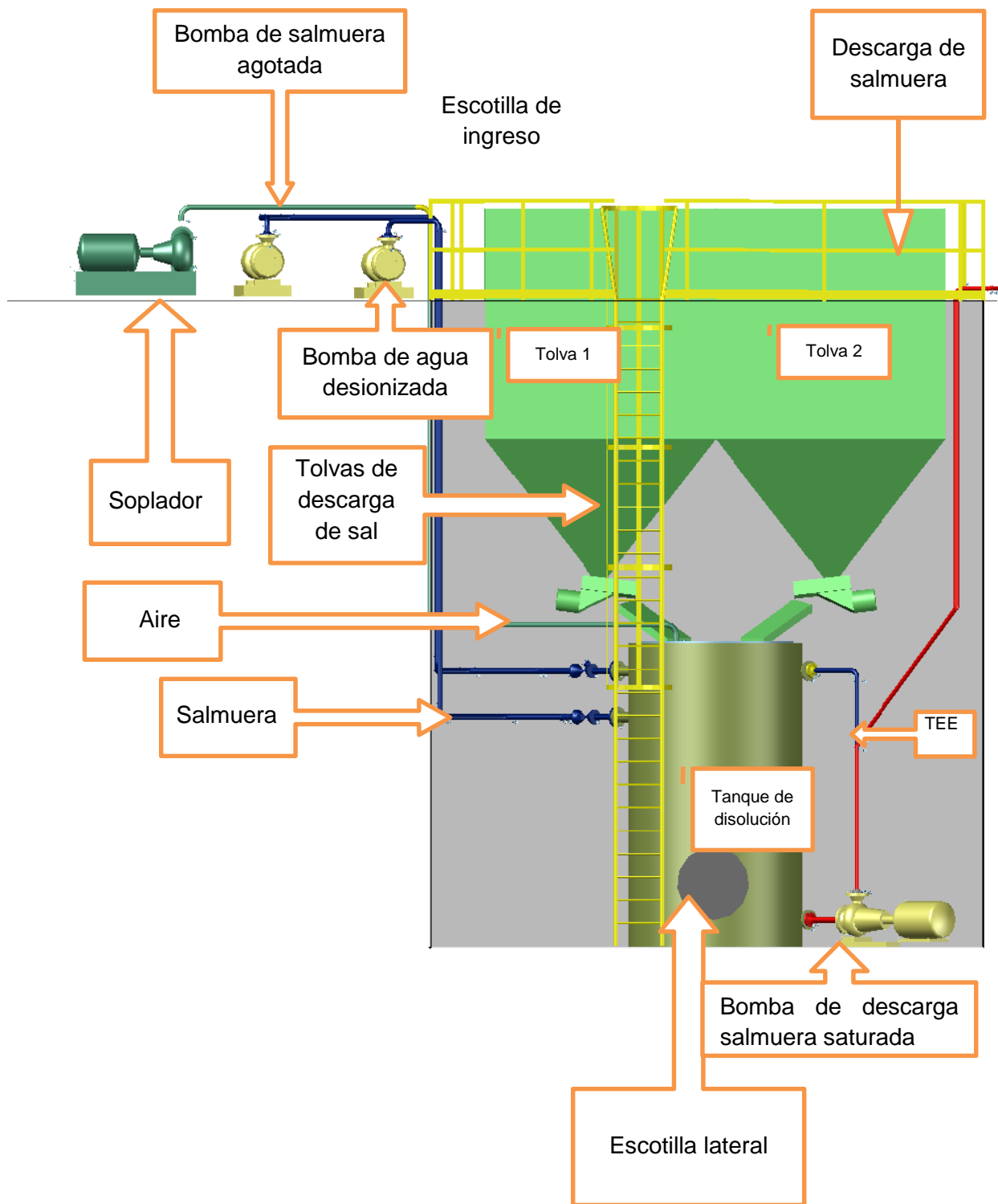


Imagen No. 12: Vista de elevación de tanque de disolución.

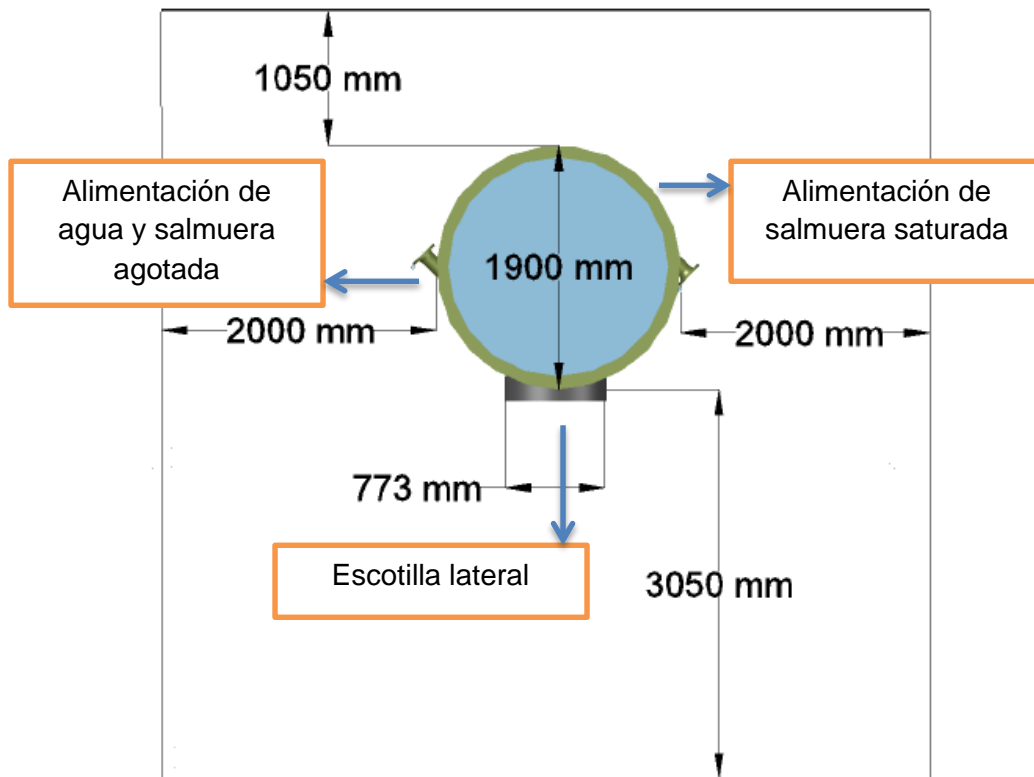


Imagen No. 13: Vista lateral de tanque de disolución:

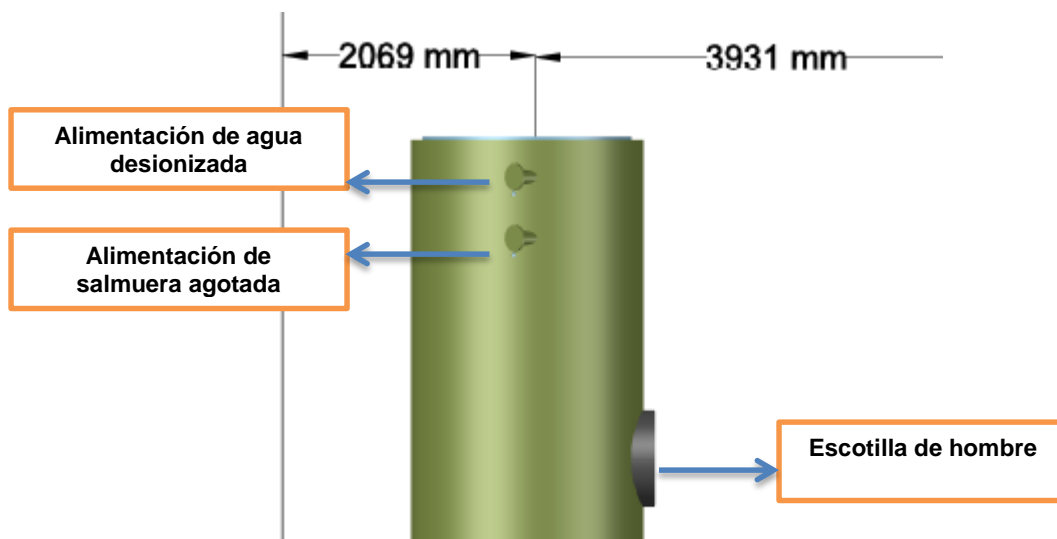


Imagen No. 14: Dimensiones de tanque de disolución

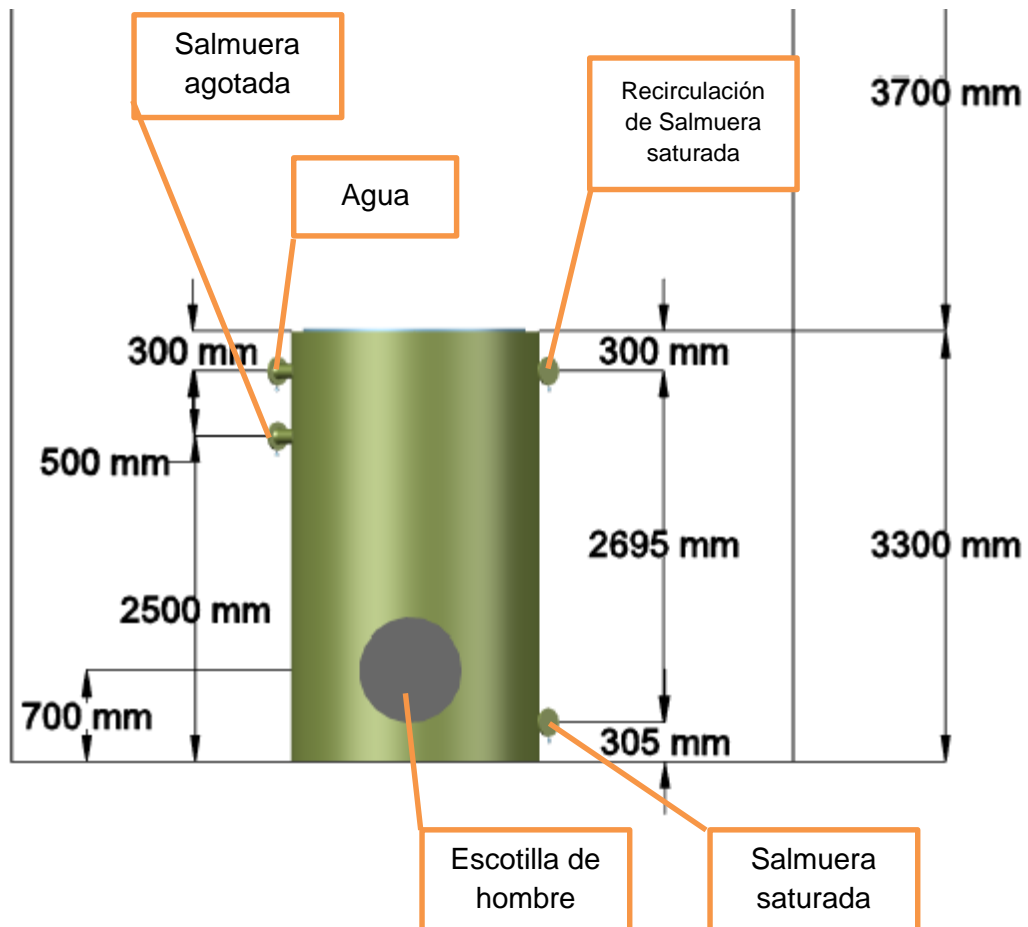


Tabla No. 12: Dimensiones de tanque de saturación de salmuera

Volumen total	$6.03 \pm 0.392 \text{ m}^3$
Altura	$3.3 \pm 0.2 \text{ m}$
Diámetro	$1.9 \pm 0.1 \text{ m}$
Alimentación de sal	Volumétrico, parte superior
Alimentación de agua desionizada	3 m
Alimentación de salmuera agotada	2.5 m
Descarga de salmuera	0.3 m
Escotilla lateral	Diámetro - 0.61 m Altura- 0.70 m

Imagen No. 15: Vista de planta de distribución de tolvas de recepción de sal.

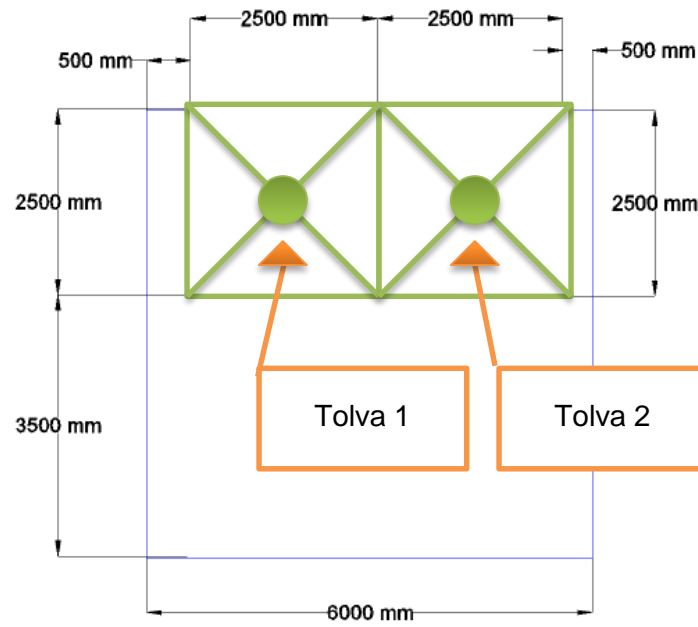


Imagen No. 16: Vista lateral de tolvas de recepción.

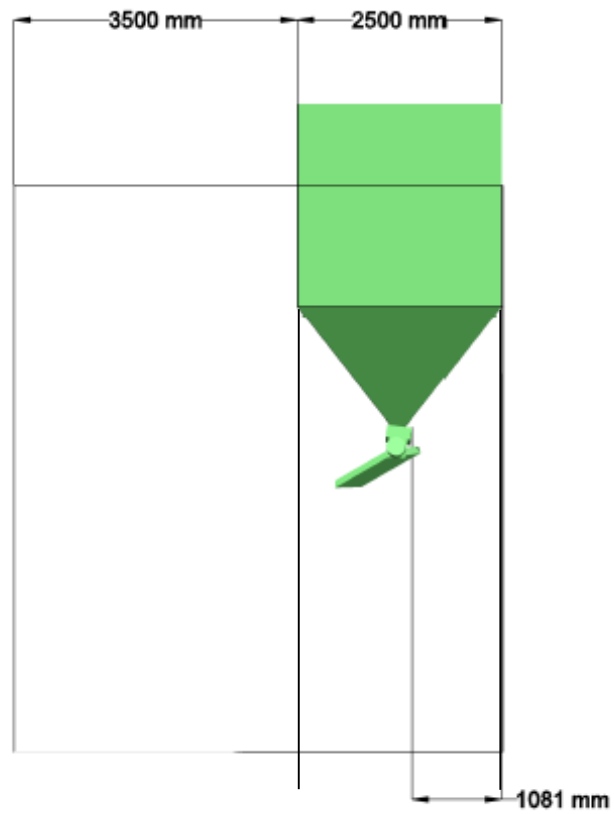


Imagen No. 17: Dimensiones de tolvas de almacenamiento de sal

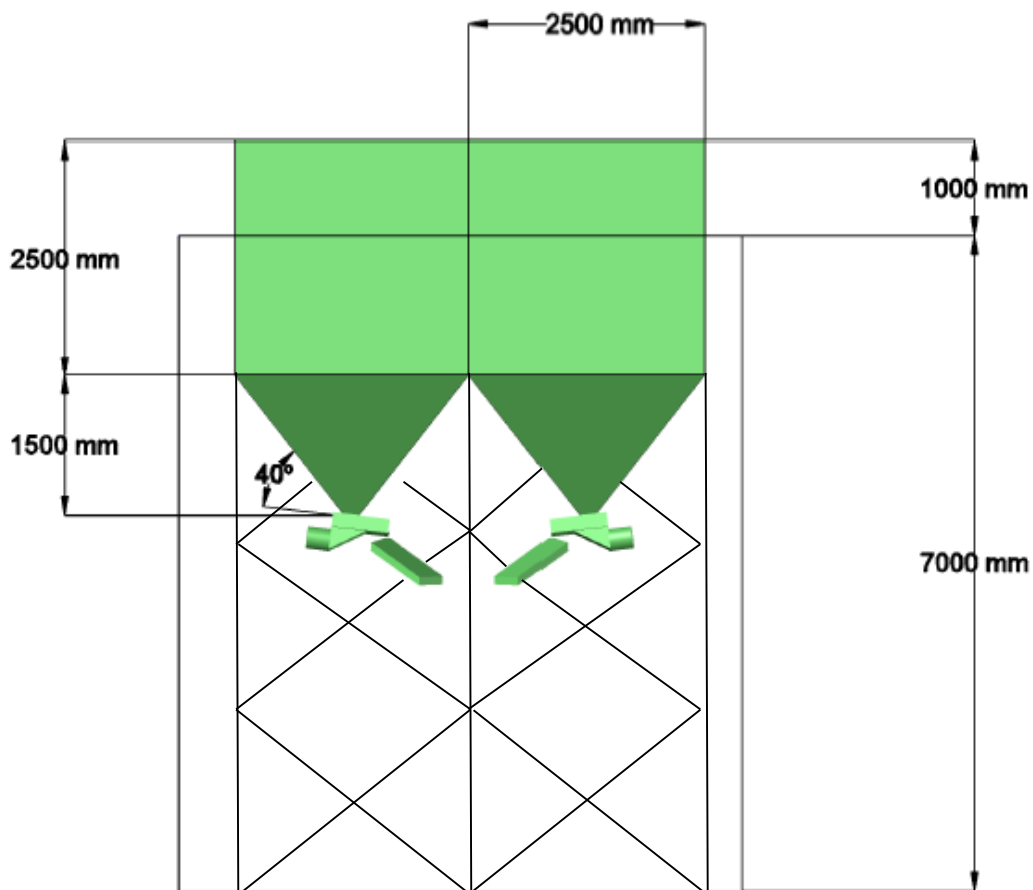


Tabla No. 13: Dimensiones de la tolva de almacenaje de la sal.

Cuerpo	Largo	2.5 m
	ancho	2.5 m
	Alto	2.5 m
	Volumen	15 m ³
Tolva	Largo	2.5 m
	Ancho	2.5 m
	Alto	1.49 m
	Largo de descarga	0.15 m
	Ancho de descarga	0.15 m
	Volumen de tolva	3.10 m ³
Sistema completo	Volumen total de silo	18.10 m ³
	Volumen efectivo	12.5 m ³
	Capacidad efectiva	18,517 kg

Imagen No. 18: Dimensiones de alimentador vibratorio

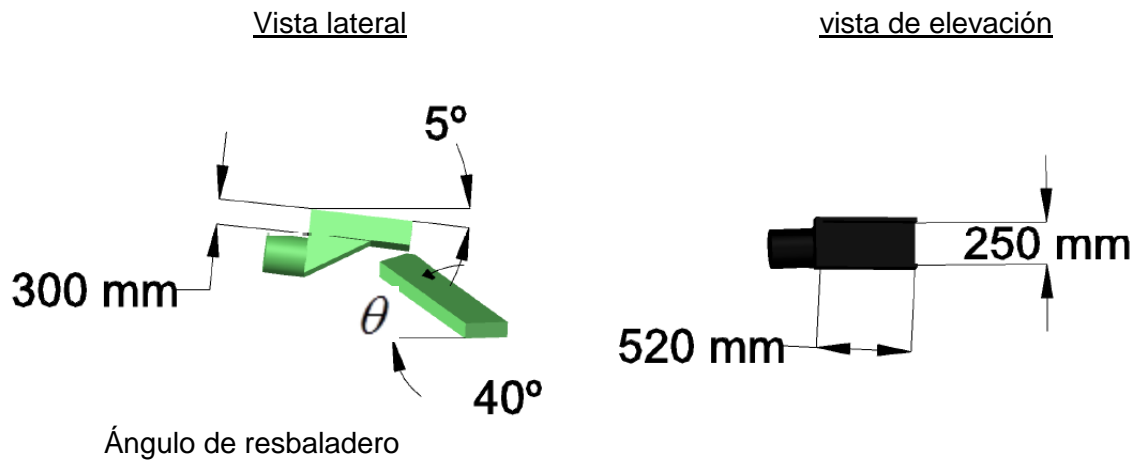


Tabla No. 14: Dimensionamiento del alimentador vibratorio

Angulo de inclinación	-5°
Largo de alimentador	0.52 m
Ancho de alimentador	0.25 m
Separación vertical con la tolva	0.15 m
Altura de barandal	0.30 m
Potencia	60 W
Frecuencia	60 Hz

Tabla No. 15: Bomba de descarga de salmuera.

Diámetro de entrada	0.051 m
Diámetro de salida	0.038 m
Cabeza necesaria	25 m
Potencia necesaria	396 W

Tabla No. 16: Bomba de alimentación de salmuera agotada.

Diámetro de entrada	0.051 m
Diámetro de salida	0.038 m
Cabeza necesaria	0 m
Potencia necesaria	0 W

Tabla No. 17: Bomba de alimentación de agua desionizada.

Diámetro de entrada	0.031 m
Diámetro de salida	0.031 m
Cabeza necesaria	0 m
Potencia necesaria	0 W

Tabla No. 18: Dimensionamiento de soplador para agitación de sistema.

Potencia	$3.1458 \pm 0.2569 \text{ kW}$
Flujo de aire	$0.2449 \pm 0.02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Tuberías de distribución	5
Diámetro interno	2.54 cm

Imagen No. 19: Distribución de tuberías dentro de tanque de agitación.

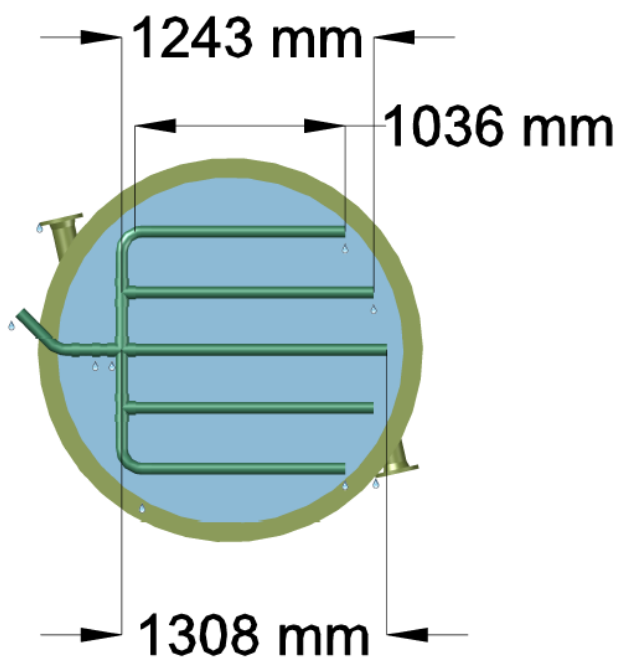


Tabla No. 19: Especificaciones de boquilla Jet para agitación

Diámetro	1.27 cm
Número de Reynolds en salida	58,532
Velocidad lineal de descarga	$5.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Tiempo de mezclado	0.81 horas

Tabla No. 20: Cálculo de valor presente neto y tasa interna de retorno para proyecto.

	NPV	1	2	3	4	5
Ahorros	62	15	15	15	15	15
Ahorro total	62	15	15	15	15	15
Costo Operacional	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Depreciación	46	2	2	2	2	58
Efecto en Costo total	107	17	17	17	17	73
Escudo fiscal	75	12	12	12	12	51
Inversión de capital	(67)					
Flujo de caja	8	(55)	12	12	12	51
ubicación de flujo			1	2	3	4
Factor de descuento		100%	90%	81%	73%	66%

NPV (\$M)	\$7.8	
TIR	16%	
Multiplicador de capital	0.12	
Tiempo de paga	4	

Depreciación	30
ISR	30%
Tasa mínima	11%
Tasa de cambio (GTQ /USD)	7.98
Inversión (\$M)	67
Ahorro (\$M)	15

VIII. DISCUSIÓN

El objetivo de esta investigación fue realizar el diseño de un sistema continuo de saturación de salmuera a partir de sal granular con una pureza de 99.43% NaCl. El sistema se dimensionó para soportar un suministro de flujo continuo de 4.8 m³ por hora de salmuera saturada durante 27 días al mes, 24 horas al día. Se optó por utilizar un sistema continuo y poder sustituir el sistema por lotes actual ya que se cuenta con necesidad de un alto flujo de alimentación, 4792 L / h y producto homogéneo. Al poder determinar experimentalmente la cinética de la disolución e instalar un lazo de control, los sistemas continuos se pueden controlar de mejor manera y obtener mayor producción en un mismo reactor que si se operara de manera continua. Con un sistema continuo de control se lograría mantener un flujo constante al sistema y se puede controlar las características de salida.

El primer paso realizado fue la caracterización de las propiedades de la sal industrial utilizada como materia prima. Los resultados se pueden observar en la Tabla No. 36 (página 78). Dentro de los resultados obtenidos, se presentó el diámetro medio de partícula con un valor de 0.227 cm con variación significativa del 37% con lo que se logra tener una distribución normal cercana a ese valor. El diámetro de partícula fue utilizado en la especificación del alimentador vibratorio. Se puede observar en la Gráfica No. 7 (página 106), que el tamaño de partícula sigue una tendencia de distribución de Gauss lo cual facilita el diseño. La medición del tamaño de partícula fue realizada con un vernier al no contarse con platos Tyler con una apertura de malla mayor a 0.227 cm y no poder hacer la determinación en una tamizadora. En las muestras caracterizadas, no se observaron terrones de sal, debido a que el material se encontraba almacenado en sacos y se había manejado por medios mecánicos para su despacho. Con un porcentaje de humedad de $18.38 \pm 0.45\%$, es posible que al momento de manejar el material a granel se presente formación de terrones y pueda afectar la operación, para evitar esto se debe analizar la granulometría del material al momento de la recepción para asegurar que cumpla con el valor necesario. El ángulo de reposo es necesario para determinar el perfil de flujo dentro de la tolva de descarga. Para esto se tomaron mediciones de la sal en condiciones normales de operación y la sal con baja humedad para comparar la diferencia. Entre ambas mediciones se obtuvo una variación de dos grados de diferencia neta, una incertidumbre del 12% con respecto al ángulo de reposo, con lo que se asumió una medida estable para el dimensionamiento de los equipos.

Para poder dimensionar el equipo continuo de disolución de salmuera, se determinó la cinética de disolución de la sal a diferentes temperaturas. Considerando que la conductividad de una solución de electrolitos se relaciona de manera directa con la concentración, se utilizó este método para medir la cinética. Las curvas de calibración de la sal se realizaron relacionando la conductividad medida con la raíz cuadrada de la concentración como se detalló en marco teórico. La pureza de la sal se identificó por medio del certificado de análisis suministrado por el proveedor observado en la Tabla No. 74 (página 119). La humedad total de la sal utilizada se determinó en triplicado, cuyo

promedio se muestra en la Tabla No. 36 (página 78), la cual varía con la especificada en el certificado de análisis del proveedor, resumido en la Tabla No. 74 (pág. 119) en donde la humedad es de 2%. La variación de la humedad debido a que el proveedor solamente establece la humedad ligada del material ya que la humedad superficial depende de las condiciones de operación al momento de descarga de la sal, temperatura y humedad relativa. Debido a que la conductividad de una solución varía considerablemente con la temperatura, se realizaron tres curvas de calibración a las temperaturas de operación. No se utilizó el factor de corrección teórico ya que solamente se tiene para soluciones de cloruro de sodio grado reactivo, el resto de componentes de la sal afectan a la conductividad. Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9941, 0.9931, y 0.9924 para las corridas a 45°C, 55°C y 23°C respectivamente. En la Gráfica No. 8 (página 107) se observa la dependencia de la conductividad con la temperatura. Las pendientes de las tres regresiones no presentan la misma regresión lineal, por lo que se utilizó el dato de las regresiones en lugar de la corrección de temperatura que se establece en la teoría de un 2% / °C.

Se realizó una comparación de conductividad de cloruro de sodio grado reactivo a 23°C con la sal industrial utilizada. Debido a la correlación presentada en el marco teórico entre la conductividad y la raíz de la concentración, se utilizó como un método para determinar la variación de la concentración al avanzar la disolución y así realizar las gráficas necesarias para el cálculo de la cinética. Al comparar la conductividad medida para las muestras, con la conductividad que se obtendría utilizando la regresión lineal a 23 °C presentada en Tabla No. 43 (página 81), se obtuvo un porcentaje de error de 8.68 ± 0.04 % entre las mediciones de sal industrial y el NaCl grado reactivo. Con este resultado se encuentra una correlación entre la conductividad medida de sal industrial y cloruro de sodio grado reactivo, útil para el control en flujo continuo de la concentración. La diferencia entre ambas mediciones se presenta por la influencia en la conductividad de los otros electrolitos presentes en la sal industrial ya que presenta una pureza de NaCl de 99.43% comparado con una pureza de 99.95% del cloruro de sodio grado reactivo. Debido a que la sal es un material altamente higroscópico, la humedad presente en cada muestra preparada pudo variar. Para el cálculo de la concentración de las soluciones se utilizó una humedad promedio que se determinó para toda la muestra de sal que se utilizó para la experimentación, presentado en la Tabla No. 36 (página 78). Aún con este efecto, no se siguió el comportamiento teórico de la conductividad para todas las calibraciones, detallado en la sección de marco teórico de este trabajo.

Las velocidades del agitador magnético se presentan en la Tabla No. 37 (página 78). Se utilizó para la intensidad nivel 8, con respecto a la escala, en base a la graduación mencionada, con una velocidad promedio de 551 ± 1 rpm para el proceso de disolución. Con este valor se determinó un régimen de agitación al calcular el número de Reynolds para agitadores de paleta de placas planas utilizando las medidas del agitador magnético, medidas por un vernier. Teniendo el alto, largo y ancho del agitador se realizó el cálculo, tomando en cuenta la semejanza con un agitador de paleta. Con este cálculo se obtuvo un número de Reynolds de 10,656 con lo que la cinética se determinó en flujo turbulento.

El resultado de número de Reynolds del sistema se pudo ver afectado por la resistencia que generó la sal dentro del vaso de precipitados de vidrio para el libre giro del agitador magnético.

La cinética de disolución fue determinada al agregar de manera continua sal industrial a una solución en diferentes temperaturas en las cuales se hizo las curvas de calibración, 23 °C, 45°C y 55°C. El aumento de la concentración de la solución al relacionar la conductividad con las curvas de calibración realizadas previamente se presenta desde la Gráfica No. 10 (página 109) a la Gráfica No. 12 (página 111). En estas gráficas se observan pequeñas variaciones de la concentración debido a irregularidades en el flujo de alimentación de sal al sistema, ya que la sal fue agregada de manera manual con lo que se introduce error al no contar con un sistema controlado. Esto puede ser observado como picos repentinos en la concentración de la solución, los cuales coinciden con el momento que se agregó sal al sistema. En la Gráfica No. 10 (página 109) la corrida 5, a 45°C, presenta variación con las dos corridas anteriores, debido a se observó que la celda de conductividad se encontraba cercana a los cables de alimentación del agitador por una mala colocación inicial y se generó interferencia en el sistema, manteniendo una lectura de conductividad constante aún al seguir agregando sal, el efecto se corrigió al reubicar los cables de alimentación. Debido a esta razón se omitió esta corrida del cálculo de la cinética de disolución. La medición de la temperatura se realizó en el mismo punto en el que se midió la conductividad para asegurar que la medición de conductividad se mantuvo a temperatura constante, evitando fuentes externas de error. Esta variación pudo ser compensada ya que se operó en régimen turbulento de agitación, con lo que se tiene un perfil de temperatura más homogéneo en el sistema.

La cinética de reacción es gobernada por dos criterios, el orden de la reacción y la constante cinética. La primera muestra la influencia que presenta la concentración de la solución y la segunda el efecto de la energía de activación y la temperatura con la velocidad. La cinética de disolución mostró variación de orden de reacción, de 1 a 0.6112, además de variación de constante cinética de 0.00613 a 0.0116. Esto posiblemente debido a que al alcanzar concentraciones elevadas, el gradiente de concentración no es de magnitud suficiente para mantener la misma fuerza motriz de la disolución. A todas las temperaturas las reacciones mostraron una variación de tener una cinética de reacción de primer orden a un orden menor a uno, con menor dependencia de la concentración. La cinética se determinó por medio del método integral para el rango de concentración de 0 a 191 g/L con orden uno y por medio del método diferencial para el rango de concentración de 192 g/L a 251 g/L, esto debido a que en el segundo rango de concentración no se presenta una reacción de primer o segundo orden, por lo que solamente se puede utilizar el método diferencia. Las ecuaciones cinéticas para las diferentes temperaturas se presentan en la Tabla No. 10 (página 29) y en la tabla Tabla No. 67 (página 100) desde la Gráfica No. 13 (página 112) hasta la Gráfica No. 18 (página 117) se presentan las regresiones lineales utilizadas para la determinación de la cinética para cada temperatura con coeficientes de correlación mayores a 0.99 para cada una de ecuaciones. En la Tabla No. 68 (página 100) se presentan las energías de activación para cada rango de

concentración. El proceso de disolución presentó comportamiento de una reacción elemental, al presentar la misma ecuación cinética que establece la reacción química, solamente en rangos de concentración bajos al presentar un orden uno. Se observa cómo cambia el orden de la reacción lo que sugiere un cambio de mecanismo de disolución y no comportarse como una reacción elemental. Esto pudo verse afectado ya que las partes internas del cristal son más dependientes de la solvatación que genera el agua para extraer los iones durante el proceso de solvatación y disolución, en comparación con la parte superficial del cristal que depende de mayor manera de la fuerza motriz y el gradiente de concentración de la solución la cual es baja al operar en altas concentraciones.

Para concentraciones elevadas se obtuvo una energía de activación de 9.53 ± 0.82 J/mol, lo cual demuestra la poca influencia de la temperatura con la cinética de la reacción al tener una energía de activación pequeña, como se especifica en marco teórico la relación de temperatura y energía de activación, caso contrario a concentraciones bajas que se tiene una energía de activación de 683.90 ± 7.13 J/mol, lo que genera una alta variación de la constante cinética a diferentes temperaturas la cual varía desde 0.006772 ± 0.000047 a 23 °C hasta 0.013802 ± 0.000061 a 55°C, con un aumento del 49% al aumentar 22 °C.

Los reactores de flujo continuo operan con las condiciones del flujo de descarga, por lo que se dimensionó el reactor con la ecuación cinética de 191 – 251 g/L a 45°C ya que en este rango de concentración y temperatura se encuentra la descarga de salmuera. Se determinó un tanque con volumen de 6.033 ± 0.392 m³, manteniendo la misma relación altura-diámetro que el equipo a escala. El proceso de disolución de la sal es un proceso endotérmico, como se muestra en el balance de energía del sistema y la cinética de disolución no aumenta al elevar la temperatura, por lo que no se utiliza un equipo de intercambio de calor para la operación normal. Aun así se coloca un equipo de intercambio de calor por si hay alguna variación en la temperatura de ingreso de la salmuera agotada, se pueda activar y mantener las mismas temperaturas de operación a cada momento.

Para medir el punto de alimentación en el tanque piloto, se midió la conductividad de las soluciones en los tres puntos de muestra mostrado en la Tabla No. 32 (página 59). La solución en el tanque piloto presentó una gran variación de conductividad al operar únicamente con agitación por alimentación tangencial de flujo a una velocidad de 3 m/s, siendo la mejor combinación de alimentación y descarga en la parte inferior. Al momento de realizar la agitación por flujo de aire, se obtuvo homogeneidad en todo el tanque, teniendo la mejor combinación de alimentación superior y descarga inferior. Al utilizar este sistema se cuenta con el beneficio de la carga hidrostática del fluido para la bomba de descarga y no se tiene resistencia del mismo para las bombas de alimentación.

La alimentación del tanque se colocó a una altura de 3 m, dejando un espacio de seguridad de 0.3 m. La succión se colocó a una altura de 0.30 m para evitar tener arrastres de sólidos insolubles y que afecte el desempeño del proceso de filtrado

posterior. El tanque completo tiene un volumen de 6.03 m³. Tanto para el dimensionamiento del flujo de descarga como la alimentación se mantuvo la relación de altura presente en el tanque piloto construido y con el cual se determinó el punto óptimo de alimentación y descarga.

Debido a la alta corrosión que presenta la sal sobre los materiales de construcción de agitadores mecánicos, no es práctico utilizar un agitador mecánico en el sistema real. Se dimensionó un sistema de agitación por chorro "jet" proporcionado por el flujo de salmuera agotada y agua desionizada en el tanque. Para poder reemplazar la cinética de reacción obtenida en el experimento a escala laboratorio, se debió dimensionar un sistema capaz de superar un número de Reynolds de 10,000. Con la agitación por chorro "jet" de ambos flujos de alimentación se lograría proporcionar un número de Reynolds de 58,000 además de tener un espacio tiempo de residencia de 0.81 horas comparado con 1.31 horas calculadas por la cinética. Con la alta turbulencia que se genera, se asegura una mezcla homogénea dentro del tanque diseñado. La alta turbulencia que se presenta en el tanque de disolución En el tanque de disolución fabricado como prueba piloto, no fue posible determinar la eficiencia de mezclado ya que no se contaba con una boquilla de chorro "jet", por lo que fue necesario dimensionar un sistema de agitación con aire. Como se observó en la prueba de tanque piloto, al tener agitación únicamente con el flujo, no se logra un perfil uniforme por lo que se dimensionó un sistema de agitación por burbujeo distribuido en cinco tuberías de alimentación de aire por un soplador de $3.1458 \pm 0.2569 \text{ kW}$ (~4 ½ hp) de potencia. La colocación de la tubería tendría que realizarse a una altura de 0.30 m de alto debajo del punto de descarga para evitar que los agujeros se obstruyan con los sólidos sedimentados.

Para la determinación del diámetro de tubería adecuada, se calculó la velocidad de flujo presentado en la Tabla No. 69 (página 100). La velocidad lineal calculada para todos los flujos fue menor a 1 m/s, el cual es el valor recomendado. Considerando que hay un aumento constante de volumen producción estable del área de manufactura del 3%, luego de un período de 10 años de operación, se estaría bombeando con una velocidad lineal de 1.14 m/s, debido al aumento de la producción, aun así la velocidad se encuentra en un valor aceptable. Debido a que el diámetro de las bombas utilizadas es diferente al diámetro calculado, se incluyó reductores para adaptar los diámetros y así poder tener menores costos operativos por bombas de mayor potencia.

Para el dimensionamiento de las bombas de alimentación se consideró las características del flujo. Para el flujo de alimentación de salmuera agotada, debido a que se bombea una solución a pH 11, temperatura de 55°C y flujo altamente corrosivo, se especificó una bomba de sello magnético además de utilizar tubería de CPVC, cédula 80 que logra soportar las temperaturas del flujo y el pH de la solución a diferencia del PVC. Para la alimentación de agua desionizada no hay necesidad de características especiales de bomba y se podría operar con tubería PVC cédula 40 considerando que se opera a un pH neutro y temperatura ambiente, a diferencia de los demás flujos. Las bombas son fueron diseñadas para asegurar que se mantenga un caudal constante de alimentación al tanque para asegurar que la velocidad especificada en la boquilla jet es de 5.66 m/s para

ambos flujos de agua des ionizada y salmuera agotada. Se identificó en el mercado una bomba IWAKI MX (F) 250 de 370 W para la alimentación de salmuera agotada y una bomba STA RITE de 186 W para el flujo de alimentación de agua des ionizada, ya que se utilizan estas mismas marcas de bombas en la planta. La potencia nominal de una bomba de sello magnético es mayor ya que estas presentan una baja eficiencia del 35%. Las bombas de sello magnético son utilizadas cuando se necesita transportar fluidos corrosivos que puedan afectar el engranaje y la polea del impulsor. Este tipo de bomba puede ser sustituido por una bomba de desplazamiento positivo tipo diafragma para el manejo de fluidos corrosivos. El balance de energía de la bomba de descarga de salmuera especificó una bomba de 396 W ($\sim \frac{1}{2}$ hp), necesaria para superar una cabeza de presión de 25 m. Al igual que en el sistema de alimentación de salmuera agotada, se necesita una bomba de sello magnético con tubería CPVC cédula 80 considerando las condiciones características del fluido.

Para el dimensionamiento de la tolva de recepción y descarga de sal, se utilizó un ángulo de operación de 40° , mayor que el ángulo de fricción medido experimentalmente en triplicado de 31° a una temperatura de 25°C y una humedad relativa de 79%. La teoría sugiere agregar 5° al ángulo de reposo para dimensionar el ángulo de tolvas. Se logra distribuir el equipo al trabajar con un ángulo de 40° , con lo que se aseguraría un flujo másico dentro de la tolva. Al tener operación en flujo másico se evitaría que queden residuos de sal en los extremos del silo, con lo que por tratarse de un material higroscópico puede ser complicado de remover durante los mantenimientos. Cada lote de ingreso de sal consta en 18,000 kg, al tener dos tolvas en paralelo se aseguraría el inventario para un día de producción mientras se descarga en la siguiente tolva. Además por la complejidad de la operación de mantenimiento, el tener tolvas en paralelo permite realizar intervenciones al equipo sin afectar la operación de alimentación. Con la distribución de equipo, se realiza limpieza a la tolva cada mes durante la intervención de mantenimiento. El alimentador vibratorio fue dimensionado para graduar el flujo de sal únicamente cuando fuese necesario. Las condiciones de operación y ambientales que afecten en un ángulo de reposo menor a 27° puede afectar el alimentador vibratorio ya que el largo se encuentra dimensionado con un ángulo de reposo específico de 27° y puede contener material con un ángulo de reposo de 24° . En caso de que el ángulo disminuya más que este valor, no se podría regular el flujo de sal de la tolva hacia el tanque de disolución. Para asegurar que se tenga un balance de masa constante se mide la humedad de cada lote que se descarga en las tolvas. Este mismo valor es ingresado en el lazo de control para poder calcular cuanta sal se debe ir alimentando al tanque de disolución. Esta medición serviría como doble control, ya que en la descarga se cuenta con un sensor de conductividad que acciona la recirculación dentro del tanque hasta llegar al punto de saturación. La tolva de descarga se construya de una manera piramidal para que coincida con los silos, ya que de utilizarse una forma circular en los silos se puede complicar la descarga de la sal. Para asegurar flujo homogéneo en la descarga de la tolva, se instala un vibrador en el silo y tolva para facilitar la descarga.

La distribución del tanque de disolución principal y las bombas se realizó de tal manera que pudiera facilitar el mantenimiento y continuar con muchos aspectos de la operación actual. Las tuberías de alimentación del flujo de salmuera agotada y agua desionizada se distribuyó de tal manera que coincide con las ubicaciones de la tubería actual, con lo que solamente es necesario colocar la bomba de control y la tubería desde la bomba hasta la alimentación lateral del tanque. Las bombas no se colocaron dentro de la fosa con lo que es más fácil el mantenimiento de las mismas, evitando que los operadores tengan que bajar por las escaleras para realizar la intervención. Las tolvas de almacenamiento de sal fueron colocadas en la ubicación donde se realiza la descarga actualmente por camiones, de esta manera se aprovecha el resto de infraestructura en el patio de camiones impactando en la menor manera las instalaciones actuales. La bomba de descarga si se colocó dentro de la fosa, para tener la capacidad de instalar el sistema de recirculación y aprovechar la cabeza de presión positiva que genera. Para las intervenciones que se deban realizar a este equipo se colocaron escaleras tipo marinero facilitando el acceso al área de operación. Con la distribución de los equipos en el espacio libre utilizado actualmente por la fosa de disolución, se aprovecha las instalaciones ya presentes, teniendo que hacer únicamente una leve modificación con la reparación estructural.

En la Imagen No. 23 (página 121), se presenta el lazo de control propuesto para la automatización del sistema. Para asegurar el mantener un flujo estable y concentración homogénea de salmuera en la descarga es necesario colocar medidores de conductividad en la descarga y en la alimentación de salmuera agotada. De esta forma se genera una lógica para que se alimente la sal por medio del vibrador para tener una reposición de sal en la solución, siguiendo la configuración del balance de masa. En caso no se tenga suficiente alimentación de los dos flujos líquidos, se diseñó una electroválvula de recirculación que permitiría mantener la solución dentro del tanque hasta alcanzar una concentración estable determinada por el medidor de conductividad ubicado en la descarga. Debido a que el balance de masa y la descarga de sal de la tolva dependerían de la humedad de la sal entrante, se debería determinar el porcentaje de humedad total del material para ajustar la programación lógica del sistema.

En el sistema diseñado se tendría acumulación de compuestos insolubles al igual que se presenta en el sistema por lotes utilizado actualmente. La diferencia con el sistema actual consiste en que se podría realizar el mantenimiento del tanque de disolución dentro de los tres días al mes establecidos para el mantenimiento de todo el área de mantenimiento. Se debe considerar un tanque de contención a donde se pueda bombear el contenido de salmuera del tanque de disolución. De esta forma puede ingresar personal por la escotilla lateral para retirar mes a mes la pequeña acumulación de compuestos insolubles que se dan en el sistema en lugar de tener que esperar al mantenimiento semestral. Para el caso de las tolvas de alimentación se diseñaron dos sistemas en paralelo para de esta manera no poner en riesgo la operación si se atora una unidad de alimentación o si el material dentro de la tolva es compactado. El mantenimiento y

limpieza de cada tolva puede ser realizado en meses alternados para tener material en inventario para el arranque de producción.

Para la determinación de los materiales de fabricación de los equipos se consideró la compatibilidad con la materia prima a utilizar. Además debido a que la contaminación por metales en el cloro es bastante perjudicial, se busca evitar utilizar estos materiales. El tanque de disolución se fabrica de fibra de vidrio, el cual es similar a algunos tanques que ya se encuentran instalados en el proceso. Las tolvas y silos son fabricadas de acero ya que deben soportar la carga que genera el peso de la sal. Debido a que están en contacto directo con la sal, se debe agregar un recubrimiento que a su vez no tenga alta fricción ya que puede afectar en el flujo del sólido en la descarga. Para esto se puede utilizar un recubrimiento de polipropileno, polietileno, PVC, asbesto, fibra de vidrio, compuestos fluorocarbonados y policarbonato. Ya que el polietileno tiene el menor coeficiente de fricción, 0.25, se utiliza este material para hacer el recubrimiento. La estructura que soporta las tolvas y el silo se deben recubrir con fibra de vidrio.

Debido a la importancia del equipo diseñado, siendo el primer paso de transformación del proceso electroquímico del cloro, se buscaba tener un plan alternativo ante cualquier falla del sistema. En caso que todos los equipos fallen, se puede seguir utilizando la misma instalación para realizar un proceso de saturación por lotes, como se realiza actualmente. El equipo más crítico es la bomba de descarga de salmuera saturada ya que no habría forma para vaciar el tanque de disolución. Debido a esto se consideró tener una bomba de repuesto en el almacén del departamento, en caso que llegue a fallar la principal. Para la alimentación del agua desionizada y la salmuera saturada se agrega un segundo tramo de tubería para controlar el flujo de manera manual.

Con el listado completo de equipos, se estimó el costo de inversión de capital utilizando escalamiento de dimensiones de cotizaciones ya existentes. Para el cálculo de costo de instalación, tubería, equipo eléctrico y equipo de control se utilizaron valores porcentuales presentes en la teoría para la estimación de inversiones de capital. Con los costos necesarios de capital se obtuvo un valor de Q 534,000 (\$67,000) presentado en la Tabla No. 71 (Pág. 102). Para el costo de operación se tomó únicamente en cuenta el costo de consumo energético por año. Se obtuvo un valor de Q 1,239 /mes. El costo energético del soplador no se tomó en cuenta dentro del costo de energía ya que es un equipo de respaldo por si el flujo de las boquillas jet no llega a ser suficiente para asegurar la agitación del sistema. Con la ejecución de este proyecto se evitarían dos intervenciones anuales de 6 días. El impacto en costos de esta intervención se relaciona con el aumento de consumo energético del electrolizador utilizado para la fabricación de hipoclorito de sodio. Con este aumento de consumo, se incurre en costos por el factor de potencia, estimados en Q191,000 anuales. Con la implementación de este proyecto se obtiene un valor presente neto positivo de Q 62,150 al compararlo contra una tasa de inversión de 11% para un período de recuperación de 4 años y una TIR de 16%.

IX. CONCLUSIONES:

- La temperatura de descarga de la salmuera saturada es de 45°C calculada en el balance de energía. El calor necesario para la reacción de disolución de la entalpía de los flujos de alimentación, se diseñó un equipo de transferencia de calor por si los fluidos de alimentación no tienen la temperatura necesaria.
- La ecuación cinética de disolución a la temperatura de operación de 45° C es de primer orden para un rango de concentración de 0 g/L a 191 g/L con una constante de 0.011578 ± 0.000090 y de orden 0.388744 ± 0.002165 para un rango de concentración de 192 g/L a 251 g/L con una constante de 0.006176 ± 0.000031 .
- Se determinó una variación media de $8.68 \pm 0.04\%$ entre la conductividad medida en la sal industrial utilizada (99.43% NaCl) y cloruro de sodio grado reactivo (99.95%) a temperaturas de 23°C, 45°C y 55°C.
- La energía de activación para los rangos de operación de 192 g/L a 251 g/L es de $9.53 \pm 0.82 \text{ J/mol}$.
- Se dimensionó un tanque de flujo continuo con volumen de $6.03 \pm 0.39 \text{ m}^3$, diámetro de $1.9 \pm 0.1 \text{ m}$ y altura $3.3 \pm 0.2 \text{ m}$.
- Se dimensionaron dos silos para utilizar en el sistema con capacidad efectiva de 18,500 kg cada uno. El ángulo de la tolva es de 40° para asegurar flujo másico en el sistema. Se sobredimensionó en un 10%.
- El sistema de alimentación vibratorio tiene una longitud de 0.52 metros, opera a una frecuencia de 60 Hz, potencia de 60 W y un ángulo respecto a la horizontal de -5°. Con este equipo se logra alimentar con un flujo de 776 kg/h.
- Se dimensionó una boquilla de agitación de diámetro de 0.1969 m (½ in) por flujo jet para la alimentación de salmuera agotada y agua desionizada, teniendo una velocidad de 5 m/s, logrando tener agitación turbulenta en el sistema.

- Se dimensionó el soplador para agitación del tanque con una potencia de $3.1458 \pm 0.2569 \text{ kW}$ y un flujo de aire de $0.2449 \pm 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La bomba de descarga de salmuera tiene una potencia de 396 W y 3500 rpm para un flujo de 4,800 L/h con diámetro de entrada de 5.08 cm (2 in) y descarga de 3.81 cm (1 ½ in). Se utiliza tubería CPVC cédula 80.
- El sistema de salmuera agotada se dimensionó con diámetro de succión de 5.08 cm (2 in) y 2.54 cm (1 in de descarga). Se seleccionó una bomba de 186 W 1x1x3 a 3500 rpm, para mantener un flujo constante. Se utilizó tubería CPVC cédula 80 ya que se compatible con los fluidos transportados.
- El sistema de alimentación de agua desionizada se dimensionó con un diámetro de succión y descarga de 3.18 cm (1.25 in) por las dimensiones de la bomba utilizada. Se utiliza una bomba de 186 W a 3450 rpm.
- Se estimó una inversión de capital necesaria de Q534,000 la cual comparada con ahorros de hasta Q119,000 al año, presenta un VPN de Q 62,150 y una TIR de 16% en un período de recuperación de 4 años.

X. RECOMENDACIONES:

- Se recomienda realizar el proceso de descarga de sal en un ambiente cerrado para controlar el efecto de las condiciones climatológicas las cuales pueden afectar el comportamiento de la sal dentro del silo y la tolva.
- Se recomienda la evaluación de un sistema de filtro de polvos dentro del ambiente cerrado de descarga para evitar daños a la estructura y los equipos instalados.
- Se recomienda instalar un tanque amortiguador en donde se pueda almacenar la salmuera saturada de manera temporal y así poder alinear los mantenimientos del sistema de saturación con el resto del área de manufactura, sin tener pérdida de producto, con un volumen de 6 m³.
- Se recomienda delimitar el valor máximo de humedad con la cual el sistema puede operar de manera estable en el sistema de disolución y los equipos periféricos como la tolva de descarga y el alimentador vibratorio.
- Se recomienda realizar una medición de presencia de terrones en las diferentes épocas del año para determinar si es necesario instalar un equipo adicional para controlarlos.

XI. BIBLIOGRAFÍA:

- Bathija, P.R. 13 de diciembre de 1982. *Jet mixing design and applications*. Ohio, Estados Unidos. 94 páginas.
- Carson, J.W. Petro, G. 2006. *How to Design Efficient and Reliable Feeder for Bulk Solids*. Jenike & Johanson Inc. Estados Unidos. 16 páginas.
- D´acunto, M. 2011. *Controladores Lógicos Programables*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata. 33 págs.
- Dimian, A. et.al. 2008. *Chemical Process Design*. Wiley- VCH. Netherlands. Segunda Edición. 493 pág.
- Eriez. 2012. *Vibratory Feeders and Conveyors: Models HVF, TM, HVC, SM, and VMC*. Pennsylvania, Estados Unidos. 20 páginas.
- Gast. 2009. *Tank Agitation using Regenair Blowers from Gast*. Idex Corporation. Minnesota, Estados Unidos. 8 páginas.
- Kurlansky, M. 2006. *The Story of Salt*. G.P. Putnam's Sons. Estados Unidos. Primera edición, 48 páginas.
- Mannar, V. 1982. *Guidelines for the establishment of solar salt facilities from seawater, underground brines and salted lakes*. United Nations Industrial Development Organization. UNIDO. 105 páginas.
- Marín, F. 2006. *Seguridad industrial: Manual para la formación de ingenieros*. Librería-Editorial Dykinson. España. Primera Edición. 194 páginas.
- McCabe, W, et al. 2007. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7ª ed. Editorial McGraw-Hill. México. 1189 págs.
- McGlinchey, D. 2008. *Bulk Solids Handling, Equipment selection and operation*. Glasgow Caledonian University. UK.
- Perry, H. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8ª ed. Editorial McGraw-Hill. Estados Unidos. 2735 págs.
- Prudich, M. Chen, H. Gu, T, et al. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook: Section 20, Alternative Separation Processes*. McGraw-Hill Companies. Estados Unidos. 84 páginas.
- Rocamora, J. Rafols, J.M. 2003. *Salt Plants at Torre Vieja (Spain) and Their Operation*. Barcelona, España. 12 páginas.
- Rosenberger, Franz. 1981. *Fundamentals of Crystal Growth I*. Springer-Verlag, Germany. Cuarta Edición. pp. 143 – 171.

- Sanders, R. 2005. *Chemical Process Safety*. Elsevier Butterworth – Heinemann. Estados Unidos. 2da Edición. 319 páginas.
- Sharqawy, M. Lienhard, J. Zubair, S. 14 de noviembre de 2009. *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*. Departamento de Ingeniería Mecánica. MIT. Estados Unidos. 29 páginas.
- Skoog, D, et al. 2007. *Fundamentos de química analítica*. 8ª ed. Editorial Thomson. México. 1065 págs.
- Storch, J. 2008. *Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas*. Ediciones Díaz de Santos. España, Cuarta Edición. 968 páginas.
- Theodore, Louis. 2010. *Mass Transfer Operations for the Practicing Engineer*. Wiley. Canada. PP. 371 – 404
- V.M. Sedivy. 1996. *Purification of salt for chemical and human consumption*. Krebs Swiss, Switzerland. 20 pág.

XII. APÉNDICES

A. Datos originales

Tabla No. 21: Medida de humedad de sal utilizada

Muestra 1	18.820 ± 0.007 %
Muestra 2	17.909 ± 0.006 %
Muestra 3	18.423 ± 0.007 %
Promedio	18.384 ± 0.45%

Tabla No. 22: Datos de masa obtenida en probeta de 1 litro para cálculo de densidad.

volumen (± 0.05 L)	masa (± 0.1 g)
1.00	1203.6
1.00	1196.4
1.00	1310.4
1.00	1286.4
1.00	1261.2
1.00	1156.8
1.00	1063.2
1.00	1060.8
1.00	1212.0
1.00	1206.0
1.00	1105.2

Tabla No. 23: Medición de velocidad de agitador magnético

graduación de agitador	estroboscopio (± 1 rev/m)	Tacómetro (± 0.1 rev/m)
4	148	149.7
6	275	277.0
8	559	543.3
10	1105	1106.0

Tabla No. 24: Mediciones de granulometría de partículas de sal

Partícula	Alto (± 0.001 cm)	Ancho (± 0.001 cm)	Largo (± 0.001 cm)
1	0.164	0.101	0.242
2	0.216	0.178	0.131
3	0.080	0.080	0.080
4	0.069	0.141	0.101
5	0.140	0.213	0.101
6	0.163	0.215	0.162
7	0.106	0.212	0.125
8	0.128	0.188	0.253
9	0.224	0.146	0.224
10	0.067	0.067	0.067
11	0.181	0.148	0.090
12	0.132	0.102	0.195
13	0.176	0.068	0.185
14	0.244	0.152	0.120
15	0.055	0.055	0.055
16	0.065	0.065	0.065
17	0.109	0.114	0.169
18	0.141	0.121	0.102
19	0.079	0.079	0.079
20	0.198	0.096	0.136
21	0.120	0.104	0.184
22	0.104	0.110	0.093
23	0.062	0.062	0.062
24	0.130	0.062	0.135
25	0.088	0.088	0.088
26	0.170	0.241	0.123
27	0.182	0.145	0.165
28	0.215	0.132	0.145
29	0.099	0.099	0.099
30	0.055	0.055	0.055
31	0.125	0.125	0.125
32	0.231	0.162	0.205
33	0.223	0.115	0.212
34	0.100	0.176	0.087
35	0.187	0.125	0.115
36	0.178	0.095	0.172
37	0.118	0.180	0.099
38	0.072	0.072	0.072

Tabla No. 25: Mediciones de ángulos específicos de sal.

Ángulo de reposo - material seco	$25 \pm 1^\circ$
Ángulo de reposo - material húmedo	$27 \pm 1^\circ$
Ángulo de fricción - superficie metálica	$31 \pm 1^\circ$

Tabla No. 26: Conductividad de sal industrial utilizada para curva de calibración.

45°C		55°C		23°C	
Masa (g)	Conductividad (S/cm)	Masa (g)	Conductividad (S/cm)	Masa (g)	Conductividad (S/cm)
3.9721 ± 0.0001	63 ± 1	1.2346 ± 0.0001	67.007 ± 1	1.2346 ± 0.0001	47.718 ± 1
6.0540 ± 0.0001	96 ± 1	1.2346 ± 0.0001	103.17 ± 1	1.2346 ± 0.0001	71.578 ± 1
12.5574 ± 0.0001	173 ± 1	1.2346 ± 0.0001	184 ± 1	1.2346 ± 0.0001	128.24 ± 1
15.8412 ± 0.0001	212 ± 1	1.2346 ± 0.0001	228.67 ± 1	1.2346 ± 0.0001	158.07 ± 1
19.0970 ± 0.0001	222 ± 1	1.2346 ± 0.0001	233.99 ± 1	1.2346 ± 0.0001	167.76 ± 1
22.1723 ± 0.0001	244 ± 1	1.2346 ± 0.0001	259.52 ± 1	1.2346 ± 0.0001	180.44 ± 1
25.0164 ± 0.0001	267 ± 1	1.2346 ± 0.0001	281.85 ± 1	1.2346 ± 0.0001	199.08 ± 1
27.8196 ± 0.0001	279 ± 1	1.2346 ± 0.0001	296.74 ± 1	1.2346 ± 0.0001	216.53 ± 1
29.6012 ± 0.0001	289 ± 1	1.2346 ± 0.0001	307.38 ± 1	1.2346 ± 0.0001	221.72 ± 1
31.0546 ± 0.0001	297 ± 1	1.2346 ± 0.0001	319.08 ± 1	1.2346 ± 0.0001	222.68 ± 1
32.1148 ± 0.0001	300 ± 1	1.2346 ± 0.0001	319.08 ± 1	1.2346 ± 0.0001	223.44 ± 1
34.2978 ± 0.0001	300 ± 1	1.2346 ± 0.0001	321.27 ± 1	1.2346 ± 0.0001	224.68 ± 1
37.7544 ± 0.0001	302 ± 1	1.2346 ± 0.0001	320.63 ± 1	1.2346 ± 0.0001	224.17 ± 1

Tabla No. 27: Medidas de muestra de NaCl grado reactivo 45°C.

Masa (g)	Conductividad (S/cm)
10.0009 ± 0.0001	149.2 ± 1
15.004 ± 0.0001	229 ± 1
23.0238 ± 0.0001	261 ± 1

Tabla No. 28: Conductancia para las corridas de disolución 1 – 4.

Corrida 1 (23°C)		Corrida 2 (55°C)		Corrida 3 (45°C)		Corrida 4 (45°C)	
tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)
3	1	2	1	0	0	0	0
5	2	3	2	2	1	2	1
6	3	4	3	4	2	4	1
17	30	16	49	17	55	17	55
18	34	17	58	18	63	18	59
19	36	19	66	19	68	19	68
63	113	44	171	20	73	20	66
64	114	67	220	21	71	21	69
65	115	68	222	41	158	40	158
68	118	69	224	42	160	42	163
69	119	70	224	43	163	44	165
70	120	71	226	44	163	45	169
86	133	72	226	45	164	47	167
87	132	73	229	47	166	48	170
88	134	80	238	48	167	49	172
119	150	81	239	49	166	50	175
121	151	82	241	50	167	51	177
122	152	87	247	51	169	52	178
130	156	88	249	52	171	54	182
131	154	99	259	53	174	55	185
132	156	100	260	55	175	56	185
133	158	101	261	56	177	58	191
206	187	102	261	57	179	60	193
207	187	103	262	58	180	62	196
209	188	104	262	60	182	64	201
210	190	105	263	61	184	66	201
212	190	106	264	63	185	68	206
213	190	107	265	65	188	70	206
214	191	109	267	66	190	72	209
215	192	110	268	67	191	75	212
216	192	112	269	69	193	77	215
217	192	132	283	71	194	79	217
226	196	134	283	73	196	81	218
228	197	136	283	74	198	83	220
229	197	151	294	92	213	103	236

Tabla No. 29: Continuación de Tabla No. 28: Conductancia para las corridas de disolución 1 – 4.

Corrida 1 (23°C)		Corrida 2 (55°C)		Corrida 3 (45°C)		Corrida 4 (45°C)	
tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)
231	198	155	296	94	213	105	237
233	198	156	297	96	217	107	239
234	199	159	298	98	218	109	236
237	200	161	298	100	219	111	237
238	200	163	299	102	221	114	238
239	200	165	300	104	222	116	239
241	201	167	302	106	224	118	239
243	202	169	302	108	226	121	240
250	203	171	303	110	228	124	242
252	204	173	304	112	229	126	244
268	207	175	305	114	229	130	247
270	207	177	305	164	250	183	276
272	208	180	305	167	252	187	277
274	208	182	307	170	252	189	276
292	212	184	307	173	254	193	279
294	213	187	307	176	255	194	280
296	216	189	309	179	256	198	280
298	216	191	309	182	255	201	281
300	216	193	309	186	256	206	281
301	218	195	311	189	256	209	281
302	218	198	311	193	257	215	282
304	218	200	311	196	257	221	282
306	218	202	312	208	257	229	285
308	219	204	312	215	257	230	286
309	219	222	316	218	257	232	284
310	219	224	317	221	257	233	289
311	220	226	316	224	257	236	290
313	220	238	318	227	257	241	291
314	221	241	319	230	257	243	292
315	221	244	319	233	257	249	293
316	222	246	319	236	257	253	294
317	223	248	319	239	257	260	294
319	223	250	319	242	257	262	295
		243	319	245	257	263	296
				248	257	265	296

Tabla No. 30: Conductancia para las corridas de disolución 5 – 7.

Corrida 5 (45°C)		Corrida 6 Concentración inicial, a 45 °C		Corrida 7 Concentración inicial, a °45 C	
tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)
0	0	0	153	0	149
3	1	1	154	2	149
5	0	3	159	3	148
18	53	14	163	23	163
19	58	16	164	24	165
20	68	17	166	26	166
21	65	18	168	28	166
22	68	19	170	30	167
41	160	39	193	72	192
43	165	41	196	74	191
45	166	42	196	76	191
46	169	43	196	78	192
48	167	44	198	80	193
49	169	45	197	82	195
50	172	46	199	84	195
51	175	47	201	86	197
52	179	48	200	88	199
53	177	49	201	90	201
55	184	50	203	92	202
56	187	51	205	94	206
57	185	52	206	96	206
59	192	53	206	98	207
61	191	54	207	100	208
63	195	55	207	102	208
65	201	56	208	104	208
67	203	58	209	106	209
69	207	60	211	108	210
71	206	62	212	110	211
73	207	63	213	112	211
76	213	64	213	115	212
78	214	65	213	117	213
80	218	66	214	120	214
82	220	68	216	123	215
84	219	70	217	126	215
104	237	92	225	153	222

Tabla No. 31: Continuación de Tabla No. 30

Corrida 5 (45°C)		Corrida 6		Corrida 7	
		Concentración inicialK a 45 °C		Concentración inicial, a °45 C	
tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)	tiempo (± 1 s)	conductancia (± 1 S/cm)	tiempo (± 1 s)
106	242	96	228	156	222
108	242	101	229	158	223
110	242	107	232	161	223
112	245	109	232	163	223
115	245	113	229	165	223
117	247	118	231	167	224
119	247	120	233	170	225
122	247	123	234	173	225
125	249	125	235	176	226
127	249	127	236	179	226
131	251	129	237	182	226
184	279	187	253	247	234
188	279	190	253	252	234
190	278	193	249	257	235
194	279	199	250	262	235
195	283	208	252	254	235
199	285	211	251	262	235
202	286	214	253	268	235
207	286	216	254	272	236
210	287	220	254	276	236
216	289	223	254	280	236
222	289	231	255	285	236
230	289	237	255	291	236
231	290	241	256	295	236
233	290	254	256	298	237
234	290	267	257		
237	291	270	255		
242	294	273	258		
244	293	276	256		
250	294	280	256		
254	296	282	259		
261	297	285	263		
263	298	286	263		
264	299	288	265		
		290	266		

Tabla No. 32: Conductividad en los puntos de descarga de tanque piloto.

Alimentación	Descarga	Agitación tangencial de flujo (± 0.01 mS/cm)	Agitación con aire (± 0.01 mS/cm)	Agitación con aire (± 0.01 mS/cm)
Superior	Superior	1.91	4.14	4.02
Superior	Intermedio	2.26	4.06	4.07
Superior	Inferior	2.54	4.02	4.16
Inferior	Superior	3.35	4.12	4.08
Inferior	Intermedio	3.38	4.12	4.04
Inferior	Inferior	3.45	4.10	4.02

B. Cálculo de muestra

1. Balance de masa. Flujo másico de salmuera saturada:

$$\text{flujo volumétrico} * \text{densidad} = \text{flujo másico}$$

$$4,800 \frac{L}{h} * 1.19 \frac{kg}{L} = 5712 \frac{kg}{h}$$

Flujo másico de salmuera diluida:

$$2580 \frac{L}{h} * 1.14 \frac{kg}{L} = 2940 \frac{kg}{h}$$

Cálculo de alimentación de sal:

$$\text{flujo salida} * \text{concentración}$$

$$= \text{flujo entrada} * \text{concentración} + \text{alimentación de sal} * \text{pureza} * (100\% - \% \text{ humedad})$$

$$4,800 \frac{L}{h} * 250 \frac{g}{L} = 2580 \frac{L}{h} * 195 \frac{g}{L} + x_{sal} \frac{g}{h} * 99.43\%_{\text{pureza}} * (100 - 18.384 \pm 0.45\%)$$

$$x = 776 \frac{kg}{h} \text{ sal industrial}$$

Cálculo de alimentación agua desionizada:

$$\text{salmuera saturada} = \text{sal} + \text{salmuera diluida} + \text{agua desionizada}$$

$$5712 \frac{kg}{h} \text{ salmuera saturada} = 776 \frac{kg}{h} \text{ sal} + 2940 \frac{kg}{h} \text{ salmuera diluida} + x \frac{kg}{h} \text{ agua desionizada}$$

$$1996 \frac{kg}{h} \text{ agua desionizada}$$

$$\frac{1996 \frac{kg}{h} \text{ agua desionizada}}{0.99 \frac{kg}{L}} = 2016 \frac{L}{h}$$

Cálculo de pH final de solución:

$$\text{salmuera diluida} = pH \ 11$$

$$pOH = 14 - pH$$

$$pOH = 14 - 11 = 3$$

$$pOH = -\log([OH^-])$$

$$3 = -\log([OH^-]) \rightarrow [OH^-] = 0.001 \frac{mol}{L}$$

Cálculo del pOH de la solución de salida.

$$[OH^-]_{salida} = \frac{\text{flujo alimentación} * [OH^-]_o}{\text{flujo de salida}}$$

$$[OH^-]_{salida} = \frac{2580 \frac{L}{h} * 0.001 \frac{mol}{L}}{2580 \frac{L}{h} + 2016 \frac{L}{h}} = 0.000561 \frac{mol}{L}$$

$$pOH = -\log\left(0.000561 \frac{mol}{L}\right) = 3.25 \rightarrow pH = 10.75$$

2. Balance de energía.

- a. **Sal.** Para determinar la energía de la sal alimentada, se asume que presenta las mismas capacidades caloríficas de cloruro de sodio presentado en marco teórico.

$$-411.153 \frac{kJ}{mol} * \frac{1 \text{ mol NaCl}}{58.44 \text{ g}} = 7.0355 \frac{J}{g} = 7.0355 \frac{kJ}{kg}$$

- b. **Agua.** Para la energía suministrada por el agua desionizada, se tomó el valor estándar del agua a temperatura ambiente de 25°C. Este valor es de -285.83 kJ/mol.

$$H_{298K} = 285.83 \frac{J}{mol} * \frac{1 mol H_2O}{18 g} = 15.88 \frac{kJ}{kg}$$

c. **Salmuera agotada.** Para el cálculo de la energía suministrada por la solución de salmuera agotada, se calculó el porcentaje mol/mol de la solución. Se despreció el efecto del pH en la entalpía de la solución. Se utilizó el valor presentado en la Tabla No. 5 para una temperatura de 57°C. se interpoló entre ambos valores de concentración. Para la entalpía suministrada por la solución, se tomó la contribución individual de cada componente (agua y NaCl). El calor de disolución es positivo por lo que consiste en un proceso endotérmico.

$$195 \frac{g}{L} * \frac{1 L H_2O}{1000 g} * \frac{18 g H_2O}{1 mol} * \frac{1 mol}{58.44 g NaCl} * 100\% = 6.01 \% \frac{mol NaCl}{mol H_2O}$$

$$Cp = 0.960792 - 0.015489 * \% \frac{mol}{mol}$$

$$Cp = 0.960792 - 0.015489 * 6.01 \% \frac{mol NaCl}{mol H_2O} = 0.8679 \frac{cal}{g^{\circ}C}$$

$$0.8679 \frac{cal}{g^{\circ}C} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 3.633 \frac{J}{g^{\circ}C} = 3.633 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$H = x_1 H_1 + x_2 H_2 + \Delta H$$

$$H_{298K} = (1 - 0.06) * 285.83 \frac{J}{mol} + 0.06 * \left(98.321 \frac{cal}{mol} * \frac{4.1868 J}{1 cal} \right) + 0.998 \frac{cal}{mol} * \frac{4.1868 J}{1 cal}$$

$$= 297.56 \frac{J}{mol}$$

$$H_{298K} = 297.56 \frac{J}{mol} * \frac{1 mol}{(1 - 0.06) * 18 g H_2O + 0.06 * 58.44 g NaCl} = 14.57 \frac{kJ}{kg}$$

Debido a que la salmuera ingresa a 55°C se debe corregir el valor de la entalpía con la capacidad calorífica calculada previamente.

$$H = H_{298K}^{\circ} + (T - 25^{\circ}C) * Cp$$

$$H_{55^{\circ}C} = 14.57 \frac{kJ}{kg} + (55^{\circ}C - 25^{\circ}C) * 3.633 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} = 123.56 \frac{kJ}{kg}$$

d. Salmuera saturada.

$$H_{298K} = (1 - 0.077) * 285.83 \frac{J}{mol} + 0.077 * \left(98.321 \frac{cal}{mol} * \frac{4.1868 J}{1 cal} \right) + 0.998 \frac{cal}{mol} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 299.70 \frac{J}{mol}$$

$$H_{298K} = 299.70 \frac{J}{mol} * \frac{1 mol}{(1 - 0.077) * 18 gH_2O + 0.077 * 58.44 g NaCl} = 14.1943 \frac{kJ}{kg}$$

$$H = 14.1943 \frac{kJ}{kg} + (T - 25^\circ C) * 3.5187 \frac{kJ}{kg^\circ C}$$

e. Balance de energía.

$$(\dot{m} * \Delta H)_{salmuera\ agotada} + (\dot{m} * \Delta H)_{sal} + (\dot{m} * \Delta H)_{\text{agua desionizada}} - \dot{m}_{sal} * \Delta H_{\text{disolución}} = (\dot{m} * \Delta H)_{salmuera\ saturada}$$

$$\left(123.56 \frac{kJ}{kg} \right) * 2940 \frac{kg}{h} + 7.0355 \frac{kJ}{kg} * 1996 \frac{kg}{h} + \left(15.88 \frac{kJ}{kg} - 4.18 \frac{kJ}{kg} \right) * 776 \frac{kg}{h} =$$

$$\left(14.1943 \frac{kJ}{kg} + (T - 25^\circ C) * 3.5187 \frac{kJ}{kg^\circ C} \right) * 5712 \frac{kg}{h}$$

$$T = 45.19^\circ C$$

Entalpía de salmuera saturada:

$$H = 14.1943 \frac{kJ}{kg} + (45.19^\circ C - 25^\circ C) * 3.5187 \frac{kJ}{kg^\circ C} = 67.65 \frac{kJ}{kg}$$

3. Curva de calibración.

sal libre de humedad = masa agregada (g) * (100% - porcentaje de humedad)

$$3.9721 \pm 0.0001 g * (100\% - 18.384 \pm 0.45\%) = 3.2174 \pm 0.0003 g$$

Cálculo de la concentración de la solución:

$$\text{concentración} = \frac{\text{masa libre de humedad}}{100 \pm 1 \text{ mL solución}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}$$

$$\text{concentración} = \frac{3.2174 \pm 0.0003 \text{ g}}{100 \pm 1 \text{ mL}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 32.174 \pm 0.046 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$\sqrt{\text{concentración}}$$

$$\sqrt{32.174 \pm 0.046 \frac{\text{g}}{\text{L}}} = 5.6722 \pm \pm 0.2150 \frac{\text{g}^{0.5}}{\text{L}^{0.5}}$$

Se realizó una regresión lineal de conductividad contra raíz de concentración. Ver Gráfica No. 9.

$$\sqrt{C} \frac{\text{g}^{0.5}}{\text{L}^{0.5}} = (0.043555 \pm 0.001114) * G \left(\frac{\text{S}}{\text{cm}} \right) + 2.722089 \pm 0.253517$$

Se realizó el mismo procedimiento para las corridas de calibración a 23°C y 55°C.

4. Cálculo de cinética de reacción. Dependiendo de la temperatura a la cual fueron realizadas las mediciones, se utilizó la regresión lineal respectiva para obtener el valor de \sqrt{C} a una conductividad G específica.

Como ejemplo se utiliza el primer valor de conductividad medida de conductividad la primera corrida a temperatura ambiente de la Tabla No. 28 con la regresión lineal presentada en la Tabla No. 43.

$$\sqrt{c \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right)} = (0.05832126 \pm 0.001613) * G \left(\frac{\text{S}}{\text{cm}} \right) + 2.715698 \pm 0.285522$$

$$\sqrt{c \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right)} = (0.05832126 \pm 0.001613) * \left(1 \pm 1 \frac{\text{S}}{\text{cm}} \right) + 2.715698 \pm 0.285522$$

$$= 2.77 \pm 0.26 \frac{\text{g}^{0.5}}{\text{L}^{0.5}}$$

$$c \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right) = \sqrt{c \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right)}^2$$

$$c \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right) = \left[2.77 \pm 0.26 \frac{\text{g}^{0.5}}{\text{L}^{0.5}} \right]^2 = 7.70 \pm 0.71 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Para el cálculo del grado de conversión se tomó el valor de saturación de la solución a la temperatura de la corrida.

$$X_A = \frac{C_a}{C_{max}} * 100\%$$

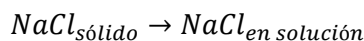
$$X_A = \frac{7.70 \pm 0.71 \frac{g}{L}}{245.02 \pm 5.60 \frac{g}{L}} * 100 \% = 3.14 \pm 0.30 \%$$

La cinética de la reacción se comportó en dos regímenes diferentes dependiendo de la concentración. Para el primer perfil, se realizó el cálculo para cinética de reacción de primer orden.

$$-\ln(1 - X_A) = -\ln(1 - 3.14 \pm 0.30 \%) = 0.032 \pm 0.003$$

Se graficó $-\ln(1 - X_A)$ versus el tiempo para obtener la cinética de la reacción a partir del método integral.

$$-\ln(1 - X_A) = (0.006791 \pm 0.000046) * t - 0.0116313 \pm 0.0034783$$



$$r_{NaCl\ a\ 23^\circ C} = k * [NaCl]$$

$$-r_{NaCl\ a\ 23^\circ C} = (0.006791 \pm 0.000046) * [NaCl] \frac{g}{L * s}$$

Para el período restante de la disolución, se utilizó el método diferencial para determinar el orden y constante de la reacción.

Se ajustaron los datos a una regresión lineal cuadrática.

$$t = 0.0122 * C_{NaCl}^2 - 3.1944 * C_{NaCl} + 341.31$$

$$R^2 = 0.9976$$

Se derivó la ecuación para obtener la pendiente de la recta tangente en cada punto evaluado.

$$\frac{dt}{dC_{NaCl}} = 0.0244 * C_{NaCl} - 3.1944$$

$$\frac{dt}{dC_{NaCl}} = 0.0244 * \left(146.92 \pm 3.81 \frac{g}{L}\right) - 3.1944 = 0.3905 \pm 0.174 \frac{sL}{g}$$

$$\frac{1}{\frac{dt}{dC_{NaCl}}} = \frac{dC_{NaCl}}{dt} = \frac{1}{0.3905 \pm 0.174} = 2.5606 \pm 1.08 \frac{g}{L * s}$$

$$\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt} = \log_{10} \left[2.5606 \pm 1.08 \frac{g}{L * s} \right] = -0.40834 \pm 0.0318$$

Por el método diferencial, se gráfico $\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt}$ contra $\log_{10} C_{NaCl}$.

$$\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt} = n * \log_{10} C_{NaCl} + \log_{10} k$$

$$\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt} = (-0.390143 \pm 0.002439) * \log_{10} C_{NaCl} + (-2.212451 \pm 0.000815)$$

Para determinar la cinética y orden de la reacción se despejó la pendiente y el intercepto.

$$(-2.212451 \pm 0.000815) = \log_{10} k \rightarrow k = 0.00613 \pm$$

$$-r_{NaCl} \text{ a } 23^{\circ}C = \left(0.00613 \frac{g^{-0.6099}}{L^{-0.6099} * s} \right) * [NaCl]^{0.39014} \frac{g}{L * s}$$

5. Cálculo de la energía de activación.

$$\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Se calculó la energía de activación para cada rango de velocidad de reacción obtenida.

$$\ln \left(\frac{0.011578 \pm 0.000090 \frac{g}{L * s}}{0.006772 \pm 0.000047 \frac{g}{L * s}} \right) = \frac{E}{8.314 \frac{J}{mol K}} \left(\frac{1}{(23 + 273.15)K} - \frac{1}{(45 + 273.15)K} \right)$$

$$E = 683.90 \pm 7.13 \frac{J}{mol}$$

6. Cálculo del volumen del tanque.

$$\frac{VC_{Ao}}{F_{Ao}} = \frac{C_{Ao} - C_{Af}}{(-r_a)_f} = \frac{V}{v_o} = \tau$$

Tomando en cuenta que se introduce al sistema una solución de salmuera a 195 g/L, se utiliza la ecuación cinética correspondiente de Tabla No. 10.

$$-r_{NaCl a 45^{\circ}C} = \left(0.006176 \pm 0.000031 \frac{g^{0.611256}}{L^{0.611256} * s} \right) \\ * [251.54 \pm 0.036]^{0.388744 \pm 0.002165} \frac{g}{L * s} = 0.052958 \pm 0.00027 \frac{g}{L * s}$$

$$\frac{V}{\left(2002 \frac{L}{h} + 2580 \frac{L}{h} \right) * \frac{1 h}{3600 s}} = \frac{\left(0 - 251.54 \pm 0.036 \frac{g}{L} \right)}{\left(-0.052958 \pm 0.00027 \frac{g}{L * s} \right)}$$

$$V = 6032.46 \pm 391.45 L$$

Espacio –tiempo:

$$\tau = \frac{V}{v_o} = \frac{6032.46 \pm 391.45 L}{\left(2002 \frac{L}{h} + 2580 \frac{L}{h} \right)} = 1.3166 \pm 0.0854 h$$

El dimensionamiento del tanque se realiza siguiendo la relación diámetro-altura del reactor a escala. Se agregó un factor de seguridad de 10% de sobredimensionamiento y un factor de crecimiento a una tasa de 3% anual durante un período de 10 años.

$$\frac{\text{diámetro}}{\text{altura}} = \frac{117.0 \pm 0.1}{205.0 \pm 0.1} = 0.5707 \pm 0.0004$$

$$\text{Volumen} * 1 = \frac{\pi}{4} D^2 * h$$

$$(6.033 \pm 0.392) m^3 = \frac{\pi}{4} D^2 * h$$

$$(6.033 \pm 0.392 m^3) * 115 \% * 134 \% = \frac{\pi}{4} D^2 * \frac{D}{0.5707 \pm 0.0004}$$

$$D = 1.9 \pm 0.1 m$$

$$h = \frac{1.9 \pm 0.1 m}{0.5707 \pm 0.0004} = 3.3 \pm 0.2 m$$

7. Prueba de laboratorio:

Cálculo del número de Reynolds en sistema a escala de 2 L. Las ecuaciones se hacen referencia en marco teórico para cálculo de sistemas de agitación.

$$D_a = 36.955 \pm 0.001 mm$$

$$W = 8.155 \pm 0.001 mm$$

$$H = 193.124 \pm 0.001 mm$$

$$D_t = 131.056 \pm 0.001 \text{ mm}$$

$$Re = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu}$$

Para el cálculo de la viscosidad se utilizó el nomograma para viscosidades de líquidos para salmuera saturada NaCl a 25% y 45°C. El dato de la revolución del sistema se obtuvo del promedio en una agitación grado 8.

$$\mu = 1.4 \text{ cP}$$

$$Re = \frac{\left(36.995 \pm 0.001 \text{ mm} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)^2 * \left(551 \pm 1 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) * 1,190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.0014 \text{ Pa} * \text{s}}$$

$$= 10,656 \pm 754$$

8. Evaluación de mezclador jet en tanque real. Se calculó la velocidad terminal de la partícula especificado en marco teórico.

$$\Delta SG = \frac{1187 \pm 84.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.9975 \pm 0.0707$$

Se calculó el tamaño de partícula medio observado en la Gráfica No. 7 y presentado en la Tabla No. 33.

$$\text{diametro} = 0.227 \pm 0.084 \text{ cm} = 2,227 \pm 840 \mu\text{m}$$

$$\text{Velocidad terminal} = 17 \frac{\text{ft}}{\text{min}} = 0.08636 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para el cálculo de la potencia de la bomba se asume que la línea de 15% p/p se mantiene un comportamiento similar llegando hasta 0.33 hp/1,000 gal en 17 ft/min.

$$\text{Poder de la bomba} = 0.33 \frac{\text{hp}}{1,000 \text{ gal}} * 6032.46 \pm 391.45 \text{ L} \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ L}} = 0.53 \text{ hp}$$

Cálculo del diámetro de alimentación, se asume una velocidad inicial de $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Como se estableció en el marco teórico.

$$D = \sqrt{\frac{Q_{\text{flujo}}}{\frac{\pi}{4} * U_{\text{velocidad lineal}}}}$$

$$D = \sqrt{\frac{\left(2.580 \frac{m^3}{h}\right) * \frac{1h}{3600 s}}{\frac{\pi}{4} * 10 \frac{m}{s}}} = 0.009550 m = 0.375 in$$

Debido a que no se cuentan con diámetro interno de 0.375 in se calcula la factibilidad de operar a un diámetro de $\frac{1}{2}$ " .

Se calcula la velocidad lineal a la cual se operaría en este flujo.

$$v = \frac{D^2 * \frac{\pi}{4}}{\dot{V}}$$

$$v = \frac{\left(2.580 \frac{m^3}{hora}\right) * \frac{1hora}{3600 s}}{0.0127 m^2 * \frac{\pi}{4}} = 5.66 \frac{m}{s}$$

Cálculo del número de Reynolds de la boquilla:

$$Re = \frac{5.66 \frac{m}{s} * 1140 \frac{kg}{m^3} * 0.0127 m}{0.0014 Pa * s} = 58,532$$

$$Fo = \frac{K_z}{Re}$$

(Paul, 2003)

Debido a que se tiene un flujo turbulento $K_z = 3.00$, con lo que el número de Fourier.

$$Fo = \frac{3.00}{58,532} = 0.000051$$

Cálculo del tiempo de mezclado:

$$\theta = \frac{Fo * \rho * (H^2 + D^2)}{\mu}$$

(Paul, 2003)

$$\theta = \frac{0.000051 * 1140 \frac{kg}{m^3} * [(3.3 \pm 0.2 m)^2 + (1.9 \pm 0.1 m)^2]}{0.0014 Pa * s} = 2920 s = 0.81 horas$$

El reactor se encuentra dimensionado a un espacio tiempo de 1.25 horas con lo que se realiza un mezclado jet con un diámetro de $\frac{1}{2}$ " .

9. **Dimensionamiento de tolva para sal.** Para el cálculo de la inclinación de la tolva de recepción, se utiliza el ángulo de fricción medido de $31 \pm 1^\circ$, ajustando la tolva a un grado de 40° .

Para la densidad de bulto, se toma el promedio obtenido de la Tabla No. 35. Tomando en cuenta la geometría de la tolva se calcula el volumen de dos partes.

$$\text{Volumen total} = \text{volumen cubo} + \text{volumen tolva}$$

$$\text{Volumen de tolva} = \frac{(2.5 \text{ m})^2 * \frac{2.5 \text{ m}}{\tan(40^\circ)}}{3} - \frac{(0.15 \text{ m})^2 * \frac{0.15 \text{ m}}{\tan(40^\circ)}}{3} = 3.10 \text{ m}^3$$

$$\text{volumen cuerpo de tolva} = (2.5 \text{ m})^3 = 15 \text{ m}^3$$

$$\text{volumen total} = 18.10 \text{ m}^3$$

$$\text{volumen efectivo} = (2.5 \text{ m} * 80\%) * (2.5 \text{ m})^2 = 12.5 \text{ m}^3$$

$$\text{Capacidad efectiva} = (12.5 \text{ m}^3 + 3.10 \text{ m}^3) * 1187 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 18,517 \text{ kg}$$

10. **Cálculo de la unidad vibratoria de descarga.** Para mantener una relación de apertura de compuerta con el paso del sólido según las recomendaciones, se establece un valor de 1.

Para la base de dimensiones se dimensionó con la información técnica mostrada en la Imagen No. 25 y una inclinación de -5° . Se utilizó el diámetro de partícula más grande observado en la Tabla No. 33. Se utiliza una distancia de seguridad de 15 cm.

$$T = H$$

$$T = H = 15 \text{ cm}$$

$$\text{huella de sal en vibrador} = \frac{H}{\tan(\theta_{\text{reposo}} + \theta_{\text{inclinación}})}$$

$$\text{huella de sal en vibrador} = \frac{15 \text{ cm}}{\tan(27^\circ - 5^\circ)} = 37 \text{ cm}$$

$$\text{largo mínimo de vibrador} = \text{huella de sal} + \text{distancia de seguridad}$$

$$\text{largo mínimo de vibrador} = 37 \text{ cm} + 15 \text{ cm} = 52 \text{ cm}$$

11. Cálculo de tubería y bombas. Tubería de descarga agua desionizada, se calcula la velocidad óptima del flujo, el ejemplo se realiza para el cálculo del agua desionizada y se realiza el mismo procedimiento para las demás tuberías.

$$\bar{V}_{opt} = \frac{12m^{0.1}}{(GE * 62.4)^{0.36}}$$

(McCabe, 2007)

$$\bar{V}_{opt} = \frac{12 \left(0.554 \frac{kg}{s} * 120\% * \frac{2.2 lb}{1 kg} \right)^{0.1}}{(0.997 * 62.4)^{0.36}} = 0.235 \frac{m}{s}$$

$$Flujo = \bar{V}_{opt} * \frac{\pi}{4} D^2 \rightarrow D_{opt} = \sqrt{\frac{F}{\bar{V}_{opt}} * \frac{4}{\pi}}$$

(McCabe, 2007)

$$D_{opt} = \sqrt{\frac{2.002 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{4}{\pi}}{2.82 \frac{ft}{s} * \frac{1 m}{3.3 ft}}} = 0.032 m = 1.28 in$$

Para el cálculo de caída de presión en tubería se utiliza la ecuación de Hazen & Williams. Esta información se encuentra consolidada en la Tabla No. 75 y la Tabla No. 76.

$$\Delta P_{\left(\frac{psi}{100 ft}\right)} = 4335 * \left(0.0983 \frac{q^{1.852}}{D_i^{4.8655}} \right)$$

$$\Delta P_{\left(\frac{psi}{100 ft}\right)} = 4335 * \left(0.0983 \frac{21 \frac{gal}{min}^{1.852}}{3 in^{4.8655}} \right) = 571.294 \frac{psi}{100 ft}$$

Tomando los datos de la Tabla No. 75 y Tabla No. 76 .se calcula la caída de presión por tubería de la siguiente forma para 2”.

$$\left(\sum \text{longitudes equivalentes de accesorios} \right) * \frac{\text{caída de presión de tubería}}{100 ft \text{ de tubería}} = \Delta P$$

$$4 \text{ codos } 90^\circ * \frac{4 ft}{1 \text{ codo } 90^\circ} + 1 \text{ codos } 45^\circ * \frac{2 ft}{1 \text{ codo } 45^\circ} = 26.5 ft$$

$$(26.5 ft_{accesorios} + 15 ft_{tubería}) * \frac{0.69 psi}{100 ft \text{ de tubería}} = 0.286 psi = 1974 Pa$$

Para el cálculo de caída de presión por electroválvula se utilizó la Gráfica No. 21 al flujo de operación de cada tubería. Se obtuvo un valor de 0.1 kPa.

Para el cálculo de caída de presión por expansión y reducción se utilizó las ecuaciones presentadas en marco teórico, mecánica de fluidos. El ejemplo se realiza para una expansión de 1.5" a 2".

$$K_e = \left(1 - \frac{1.5}{2}\right)^2 = 0.0625$$

$$h_{fe} = \frac{0.0625 * \left(1.40 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 0.06125 \frac{m^2}{s^2}$$

Para el cálculo de caída de presión por reducción se utiliza el cálculo de la reducción de tubería para el diámetro jet calculado previamente.

$$K_c = 0.4 \left(1 - \frac{0.5''}{1.25''}\right) = 0.24$$

$$h_{fc} = \frac{0.24 * \left(5.66 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 3.8442 \frac{m^2}{s^2}$$

Para el cálculo total de caída de presión por accesorios se suma las caídas de presión por expansión y reductores presentados en el marco teórico. El ejemplo se realiza para la caída de presión de alimentación de salmuera agotada.

$$h_f = (0.1535 + 6.36) \frac{m^2}{s^2} + \frac{100 Pa}{1140 \frac{kg}{m^3}} + \frac{(2 kPa + 10.7 kPa) \frac{1000 Pa}{1 kPa}}{1140 \frac{kg}{m^3}} = 17.74 \frac{m^2}{s^2}$$

12. Dimensionamiento de las bombas. Para el cálculo del dimensionamiento de la bomba se utiliza la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_b}{\rho} + \frac{gZ_b}{g_c} + \frac{a_b \bar{V}_b^2}{2} + \frac{h_f}{\rho} = \frac{P_a}{\rho} + \frac{gZ_a}{g_c} + \frac{a_a \bar{V}_a^2}{2} + \eta W_p$$

(McCabe, 2007)

El cálculo se realiza para la bomba de descarga de salmuera del tanque a una elevación de tres metros para almacenar en un tanque de tratamiento.

$$\frac{9.8 \frac{m}{s^2} * 15 m}{1} + \frac{\left(0.757 \frac{m}{s}\right)^2}{2} + \frac{134,100 Pa}{1190 \frac{kg}{m^3}} = \frac{9.8 \frac{m}{s^2} * 3.3 m}{1} + \eta W_p$$

$$\eta W_p = \Delta H = 249.58 \frac{m^2}{s^2}$$

$$P_f = \Delta H * \dot{m}$$

$$P_f = 249.58 \frac{m^2}{s^2} * 1.587 \frac{kg}{s} = 396 W$$

$$P_B = \frac{396 W}{45 \%} = 962 W = 1.3 hp$$

13. Cálculo de agitación por burbujeo. Cálculo del flujo de aire necesario, se utilizó la ecuación presentada en marco teórico para el cálculo de potencia de un soplador. Se utiliza sistema inglés ya que es el necesario para poder utilizar las gráficas de correlación.

$$\frac{\pi}{4} (1.9 \pm 0.1 m)^2 * 0.08636 \frac{m}{s} = 0.2449 \pm 0.02 \frac{m^3}{s}$$

Potencia (kW)

$$= 2.72 \times 10^{-5} * \left[0.2449 \pm 0.02 \frac{m^3}{s} * \frac{3600 s}{1 h} \right] \\ * \left[2.8 \pm 0.2 m * \frac{39.37 in}{1 m} * 1.19 \right] = 3.1458 \pm 0.2569 kW$$

Se necesita un equipo capaz de suministrar $0.2449 \pm 0.02 \frac{m^3}{s}$ a una presión de $3.1458 \pm 0.2569 kW$.

Presión de operación necesaria:

$$H_{(in)} * GE + 15 = P_{(in H_2O)}$$

(Regenair, 2012)

$$2.8 \pm 0.2 m * \frac{39.37 in}{1 m} * 1.19 + 15 = 146.8 \pm 9.4 in H_2O$$

Flujo de aire necesario:

$$\frac{\pi}{4} D^2 * 15 = \text{flujo de aire} \frac{ft^3}{min}$$

$$\frac{\pi}{4} \left(1.9 \pm 0.1 m * \frac{3.28 ft}{1 m} \right)^2 * 0.9975 \pm 0.0707 = 45.8 \pm 0.2 \frac{ft^3}{min}$$

Observando la Gráfica No. 29: Curva característica de soplador GAST R4H. Se determina el flujo real de operación del sistema a la presión de operación establecida en 60 Hz.

$$\text{Flujo real} = 90 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

El diámetro de tubería principal se obtiene del diámetro de salida del soplador R4H en 2". Para uniformizar el flujo de aire, se separa en 5 tuberías paralelas.

$$\text{Flujo de aire por división} = \frac{\text{Flujo principal}}{\# \text{ de tuberías}}$$

(Regenair, 2012)

$$\text{Flujo de aire por división} = \frac{90 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{5} = 18 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

Observando la Tabla No. 80: Tamaño ideal de tubería para flujo de aire de sopladora. se obtiene el diámetro de tubería del sistema en 1".

$$\text{Número de agujeros} = \frac{\# \text{ de tuberías} * \text{largo de tubería}_{(in)}}{2 \text{ in de separación}}$$

Número de agujeros

$$= \frac{[(1.3 \pm 0.2 \text{ m}) + 2 * (1.036 \pm 0.2 \text{ m}) + 2 * (1.243 \pm 0.2 \text{ m})] * \frac{39.37 \text{ in}}{1 \text{ m}}}{2 \text{ in de separación}}$$

$$= 165 \text{ agujeros}$$

$$\text{Flujo de aire por agujero} = \frac{\text{flujo total}}{\text{numero de agujeros}}$$

$$\frac{90 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{165 \text{ agujeros}} = 0.55 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

Con la información de la

Gráfica No. 30: Caída de presión de aire por agujero. Se obtiene una pérdida de presión de 2 in H_2O .

Caída de presión por accesorios, se toma el equivalente a largo de tubería presentado en la Tabla No. 81: Correspondiente largo de tubería para accesorios.

$$4 \text{ codos } 90^\circ + 3 \text{ Tee} + 1 \text{ válvula de paso} \\ 4 * (5.0 \text{ ft}) + 3 * (3.5 \text{ ft}) + 1 * (1.5 \text{ ft}) = 32 \text{ ft}$$

Largo de tubería total = equivalente por accesorios + largo de tubería

$$\text{Largo de tubería total} = 32 \text{ ft} + 12 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 71.36 \text{ ft}$$

Determinando la caída de presión por tubería de la Gráfica No. 31, se obtiene un valor de $0.3 \frac{\text{in } H_2O}{10 \text{ ft tubería}}$.

$$\text{Pérdida de fricción total} = 71.36 \text{ ft} * 0.3 \frac{\text{in } H_2O}{10 \text{ ft tubería}} = 2.14 \text{ in } H_2O$$

Se realiza el mismo procedimiento para la tubería de distribución, obteniendo un valor de $1.38 \text{ in } H_2O$.

Determinación de la presión actual del sistema.

$$\Delta P_{\text{tubería de alimentación}} + \Delta P_{\text{tubería de distribución}} + \Delta P_{\text{orificio}} + P_{\text{carga de fluido}} = P$$

(Regenair, 2012)

$$2.14 \text{ in } H_2O + 1.38 \text{ in } H_2O + 2 \text{ in } H_2O + 146.8 \pm 9.4 \text{ in } H_2O = 152.32 \pm 9.4 \text{ in } H_2O$$

El resultado todavía se encuentra dentro del rango de operación descrito en Gráfica No. 29 para la curva del soplador R4H.

14. Cálculo financiero: Para el cálculo de la inversión de capital necesaria para las conexiones se utilizaron factores sobre la totalidad del capital invertido.

Instalación	0.15
Instrumentación	0.10
Tubería	0.20
Sistemas eléctricos	0.13

Para el cálculo de los costos de operación por los equipos, se determinó la potencia consumida por los equipos en el tiempo de proceso.

$$\text{Potencia total} = P_{\text{soplador}} + P_{\text{vibrador}} + P_{\text{bomba salmuera agotada}} + P_{\text{bomba salmuera saturada}} + P_{\text{agua}}$$

$$\text{Potencia total} = 2 * 60 \text{ W} + 370 \text{ W} + 370 \text{ W} + 186 \text{ W} = 1048 \text{ W}$$

El costo por kWh se calculó con un valor de Q 1.829082/ kWh

$$\text{Costo energético} = \frac{\text{costo}}{\text{kWh}} * \text{potencia total} * \text{tiempo de operación}$$

$$\text{Costo energético} = \frac{Q.1.829082}{\text{kWh}} * 1.048 \text{ kW} * 27 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = Q 1,239.77 / \text{mes}$$

C. Datos calculados

Tabla No. 33: Tamaño de partícula para las 40 muestras de sal industrial.

Volumen (mm ³)			diámetro equivalente (cm)		
7.67	±	0.069	0.36	±	0.076
7.33	±	0.068	0.36	±	0.075
6.09	±	0.062	0.34	±	0.073
5.81	±	0.069	0.33	±	0.076
5.68	±	0.056	0.33	±	0.071
5.44	±	0.059	0.32	±	0.072
5.04	±	0.055	0.32	±	0.070
5.04	±	0.053	0.32	±	0.069
4.45	±	0.051	0.30	±	0.068
4.35	±	0.047	0.30	±	0.066
4.12	±	0.046	0.30	±	0.066
4.01	±	0.049	0.29	±	0.068
3.01	±	0.039	0.27	±	0.063
2.91	±	0.039	0.26	±	0.062
2.81	±	0.037	0.26	±	0.062
2.69	±	0.035	0.26	±	0.060
2.63	±	0.035	0.25	±	0.060
2.59	±	0.035	0.25	±	0.061
2.41	±	0.034	0.25	±	0.060
2.30	±	0.032	0.24	±	0.058
2.21	±	0.037	0.24	±	0.061
2.10	±	0.030	0.24	±	0.057
2.10	±	0.029	0.24	±	0.057
1.74	±	0.025	0.22	±	0.054
1.53	±	0.025	0.21	±	0.054
1.29	±	0.016	0.20	±	0.047
1.09	±	0.021	0.19	±	0.051

Tabla No. 34: Continuación Tabla No. 33 para resultados granulométricos.

Volumen (mm ³)			diámetro equivalente (cm)		
1.06	±	0.018	0.19	±	0.048
1.02	±	0.014	0.19	±	0.045
0.98	±	0.019	0.18	±	0.049
0.51	±	0.009	0.15	±	0.038
0.36	±	0.007	0.13	±	0.035
0.27	±	0.006	0.12	±	0.033
0.26	±	0.006	0.12	±	0.033
0.20	±	0.005	0.11	±	0.031
0.16	±	0.004	0.10	±	0.029
0.14	±	0.004	0.10	±	0.029
0.12	±	0.003	0.09	±	0.028
0.09	±	0.003	0.08	±	0.026
0.09	±	0.003	0.08	±	0.026
2.592	±	2.160	0.227	±	0.084

Tabla No. 35: Densidad calculada de sal

densidad (g/L)		
1203	±	60
1196	±	59
1310	±	65
1286	±	64
1261	±	63
1156	±	57
1063	±	53
1060	±	53
1212	±	60
1206	±	60
1105	±	55
1187	±	84

Promedio

Tabla No. 36: Resumen de propiedades de sal utilizada

Propiedad	resultado
Porcentaje de NaCl	99.43%
Densidad	1187.5 \pm 84.2
Diámetro promedio de partícula	0.227 \pm 0.084 cm
Humedad de muestra	18.384 \pm 0.45%
Ángulo de reposo	27 \pm 1 °
Ángulo de fricción	31 \pm 1 °

Tabla No. 37: Promedio de velocidad de agitador magnético.

graduación de agitador	Promedio (rev/m)
4	149 \pm 1
6.0	276 \pm 1
8.0	551 \pm 1
10.0	1,106 \pm 1

Tabla No. 38: Regresión lineal de sal industrial 45°C.

masa libre de humedad (g)	C g/L	Vc (g/L) ^{0.5}
3.2174 \pm 0.0003	32.174 \pm 0.046	5.672 \pm 0.215
4.9037 \pm 0.0005	49.037 \pm 0.007	7.003 \pm 0.084
10.1715 \pm 0.0010	101.715 \pm 0.014	10.085 \pm 0.120
12.8314 \pm 0.0013	128.314 \pm 0.018	11.328 \pm 0.135
15.4686 \pm 0.0015	154.686 \pm 0.022	12.437 \pm 0.148
17.9596 \pm 0.0018	179.596 \pm 0.025	13.401 \pm 0.159
20.2633 \pm 0.0020	202.633 \pm 0.029	14.235 \pm 0.169
22.5339 \pm 0.0023	225.339 \pm 0.032	15.011 \pm 0.179
23.9770 \pm 0.0024	239.770 \pm 0.034	15.485 \pm 0.184
25.1542 \pm 0.0025	251.542 \pm 0.036	15.860 \pm 0.189
26.0130 \pm 0.0026	260.130 \pm 0.037	16.129 \pm 0.192
27.7812 \pm 0.0028	277.812 \pm 0.039	16.668 \pm 0.198
30.5811 \pm 0.0031	305.811 \pm 0.043	17.487 \pm 0.208

**Tabla No. 39: Análisis ANOVA regresión lineal conductividad contra concentración ^{0.5}.
En rango de 32.174 g/L a 251.542 g/L a 45°C.**

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.994792434	
R ² ajustado	0.994141489	
	<i>Coficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	2.722089405	0.253516578
Pendiente	0.04355572	0.00111417

$$\sqrt{c \left(\frac{g}{L} \right)} = (0.043556 \pm 0.0011141) * G \left(\frac{S}{cm} \right) + 2.7220894 \pm 0.2535166$$

Tabla No. 40: Regresión lineal de sal industrial 55°C.

masa libre de humedad (g)	C g/L	vc (g/L) ^{0.5}
3.1531 ± 0.0003	31.531 ± 0.045	5.615 ± 0.213
4.9037 ± 0.0005	49.037 ± 0.007	7.003 ± 0.084
10.0698 ± 0.0010	100.698 ± 0.014	10.035 ± 0.119
12.9597 ± 0.0013	129.597 ± 0.018	11.384 ± 0.135
15.6233 ± 0.0016	156.233 ± 0.022	12.499 ± 0.149
18.1392 ± 0.0018	181.392 ± 0.026	13.468 ± 0.160
19.8580 ± 0.0020	198.580 ± 0.028	14.092 ± 0.168
22.5339 ± 0.0023	225.339 ± 0.032	15.011 ± 0.179
23.9770 ± 0.0024	239.770 ± 0.034	15.485 ± 0.184
25.4057 ± 0.0025	254.057 ± 0.036	15.939 ± 0.190
25.4927 ± 0.0026	254.927 ± 0.036	15.966 ± 0.190
27.5034 ± 0.0028	275.034 ± 0.039	16.584 ± 0.197
30.2753 ± 0.0030	302.753 ± 0.043	17.400 ± 0.207

**Tabla No. 41 : Análisis ANOVA regresión lineal conductividad contra concentración^{0.5}.
En rango de 31.531 g/L a 260.130 g/L a 55°C.**

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.993746033	
R ² ajustado	0.993051148	
	<i>Coficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	2.619952934	0.274262817
Pendiente	0.04144173	0.001095864

$$\sqrt{c \left(\frac{g}{L} \right)} = (0.04144173 \pm 0.0010958) * G \left(\frac{S}{cm} \right) + 2.6199529 \pm 0.2742628$$

Tabla No. 42: Regresión lineal de sal industrial 55°C.

masa libre de humedad (g)	C g/L	\sqrt{c} (g/L) ^{0.5}
3.1852 ± 0.0003	31.85226 ± 0.0046	5.6438 ± 0.0677
4.9527 ± 0.0005	49.037 ± 0.0070	7.0026 ± 0.0836
10.3749 ± 0.0010	101.715 ± 0.0144	10.0854 ± 0.1200
12.5748 ± 0.0013	128.314 ± 0.0182	11.3276 ± 0.1348
15.4686 ± 0.0015	154.686 ± 0.0219	12.4373 ± 0.1480
17.9596 ± 0.0018	179.596 ± 0.0254	13.4013 ± 0.1594
20.2633 ± 0.0020	202.633 ± 0.0287	14.2349 ± 0.1693
22.9846 ± 0.0023	225.339 ± 0.0319	15.0113 ± 0.1785
24.2168 ± 0.0024	239.77 ± 0.0339	15.4845 ± 0.1842
25.6573 ± 0.0026	251.542 ± 0.0356	15.8601 ± 0.1886
26.0130 ± 0.0026	260.13 ± 0.0368	16.1285 ± 0.1918
27.7812 ± 0.0028	277.812 ± 0.0393	16.6677 ± 0.1982
30.5811 ± 0.0031	305.811 ± 0.0433	17.4875 ± 0.2080

**Tabla No. 43: Análisis ANOVA regresión lineal conductividad contra concentración^{0.5}.
En rango de 31.531 g/L a 260.130 g/L a 23°C.**

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.993163777	
R ² ajustado	0.992404197	
	<i>Coficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	2.715698331	0.285522
Pendiente	0.05832126	0.001613

$$\sqrt{c \left(\frac{g}{L} \right)} = (0.05832126 \pm 0.001613) * G \left(\frac{S}{cm} \right) + 2.715698 \pm 0.285522$$

Tabla No. 44: Comparación entre sal industrial utilizada y sal grado reactiva a 99.95%

<i>c (g/100 mL)</i>	<i>v_c (g/L)^{0.5}</i>	Conductividad (según regresión (S/cm)	Conductividad según medición (S/cm)	Variación
10.001 ± 0.001	10.000 ± 0.100	167.35 ± 2.29	149 ± 1	12.16% ± 0.19
15.004 ± 0.002	12.249 ± 0.123	218.71 ± 2.80	229 ± 1	4.49% ± 0.06
23.024 ± 0.002	15.174 ± 0.152	285.51 ± 3.46	261 ± 1	9.39% ± 0.12

8.68% ± 0.04 Promedio

Tabla No. 45: Análisis ANOVA – ln(1 – X_A) – t para una cinética de primer orden. Corrida No. 1 a 23 °C

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.994958925	
R ² ajustado	0.994913098	
Observaciones	112	
	<i>Coficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	-0.011631319	0.003478299
Pendiente	0.00679094	4.60885E-05

Tabla No. 46: Análisis ANOVA $\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt} - \log_{10} C_{NaCl}$. Corrida No. 1 a 23 °C.

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.997231394	
R ² ajustado	0.997192399	
Observaciones	73	
	<i>Coeficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	-2.212451108	0.000814752
Pendiente	-0.390142771	0.002439647

Tabla No. 47: Análisis ANOVA $-\ln(1 - X_A) - t$ para una cinética de primer orden. Corrida No. 2 a 55 °C.

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.997468659	
R ² ajustado	0.997448883	
Observaciones	130	
	<i>Coeficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	-0.119227386	0.004947318
Pendiente	0.013801968	6.14556E-05

Tabla No. 48: Análisis ANOVA $\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt} - \log_{10} C_{NaCl}$ al para una cinética de primer orden. Corrida No. 2 a 55 °C

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.999627623	
R ² ajustado	0.999619348	
Observaciones	47	
	<i>Coeficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	-2.256767822	0.000380605
Pendiente	-0.283545327	0.000815809

Tabla No. 49: Análisis ANOVA – $\ln(1 - X_A) - t$ para una cinética de primer orden. Corrida No. 4 a 45 °C

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.994312368	
R ² ajustado	0.994252498	
Observaciones	97	
	<i>Coeficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	-0.047436709	0.007451978
Pendiente	0.011577817	8.98399E-05

Tabla No. 50: Análisis ANOVA $\log_{10} \frac{dC_{NaCl}}{dt} t \log_{10} C_{NaCl}$ al para una cinética de primer orden. Corrida No. 4 a 45 °C.

<i>Estadística de regresión</i>		
R ²	0.998822497	
R ² ajustado	0.998791511	
Observaciones	40	
	<i>Coeficiente</i>	<i>Error estándar</i>
Intercepto	-2.209289569	0.000781951
Pendiente	-0.388744044	0.002165253

Tabla No. 51: Corrida No. 3 a 45°C para cinética de primer orden.

v_c (g/L) ^{0.5}	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
2.72 ± 0.26	7.41 ± 0.70	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
2.77 ± 0.26	7.65 ± 0.71	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
2.77 ± 0.26	7.65 ± 0.71	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
5.12 ± 0.26	26.19 ± 1.33	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01
5.29 ± 0.26	28.00 ± 1.38	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.01
5.68 ± 0.26	32.31 ± 1.48	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.01
5.60 ± 0.26	31.32 ± 1.46	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.01
5.73 ± 0.26	32.80 ± 1.49	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.01
9.60 ± 0.28	92.23 ± 2.65	0.38 ± 0.01	0.47 ± 0.01
9.82 ± 0.28	96.47 ± 2.71	0.39 ± 0.01	0.50 ± 0.01
9.91 ± 0.28	98.18 ± 2.75	0.40 ± 0.01	0.51 ± 0.01
10.08 ± 0.28	101.67 ± 2.82	0.41 ± 0.01	0.54 ± 0.02
10.00 ± 0.28	99.92 ± 2.78	0.41 ± 0.01	0.52 ± 0.01
10.13 ± 0.28	102.55 ± 2.83	0.42 ± 0.01	0.54 ± 0.02
10.21 ± 0.28	104.32 ± 2.85	0.43 ± 0.02	0.55 ± 0.02
10.34 ± 0.28	107.01 ± 2.90	0.44 ± 0.02	0.57 ± 0.02
10.43 ± 0.28	108.82 ± 2.94	0.44 ± 0.02	0.59 ± 0.02
10.48 ± 0.28	109.73 ± 2.95	0.45 ± 0.02	0.59 ± 0.02
10.65 ± 0.28	113.41 ± 3.01	0.46 ± 0.02	0.62 ± 0.02
10.78 ± 0.28	116.21 ± 3.05	0.47 ± 0.02	0.64 ± 0.02
10.78 ± 0.28	116.21 ± 3.06	0.47 ± 0.02	0.64 ± 0.02
11.04 ± 0.28	121.91 ± 3.14	0.50 ± 0.02	0.69 ± 0.02
11.13 ± 0.28	123.84 ± 3.17	0.51 ± 0.02	0.70 ± 0.02
11.26 ± 0.29	126.77 ± 3.22	0.52 ± 0.02	0.73 ± 0.02
11.48 ± 0.29	131.72 ± 3.28	0.54 ± 0.02	0.77 ± 0.02
11.48 ± 0.29	131.72 ± 3.29	0.54 ± 0.02	0.77 ± 0.02
11.69 ± 0.29	136.76 ± 3.35	0.56 ± 0.02	0.82 ± 0.02
11.69 ± 0.29	136.76 ± 3.36	0.56 ± 0.02	0.82 ± 0.02
11.83 ± 0.29	139.84 ± 3.42	0.57 ± 0.02	0.84 ± 0.02
11.96 ± 0.29	142.94 ± 3.46	0.58 ± 0.02	0.87 ± 0.02
12.09 ± 0.29	146.09 ± 3.50	0.60 ± 0.02	0.91 ± 0.02
12.17 ± 0.29	148.20 ± 3.57	0.60 ± 0.02	0.93 ± 0.02
12.22 ± 0.29	149.26 ± 3.55	0.61 ± 0.02	0.94 ± 0.02
12.30 ± 0.29	151.40 ± 3.58	0.62 ± 0.02	0.96 ± 0.02
13.00 ± 0.30	169.03 ± 3.85	0.69 ± 0.02	1.17 ± 0.02
13.04 ± 0.30	170.17 ± 3.89	0.69 ± 0.02	1.18 ± 0.02
13.13 ± 0.30	172.45 ± 3.90	0.70 ± 0.02	1.22 ± 0.02
13.00 ± 0.30	169.03 ± 3.85	0.69 ± 0.02	1.17 ± 0.02
13.04 ± 0.30	170.17 ± 3.88	0.69 ± 0.02	1.18 ± 0.02

Tabla No. 52: Continuación de Tabla No. 51.

v_c (g/L) ^{0.5}	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
13.13 ± 0.30	172.45 ± 3.91	0.70 ± 0.02	1.22 ± 0.02
13.13 ± 0.30	172.45 ± 3.93	0.70 ± 0.02	1.22 ± 0.02
13.18 ± 0.30	173.59 ± 3.94	0.71 ± 0.02	1.23 ± 0.02
13.26 ± 0.30	175.90 ± 3.97	0.72 ± 0.02	1.26 ± 0.02
13.35 ± 0.30	178.21 ± 4.01	0.73 ± 0.02	1.30 ± 0.02
13.48 ± 0.30	181.72 ± 4.05	0.74 ± 0.02	1.35 ± 0.02
14.74 ± 0.31	217.37 ± 4.52	0.89 ± 0.03	2.18 ± 0.03
14.79 ± 0.31	218.66 ± 4.54	0.89 ± 0.03	2.22 ± 0.03
14.74 ± 0.31	217.37 ± 4.54	0.89 ± 0.03	2.18 ± 0.03
14.87 ± 0.31	221.24 ± 4.62	0.90 ± 0.03	2.33 ± 0.03
14.92 ± 0.31	222.54 ± 4.61	0.91 ± 0.03	2.38 ± 0.03
14.92 ± 0.31	222.54 ± 4.63	0.91 ± 0.03	2.38 ± 0.03
14.96 ± 0.31	223.84 ± 4.66	0.91 ± 0.03	2.44 ± 0.03
14.96 ± 0.31	223.84 ± 4.67	0.91 ± 0.03	2.44 ± 0.03
14.96 ± 0.31	223.84 ± 4.69	0.91 ± 0.03	2.44 ± 0.03
15.00 ± 0.31	225.14 ± 4.72	0.92 ± 0.03	2.50 ± 0.03
15.00 ± 0.31	225.14 ± 4.69	0.92 ± 0.03	2.50 ± 0.03
15.14 ± 0.32	229.08 ± 4.78	0.93 ± 0.03	2.72 ± 0.03
15.18 ± 0.32	230.40 ± 4.80	0.94 ± 0.03	2.81 ± 0.03
15.09 ± 0.32	227.77 ± 4.78	0.93 ± 0.03	2.64 ± 0.03
15.31 ± 0.32	234.39 ± 4.85	0.96 ± 0.03	3.12 ± 0.03
15.35 ± 0.32	235.72 ± 4.88	0.96 ± 0.03	3.26 ± 0.03
15.40 ± 0.32	237.06 ± 4.93	0.97 ± 0.03	3.41 ± 0.03
15.44 ± 0.32	238.40 ± 4.94	0.97 ± 0.03	3.59 ± 0.03
15.48 ± 0.32	239.75 ± 4.95	0.98 ± 0.03	3.81 ± 0.03
15.53 ± 0.32	241.10 ± 4.99	0.98 ± 0.03	4.10 ± 0.03
15.53 ± 0.32	241.10 ± 5.01	0.98 ± 0.03	4.10 ± 0.03
15.57 ± 0.32	242.46 ± 5.04	0.99 ± 0.03	4.50 ± 0.03
15.61 ± 0.32	243.82 ± 5.04	0.99 ± 0.03	5.19 ± 0.03
15.61 ± 0.32	243.82 ± 5.06	0.99 ± 0.03	5.19 ± 0.03
15.66 ± 0.32	245.18 ± 5.09	1.00 ± 0.03	5.20 ± 0.03
15.57 ± 0.32	242.46 ± 5.06	0.99 ± 0.03	4.50 ± 0.03
15.57 ± 0.33	242.46 ± 5.07	0.99 ± 0.03	4.50 ± 0.03
15.66 ± 0.33	245.18 ± 5.10	1.00 ± 0.03	5.20 ± 0.03
15.66 ± 0.33	245.18 ± 5.10	1.00 ± 0.03	5.20 ± 0.03
15.57 ± 0.33	242.46 ± 5.08	0.99 ± 0.03	4.50 ± 0.03
15.66 ± 0.33	245.18 ± 5.12	1.00 ± 0.03	5.20 ± 0.03

Tabla No. 53: Datos calculados de la corrida No. 3 a 45°C para cinética de orden n.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
0.182 ± 0.007	5.506 ± 135.608	-0.741 ± 2.132	-0.870 ± 1.520
0.182 ± 0.008	5.491 ± 131.370	-0.740 ± 2.118	-0.884 ± 1.506
0.182 ± 0.008	5.491 ± 131.370	-0.740 ± 2.118	-0.884 ± 1.506
0.226 ± 0.026	4.420 ± 38.366	-0.645 ± 1.584	-1.418 ± 0.971
0.231 ± 0.028	4.327 ± 35.882	-0.636 ± 1.555	-1.447 ± 0.942
0.243 ± 0.032	4.114 ± 31.103	-0.614 ± 1.493	-1.509 ± 0.880
0.240 ± 0.031	4.162 ± 32.079	-0.619 ± 1.506	-1.496 ± 0.894
0.490 ± 0.092	2.041 ± 10.894	-0.310 ± 1.037	-1.965 ± 0.425
0.515 ± 0.096	1.942 ± 10.416	-0.288 ± 1.018	-1.984 ± 0.405
0.525 ± 0.098	1.903 ± 10.234	-0.280 ± 1.010	-1.992 ± 0.397
0.547 ± 0.101	1.827 ± 9.883	-0.262 ± 0.995	-2.007 ± 0.382
0.595 ± 0.108	1.681 ± 9.234	-0.226 ± 0.965	-2.037 ± 0.353
0.601 ± 0.109	1.663 ± 9.158	-0.221 ± 0.962	-2.040 ± 0.349
0.628 ± 0.113	1.593 ± 8.860	-0.202 ± 0.947	-2.055 ± 0.335
0.649 ± 0.116	1.542 ± 8.647	-0.188 ± 0.937	-2.065 ± 0.324
0.649 ± 0.116	1.542 ± 8.647	-0.188 ± 0.937	-2.065 ± 0.324
0.693 ± 0.121	1.442 ± 8.242	-0.159 ± 0.916	-2.086 ± 0.303
0.709 ± 0.123	1.410 ± 8.114	-0.149 ± 0.909	-2.093 ± 0.297
0.734 ± 0.126	1.362 ± 7.927	-0.134 ± 0.899	-2.103 ± 0.286
0.778 ± 0.131	1.286 ± 7.629	-0.109 ± 0.882	-2.120 ± 0.270
0.778 ± 0.131	1.286 ± 7.629	-0.109 ± 0.882	-2.120 ± 0.270
0.825 ± 0.136	1.212 ± 7.347	-0.083 ± 0.866	-2.136 ± 0.254
0.825 ± 0.136	1.212 ± 7.347	-0.083 ± 0.866	-2.136 ± 0.254
0.855 ± 0.139	1.169 ± 7.186	-0.068 ± 0.856	-2.146 ± 0.244
0.887 ± 0.142	1.127 ± 7.030	-0.052 ± 0.847	-2.155 ± 0.234
0.920 ± 0.145	1.087 ± 6.878	-0.036 ± 0.837	-2.165 ± 0.225
0.943 ± 0.147	1.060 ± 6.780	-0.025 ± 0.831	-2.171 ± 0.219
0.955 ± 0.149	1.047 ± 6.732	-0.020 ± 0.828	-2.174 ± 0.216
0.979 ± 0.151	1.021 ± 6.637	-0.009 ± 0.822	-2.180 ± 0.209
1.204 ± 0.168	0.831 ± 5.945	0.081 ± 0.774	-2.228 ± 0.162
1.220 ± 0.169	0.820 ± 5.905	0.086 ± 0.771	-2.231 ± 0.159
1.253 ± 0.172	0.798 ± 5.827	0.098 ± 0.765	-2.237 ± 0.153
1.204 ± 0.168	0.831 ± 5.945	0.081 ± 0.774	-2.228 ± 0.162
1.220 ± 0.169	0.820 ± 5.905	0.086 ± 0.771	-2.231 ± 0.159
1.236 ± 0.170	0.809 ± 5.866	0.092 ± 0.768	-2.234 ± 0.156
1.253 ± 0.172	0.798 ± 5.827	0.098 ± 0.765	-2.237 ± 0.153
1.253 ± 0.172	0.798 ± 5.827	0.098 ± 0.765	-2.237 ± 0.153
1.270 ± 0.173	0.788 ± 5.788	0.104 ± 0.763	-2.240 ± 0.150
1.304 ± 0.175	0.767 ± 5.713	0.115 ± 0.757	-2.245 ± 0.144

Tabla No. 54: Continuación de Tabla No. 53: Datos calculados de la corrida No. 3 a 45°C para cinética de orden n.. 51.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
1.340 ± 0.177	0.746 ± 5.638	0.127 ± 0.751	-2.251 ± 0.139
1.396 ± 0.181	0.716 ± 5.530	0.145 ± 0.743	-2.259 ± 0.130
2.119 ± 0.216	0.472 ± 4.623	0.326 ± 0.665	-2.337 ± 0.052
2.151 ± 0.218	0.465 ± 4.595	0.333 ± 0.662	-2.340 ± 0.050
2.119 ± 0.216	0.472 ± 4.623	0.326 ± 0.665	-2.337 ± 0.052
2.217 ± 0.220	0.451 ± 4.542	0.346 ± 0.657	-2.345 ± 0.045
2.251 ± 0.221	0.444 ± 4.515	0.352 ± 0.655	-2.347 ± 0.042
2.251 ± 0.221	0.444 ± 4.515	0.352 ± 0.655	-2.347 ± 0.042
2.286 ± 0.223	0.438 ± 4.489	0.359 ± 0.652	-2.350 ± 0.040
2.286 ± 0.223	0.438 ± 4.489	0.359 ± 0.652	-2.350 ± 0.040
2.286 ± 0.223	0.438 ± 4.489	0.359 ± 0.652	-2.350 ± 0.040
2.321 ± 0.224	0.431 ± 4.463	0.366 ± 0.650	-2.352 ± 0.037
2.321 ± 0.224	0.431 ± 4.463	0.366 ± 0.650	-2.352 ± 0.037
2.430 ± 0.228	0.411 ± 4.386	0.386 ± 0.642	-2.360 ± 0.029
2.468 ± 0.229	0.405 ± 4.361	0.392 ± 0.640	-2.362 ± 0.027
2.393 ± 0.227	0.418 ± 4.412	0.379 ± 0.645	-2.357 ± 0.032
2.586 ± 0.233	0.387 ± 4.287	0.413 ± 0.632	-2.370 ± 0.020
2.627 ± 0.235	0.381 ± 4.263	0.419 ± 0.630	-2.372 ± 0.017
2.668 ± 0.236	0.375 ± 4.239	0.426 ± 0.627	-2.375 ± 0.015
2.710 ± 0.237	0.369 ± 4.215	0.433 ± 0.625	-2.377 ± 0.012
2.753 ± 0.239	0.363 ± 4.191	0.440 ± 0.622	-2.380 ± 0.010
2.797 ± 0.240	0.357 ± 4.168	0.447 ± 0.620	-2.382 ± 0.007
2.797 ± 0.240	0.357 ± 4.168	0.447 ± 0.620	-2.382 ± 0.007
2.842 ± 0.241	0.352 ± 4.144	0.454 ± 0.617	-2.385 ± 0.005
2.888 ± 0.243	0.346 ± 4.121	0.461 ± 0.615	-2.387 ± 0.002
2.888 ± 0.243	0.346 ± 4.121	0.461 ± 0.615	-2.387 ± 0.002
2.934 ± 0.244	0.341 ± 4.098	0.467 ± 0.613	-2.389 ± 0.005
2.842 ± 0.241	0.352 ± 4.144	0.454 ± 0.617	-2.385 ± 0.005
2.842 ± 0.241	0.352 ± 4.144	0.454 ± 0.617	-2.385 ± 0.005
2.934 ± 0.244	0.341 ± 4.098	0.467 ± 0.613	-2.389 ± 0.005
2.934 ± 0.244	0.341 ± 4.098	0.467 ± 0.613	-2.389 ± 0.005
2.842 ± 0.241	0.352 ± 4.144	0.454 ± 0.617	-2.385 ± 0.005
2.934 ± 0.244	0.341 ± 4.098	0.467 ± 0.613	-2.389 ± 0.005
2.842 ± 0.241	0.352 ± 4.144	0.454 ± 0.617	-2.385 ± 0.005
2.934 ± 0.244	0.341 ± 4.098	0.467 ± 0.613	-2.389 ± 0.005
2.888 ± 0.243	0.346 ± 4.121	0.461 ± 0.615	-2.387 ± 0.002

Tabla No. 55: Corrida No. 4 a 45°C para cinética de primer orden.

v_c (g/L) ^{0.5}	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
2.72 ± 0.26	7.41 ± 0.70	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
2.77 ± 0.26	7.65 ± 0.71	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
2.72 ± 0.26	7.41 ± 0.70	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
5.03 ± 0.26	25.31 ± 1.30	0.10 ± 0.01	0.11 ± 0.01
5.25 ± 0.26	27.54 ± 1.36	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.01
5.68 ± 0.26	32.31 ± 1.48	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.01
5.55 ± 0.26	30.84 ± 1.45	0.12 ± 0.01	0.13 ± 0.01
5.68 ± 0.26	32.31 ± 1.48	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.01
9.69 ± 0.28	93.92 ± 2.67	0.38 ± 0.01	0.48 ± 0.01
9.91 ± 0.28	98.18 ± 2.73	0.40 ± 0.01	0.50 ± 0.01
9.95 ± 0.28	99.05 ± 2.76	0.40 ± 0.01	0.51 ± 0.01
10.08 ± 0.28	101.67 ± 2.82	0.41 ± 0.01	0.53 ± 0.01
10.00 ± 0.28	99.92 ± 2.78	0.40 ± 0.01	0.52 ± 0.01
10.08 ± 0.28	101.67 ± 2.81	0.41 ± 0.01	0.53 ± 0.01
10.21 ± 0.28	104.32 ± 2.85	0.42 ± 0.01	0.55 ± 0.02
10.34 ± 0.28	107.01 ± 2.90	0.43 ± 0.02	0.56 ± 0.02
10.52 ± 0.28	110.64 ± 2.96	0.45 ± 0.02	0.59 ± 0.02
10.43 ± 0.28	108.82 ± 2.94	0.44 ± 0.02	0.58 ± 0.02
10.74 ± 0.28	115.27 ± 3.03	0.46 ± 0.02	0.63 ± 0.02
10.87 ± 0.28	118.09 ± 3.08	0.48 ± 0.02	0.65 ± 0.02
10.78 ± 0.28	116.21 ± 3.06	0.47 ± 0.02	0.63 ± 0.02
11.08 ± 0.28	122.87 ± 3.15	0.50 ± 0.02	0.68 ± 0.02
11.04 ± 0.28	121.91 ± 3.15	0.49 ± 0.02	0.68 ± 0.02
11.22 ± 0.29	125.79 ± 3.21	0.51 ± 0.02	0.71 ± 0.02
11.48 ± 0.29	131.72 ± 3.28	0.53 ± 0.02	0.76 ± 0.02
11.56 ± 0.29	133.72 ± 3.31	0.54 ± 0.02	0.78 ± 0.02
11.74 ± 0.29	137.78 ± 3.37	0.56 ± 0.02	0.81 ± 0.02
11.69 ± 0.29	136.76 ± 3.36	0.55 ± 0.02	0.80 ± 0.02
11.74 ± 0.29	137.78 ± 3.39	0.56 ± 0.02	0.81 ± 0.02
12.00 ± 0.29	143.99 ± 3.47	0.58 ± 0.02	0.87 ± 0.02
12.04 ± 0.29	145.03 ± 3.49	0.59 ± 0.02	0.88 ± 0.02
12.22 ± 0.29	149.26 ± 3.58	0.60 ± 0.02	0.92 ± 0.02
12.30 ± 0.29	151.40 ± 3.58	0.61 ± 0.02	0.94 ± 0.02
12.26 ± 0.29	150.33 ± 3.57	0.61 ± 0.02	0.93 ± 0.02
13.04 ± 0.30	170.17 ± 3.86	0.69 ± 0.02	1.16 ± 0.02
13.26 ± 0.30	175.90 ± 3.96	0.71 ± 0.02	1.24 ± 0.02
13.26 ± 0.30	175.90 ± 3.94	0.71 ± 0.02	1.24 ± 0.02

Tabla No. 56: Continuación de Tabla No. 55.

v_c (g/L) ^{0.5}	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
13.26 ± 0.30	175.90 ± 3.93	0.71 ± 0.02	1.24 ± 0.02
13.39 ± 0.30	179.38 ± 3.98	0.72 ± 0.02	1.29 ± 0.02
13.39 ± 0.30	179.38 ± 3.98	0.72 ± 0.02	1.29 ± 0.02
13.48 ± 0.30	181.72 ± 4.02	0.73 ± 0.02	1.32 ± 0.02
13.48 ± 0.30	181.72 ± 4.03	0.73 ± 0.02	1.32 ± 0.02
13.48 ± 0.30	181.72 ± 4.03	0.73 ± 0.02	1.32 ± 0.02
13.57 ± 0.30	184.08 ± 4.07	0.74 ± 0.02	1.36 ± 0.02
13.57 ± 0.30	184.08 ± 4.07	0.74 ± 0.02	1.36 ± 0.02
13.65 ± 0.30	186.45 ± 4.10	0.75 ± 0.02	1.39 ± 0.02
14.87 ± 0.31	221.24 ± 4.56	0.89 ± 0.03	2.23 ± 0.03
14.87 ± 0.31	221.24 ± 4.57	0.89 ± 0.03	2.23 ± 0.03
14.83 ± 0.31	219.95 ± 4.57	0.89 ± 0.03	2.18 ± 0.03
14.87 ± 0.31	221.24 ± 4.62	0.89 ± 0.03	2.23 ± 0.03
15.05 ± 0.31	226.45 ± 4.65	0.91 ± 0.03	2.45 ± 0.03
15.14 ± 0.31	229.08 ± 4.70	0.92 ± 0.03	2.58 ± 0.03
15.18 ± 0.31	230.40 ± 4.73	0.93 ± 0.03	2.65 ± 0.03
15.18 ± 0.31	230.40 ± 4.74	0.93 ± 0.03	2.65 ± 0.03
15.22 ± 0.31	231.73 ± 4.77	0.93 ± 0.03	2.73 ± 0.03
15.31 ± 0.31	234.39 ± 4.81	0.95 ± 0.03	2.91 ± 0.03
15.31 ± 0.31	234.39 ± 4.78	0.95 ± 0.03	2.91 ± 0.03
15.31 ± 0.32	234.39 ± 4.83	0.95 ± 0.03	2.91 ± 0.03
15.35 ± 0.32	235.72 ± 4.85	0.95 ± 0.03	3.01 ± 0.03
15.35 ± 0.32	235.72 ± 4.86	0.95 ± 0.03	3.01 ± 0.03
15.35 ± 0.32	235.72 ± 4.86	0.95 ± 0.03	3.01 ± 0.03
15.40 ± 0.32	237.06 ± 4.90	0.96 ± 0.03	3.13 ± 0.03
15.53 ± 0.32	241.10 ± 4.97	0.97 ± 0.03	3.59 ± 0.03
15.48 ± 0.32	239.75 ± 4.96	0.97 ± 0.03	3.41 ± 0.03
15.53 ± 0.32	241.10 ± 4.96	0.97 ± 0.03	3.59 ± 0.03
15.61 ± 0.32	243.82 ± 5.02	0.98 ± 0.03	4.10 ± 0.03
15.66 ± 0.32	245.18 ± 5.05	0.99 ± 0.03	4.51 ± 0.03
15.70 ± 0.32	246.54 ± 5.08	0.99 ± 0.03	5.20 ± 0.03
15.75 ± 0.32	247.91 ± 5.08	1.00 ± 0.03	5.20 ± 0.03

Tabla No. 57: Corrida No. 4 a 45°C para cinética de orden n.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
0.182 ± 0.007	5.506 ± 137.121	-0.741 ± 2.137	-0.870 ± 1.524
0.182 ± 0.008	5.491 ± 132.836	-0.740 ± 2.123	-0.884 ± 1.511
0.182 ± 0.007	5.506 ± 137.121	-0.741 ± 2.137	-0.870 ± 1.524
0.224 ± 0.025	4.466 ± 40.149	-0.650 ± 1.604	-1.403 ± 0.991
0.230 ± 0.027	4.350 ± 36.887	-0.639 ± 1.567	-1.440 ± 0.954
0.243 ± 0.032	4.114 ± 31.450	-0.614 ± 1.498	-1.509 ± 0.885
0.239 ± 0.030	4.186 ± 32.947	-0.622 ± 1.518	-1.489 ± 0.905
0.243 ± 0.032	4.114 ± 31.450	-0.614 ± 1.498	-1.509 ± 0.885
0.500 ± 0.092	2.001 ± 10.819	-0.301 ± 1.034	-1.973 ± 0.422
0.525 ± 0.097	1.903 ± 10.348	-0.280 ± 1.015	-1.992 ± 0.402
0.531 ± 0.097	1.884 ± 10.258	-0.275 ± 1.011	-1.996 ± 0.398
0.547 ± 0.100	1.827 ± 9.994	-0.262 ± 1.000	-2.007 ± 0.387
0.536 ± 0.098	1.865 ± 10.169	-0.271 ± 1.007	-2.000 ± 0.395
0.547 ± 0.100	1.827 ± 9.994	-0.262 ± 1.000	-2.007 ± 0.387
0.564 ± 0.103	1.772 ± 9.740	-0.248 ± 0.989	-2.018 ± 0.376
0.582 ± 0.105	1.717 ± 9.495	-0.235 ± 0.978	-2.029 ± 0.365
0.608 ± 0.109	1.645 ± 9.183	-0.216 ± 0.963	-2.044 ± 0.350
0.595 ± 0.107	1.681 ± 9.337	-0.226 ± 0.970	-2.037 ± 0.358
0.642 ± 0.113	1.559 ± 8.814	-0.193 ± 0.945	-2.062 ± 0.333
0.663 ± 0.116	1.508 ± 8.604	-0.178 ± 0.935	-2.072 ± 0.322
0.649 ± 0.114	1.542 ± 8.743	-0.188 ± 0.942	-2.065 ± 0.329
0.701 ± 0.121	1.426 ± 8.269	-0.154 ± 0.917	-2.089 ± 0.305
0.693 ± 0.120	1.442 ± 8.334	-0.159 ± 0.921	-2.086 ± 0.308
0.726 ± 0.124	1.378 ± 8.077	-0.139 ± 0.907	-2.100 ± 0.295
0.778 ± 0.130	1.286 ± 7.714	-0.109 ± 0.887	-2.120 ± 0.275
0.796 ± 0.132	1.256 ± 7.598	-0.099 ± 0.881	-2.126 ± 0.268
0.835 ± 0.136	1.198 ± 7.374	-0.078 ± 0.868	-2.139 ± 0.255
0.825 ± 0.135	1.212 ± 7.429	-0.083 ± 0.871	-2.136 ± 0.258
0.835 ± 0.136	1.198 ± 7.374	-0.078 ± 0.868	-2.139 ± 0.255
0.898 ± 0.142	1.114 ± 7.056	-0.047 ± 0.849	-2.158 ± 0.236
0.909 ± 0.143	1.100 ± 7.005	-0.041 ± 0.845	-2.161 ± 0.233
0.955 ± 0.147	1.047 ± 6.807	-0.020 ± 0.833	-2.174 ± 0.220
0.979 ± 0.149	1.021 ± 6.711	-0.009 ± 0.827	-2.180 ± 0.214
0.967 ± 0.148	1.034 ± 6.759	-0.015 ± 0.830	-2.177 ± 0.217
1.220 ± 0.167	0.820 ± 5.971	0.086 ± 0.776	-2.231 ± 0.163
1.304 ± 0.173	0.767 ± 5.776	0.115 ± 0.762	-2.245 ± 0.149
1.304 ± 0.173	0.767 ± 5.776	0.115 ± 0.762	-2.245 ± 0.149
1.304 ± 0.173	0.767 ± 5.776	0.115 ± 0.762	-2.245 ± 0.149

Tabla No. 58: Continuación de Tabla No. 57

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
1.359 ± 0.177	0.736 ± 5.664	0.133 ± 0.753	-2.254 ± 0.141
1.359 ± 0.177	0.736 ± 5.664	0.133 ± 0.753	-2.254 ± 0.141
1.396 ± 0.179	0.716 ± 5.591	0.145 ± 0.748	-2.259 ± 0.135
1.396 ± 0.179	0.716 ± 5.591	0.145 ± 0.748	-2.259 ± 0.135
1.396 ± 0.179	0.716 ± 5.591	0.145 ± 0.748	-2.259 ± 0.135
1.435 ± 0.181	0.697 ± 5.520	0.157 ± 0.742	-2.265 ± 0.129
1.435 ± 0.181	0.697 ± 5.520	0.157 ± 0.742	-2.265 ± 0.129
1.476 ± 0.184	0.678 ± 5.449	0.169 ± 0.736	-2.271 ± 0.124
2.217 ± 0.218	0.451 ± 4.592	0.346 ± 0.662	-2.345 ± 0.049
2.217 ± 0.218	0.451 ± 4.592	0.346 ± 0.662	-2.345 ± 0.049
2.184 ± 0.216	0.458 ± 4.619	0.339 ± 0.665	-2.342 ± 0.052
2.217 ± 0.218	0.451 ± 4.592	0.346 ± 0.662	-2.345 ± 0.049
2.357 ± 0.223	0.424 ± 4.487	0.372 ± 0.652	-2.355 ± 0.039
2.430 ± 0.225	0.411 ± 4.435	0.386 ± 0.647	-2.360 ± 0.034
2.468 ± 0.227	0.405 ± 4.410	0.392 ± 0.644	-2.362 ± 0.032
2.468 ± 0.227	0.405 ± 4.410	0.392 ± 0.644	-2.362 ± 0.032
2.507 ± 0.228	0.399 ± 4.385	0.399 ± 0.642	-2.365 ± 0.029
2.586 ± 0.231	0.387 ± 4.335	0.413 ± 0.637	-2.370 ± 0.024
2.586 ± 0.231	0.387 ± 4.335	0.413 ± 0.637	-2.370 ± 0.024
2.586 ± 0.231	0.387 ± 4.335	0.413 ± 0.637	-2.370 ± 0.024
2.627 ± 0.232	0.381 ± 4.310	0.419 ± 0.635	-2.372 ± 0.022
2.627 ± 0.232	0.381 ± 4.310	0.419 ± 0.635	-2.372 ± 0.022
2.627 ± 0.232	0.381 ± 4.310	0.419 ± 0.635	-2.372 ± 0.022
2.668 ± 0.233	0.375 ± 4.286	0.426 ± 0.632	-2.375 ± 0.019
2.797 ± 0.237	0.357 ± 4.214	0.447 ± 0.625	-2.382 ± 0.012
2.753 ± 0.236	0.363 ± 4.238	0.440 ± 0.627	-2.380 ± 0.015
2.797 ± 0.237	0.357 ± 4.214	0.447 ± 0.625	-2.382 ± 0.012
2.888 ± 0.240	0.346 ± 4.167	0.461 ± 0.620	-2.387 ± 0.007
2.934 ± 0.241	0.341 ± 4.144	0.467 ± 0.617	-2.389 ± 0.005
2.981 ± 0.243	0.335 ± 4.121	0.474 ± 0.615	-2.392 ± 0.002
3.029 ± 0.244	0.330 ± 4.098	0.481 ± 0.613	-2.394 ± -

Tabla No. 59: Corrida No. 1 a 23°C para cinética de primer orden.

$\sqrt{c} \text{ (g/L)}^{0.5}$	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
2.77 ± 0.26	7.70 ± 0.71	3.14% ± 0.30%	0.032 ± 0.003
2.86 ± 0.26	8.16 ± 0.73	3.33% ± 0.31%	0.034 ± 0.003
2.92 ± 0.26	8.50 ± 0.75	3.47% ± 0.32%	0.035 ± 0.003
4.48 ± 0.26	20.06 ± 1.16	8.19% ± 0.51%	0.085 ± 0.005
4.71 ± 0.26	22.18 ± 1.22	9.05% ± 0.54%	0.095 ± 0.005
4.83 ± 0.26	23.29 ± 1.26	9.50% ± 0.56%	0.100 ± 0.006
9.28 ± 0.29	86.19 ± 2.66	35.18% ± 1.35%	0.434 ± 0.014
9.34 ± 0.29	87.27 ± 2.68	35.62% ± 1.36%	0.440 ± 0.014
9.40 ± 0.29	88.36 ± 2.70	36.06% ± 1.38%	0.447 ± 0.014
9.57 ± 0.29	91.65 ± 2.77	37.41% ± 1.42%	0.469 ± 0.014
9.63 ± 0.29	92.77 ± 2.79	37.86% ± 1.43%	0.476 ± 0.014
9.69 ± 0.29	93.88 ± 2.81	38.32% ± 1.44%	0.483 ± 0.015
10.44 ± 0.30	109.04 ± 3.10	44.50% ± 1.62%	0.589 ± 0.016
10.38 ± 0.30	107.83 ± 3.08	44.01% ± 1.61%	0.580 ± 0.016
10.50 ± 0.30	110.25 ± 3.12	45.00% ± 1.64%	0.598 ± 0.017
11.43 ± 0.31	130.56 ± 3.51	53.29% ± 1.88%	0.761 ± 0.019
11.48 ± 0.31	131.89 ± 3.53	53.83% ± 1.89%	0.773 ± 0.019
11.54 ± 0.31	133.22 ± 3.55	54.37% ± 1.91%	0.785 ± 0.019
11.77 ± 0.31	138.62 ± 3.66	56.58% ± 1.97%	0.834 ± 0.020
11.66 ± 0.31	135.91 ± 3.60	55.47% ± 1.94%	0.809 ± 0.020
11.77 ± 0.31	138.62 ± 3.66	56.58% ± 1.97%	0.834 ± 0.020
11.89 ± 0.31	141.36 ± 3.71	57.69% ± 2.01%	0.860 ± 0.020
13.57 ± 0.33	184.11 ± 4.49	75.14% ± 2.51%	1.392 ± 0.025
13.57 ± 0.33	184.11 ± 4.49	75.14% ± 2.51%	1.392 ± 0.025
13.63 ± 0.33	185.68 ± 4.52	75.78% ± 2.53%	1.418 ± 0.026
13.74 ± 0.33	188.85 ± 4.58	77.08% ± 2.57%	1.473 ± 0.026
13.74 ± 0.33	188.85 ± 4.58	77.08% ± 2.57%	1.473 ± 0.026
13.74 ± 0.33	188.85 ± 4.58	77.08% ± 2.57%	1.473 ± 0.026
13.80 ± 0.33	190.45 ± 4.61	77.73% ± 2.59%	1.502 ± 0.026
13.86 ± 0.33	192.05 ± 4.64	78.38% ± 2.61%	1.532 ± 0.026
13.86 ± 0.33	192.05 ± 4.64	78.38% ± 2.61%	1.532 ± 0.026
13.86 ± 0.33	192.05 ± 4.64	78.38% ± 2.61%	1.532 ± 0.026
14.09 ± 0.34	198.52 ± 4.75	81.02% ± 2.68%	1.662 ± 0.027
14.15 ± 0.34	200.16 ± 4.78	81.69% ± 2.70%	1.698 ± 0.027
14.15 ± 0.34	200.16 ± 4.78	81.69% ± 2.70%	1.698 ± 0.027
14.21 ± 0.34	201.80 ± 4.81	82.36% ± 2.72%	1.735 ± 0.028
14.21 ± 0.34	201.80 ± 4.81	82.36% ± 2.72%	1.735 ± 0.028
14.26 ± 0.34	203.45 ± 4.84	83.03% ± 2.74%	1.774 ± 0.028

Tabla No. 60: Continuación de Tabla No. 59.

$\sqrt{c} \text{ (g/L)}^{0.5}$	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
14.32 ± 0.34	205.10 ± 4.87	83.71% ± 2.76%	1.815 ± 0.028
14.32 ± 0.34	205.10 ± 4.87	83.71% ± 2.76%	1.815 ± 0.028
14.32 ± 0.34	205.10 ± 4.87	83.71% ± 2.76%	1.815 ± 0.028
14.38 ± 0.34	206.76 ± 4.90	84.39% ± 2.78%	1.857 ± 0.028
14.44 ± 0.34	208.43 ± 4.93	85.07% ± 2.80%	1.902 ± 0.028
14.50 ± 0.34	210.11 ± 4.96	85.75% ± 2.82%	1.949 ± 0.029
14.55 ± 0.34	211.79 ± 5.00	86.44% ± 2.84%	1.998 ± 0.029
14.73 ± 0.35	216.88 ± 5.09	88.51% ± 2.90%	2.164 ± 0.029
14.73 ± 0.35	216.88 ± 5.09	88.51% ± 2.90%	2.164 ± 0.029
14.78 ± 0.35	218.58 ± 5.12	89.21% ± 2.92%	2.227 ± 0.030
14.78 ± 0.35	218.58 ± 5.12	89.21% ± 2.92%	2.227 ± 0.030
15.02 ± 0.35	225.49 ± 5.24	92.03% ± 3.00%	2.529 ± 0.030
15.07 ± 0.35	227.23 ± 5.28	92.74% ± 3.02%	2.623 ± 0.031
15.25 ± 0.35	232.50 ± 5.37	94.89% ± 3.08%	2.974 ± 0.031
15.25 ± 0.35	232.50 ± 5.37	94.89% ± 3.08%	2.974 ± 0.031
15.25 ± 0.35	232.50 ± 5.37	94.89% ± 3.08%	2.974 ± 0.031
15.36 ± 0.35	236.04 ± 5.44	96.34% ± 3.12%	3.306 ± 0.032
15.36 ± 0.35	236.04 ± 5.44	96.34% ± 3.12%	3.306 ± 0.032
15.36 ± 0.35	236.04 ± 5.44	96.34% ± 3.12%	3.306 ± 0.032
15.36 ± 0.35	236.04 ± 5.44	96.34% ± 3.12%	3.306 ± 0.032
15.42 ± 0.35	237.82 ± 5.47	97.06% ± 3.15%	3.528 ± 0.032
15.42 ± 0.35	237.82 ± 5.47	97.06% ± 3.15%	3.528 ± 0.032
15.42 ± 0.35	237.82 ± 5.47	97.06% ± 3.15%	3.528 ± 0.032
15.48 ± 0.36	239.61 ± 5.50	97.79% ± 3.17%	3.814 ± 0.032
15.48 ± 0.36	239.61 ± 5.50	97.79% ± 3.17%	3.814 ± 0.032
15.54 ± 0.36	241.41 ± 5.53	98.53% ± 3.19%	4.217 ± 0.032
15.54 ± 0.36	241.41 ± 5.53	98.53% ± 3.19%	4.217 ± 0.032
15.60 ± 0.36	243.21 ± 5.57	99.26% ± 3.21%	4.908 ± 0.033
15.65 ± 0.36	245.02 ± 5.60	100.00% ± 3.23%	4.908 ± 0.033
15.65 ± 0.36	245.02 ± 5.60	100.00% ± 3.23%	4.908 ± 0.033

Tabla No. 61: Corrida No. 1 a 23°C para cinética de orden n.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
0.024 ± 0.861	42.203 ± 1.161	-1.625 ± 0.065	-2.120 ± 0.548
0.056 ± 0.867	17.785 ± 1.153	-1.250 ± 0.062	-2.125 ± 0.551
0.188 ± 0.892	5.320 ± 1.121	-0.726 ± 0.050	-2.142 ± 0.563
0.122 ± 0.880	8.212 ± 1.137	-0.914 ± 0.056	-2.133 ± 0.557
0.188 ± 0.892	5.320 ± 1.121	-0.726 ± 0.050	-2.142 ± 0.563
0.255 ± 0.904	3.924 ± 1.106	-0.594 ± 0.044	-2.150 ± 0.569
1.298 ± 1.096	0.770 ± 0.912	0.113 ± 0.040	-2.265 ± 0.652
1.298 ± 1.096	0.770 ± 0.912	0.113 ± 0.040	-2.265 ± 0.652
1.336 ± 1.103	0.748 ± 0.907	0.126 ± 0.043	-2.269 ± 0.655
1.414 ± 1.117	0.707 ± 0.895	0.150 ± 0.048	-2.276 ± 0.661
1.414 ± 1.117	0.707 ± 0.895	0.150 ± 0.048	-2.276 ± 0.661
1.414 ± 1.117	0.707 ± 0.895	0.150 ± 0.048	-2.276 ± 0.661
1.453 ± 1.124	0.688 ± 0.890	0.162 ± 0.051	-2.280 ± 0.663
1.492 ± 1.131	0.670 ± 0.884	0.174 ± 0.054	-2.283 ± 0.666
1.492 ± 1.131	0.670 ± 0.884	0.174 ± 0.054	-2.283 ± 0.666
1.492 ± 1.131	0.670 ± 0.884	0.174 ± 0.054	-2.283 ± 0.666
1.650 ± 1.160	0.606 ± 0.862	0.217 ± 0.064	-2.298 ± 0.677
1.689 ± 1.167	0.592 ± 0.857	0.228 ± 0.067	-2.301 ± 0.680
1.689 ± 1.167	0.592 ± 0.857	0.228 ± 0.067	-2.301 ± 0.680
1.729 ± 1.175	0.578 ± 0.851	0.238 ± 0.070	-2.305 ± 0.682
1.729 ± 1.175	0.578 ± 0.851	0.238 ± 0.070	-2.305 ± 0.682
1.770 ± 1.182	0.565 ± 0.846	0.248 ± 0.073	-2.308 ± 0.685
1.810 ± 1.189	0.552 ± 0.841	0.258 ± 0.075	-2.312 ± 0.688
1.810 ± 1.189	0.552 ± 0.841	0.258 ± 0.075	-2.312 ± 0.688
1.810 ± 1.189	0.552 ± 0.841	0.258 ± 0.075	-2.312 ± 0.688
1.851 ± 1.197	0.540 ± 0.836	0.267 ± 0.078	-2.315 ± 0.691
1.891 ± 1.204	0.529 ± 0.831	0.277 ± 0.081	-2.319 ± 0.693
1.932 ± 1.211	0.518 ± 0.825	0.286 ± 0.083	-2.322 ± 0.696
1.973 ± 1.219	0.507 ± 0.820	0.295 ± 0.086	-2.326 ± 0.699

Tabla No. 62: Continuación de Tabla No. 61.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
2.097 ± 1.241	0.477 ± 0.806	0.322 ± 0.094	-2.336 ± 0.707
2.097 ± 1.241	0.477 ± 0.806	0.322 ± 0.094	-2.336 ± 0.707
2.139 ± 1.249	0.467 ± 0.801	0.330 ± 0.097	-2.340 ± 0.709
2.139 ± 1.249	0.467 ± 0.801	0.330 ± 0.097	-2.340 ± 0.709
2.307 ± 1.280	0.433 ± 0.782	0.363 ± 0.107	-2.353 ± 0.720
2.350 ± 1.287	0.426 ± 0.777	0.371 ± 0.110	-2.356 ± 0.722
2.478 ± 1.311	0.403 ± 0.763	0.394 ± 0.117	-2.366 ± 0.730
2.478 ± 1.311	0.403 ± 0.763	0.394 ± 0.117	-2.366 ± 0.730
2.478 ± 1.311	0.403 ± 0.763	0.394 ± 0.117	-2.366 ± 0.730
2.565 ± 1.326	0.390 ± 0.754	0.409 ± 0.123	-2.373 ± 0.735
2.565 ± 1.326	0.390 ± 0.754	0.409 ± 0.123	-2.373 ± 0.735
2.565 ± 1.326	0.390 ± 0.754	0.409 ± 0.123	-2.373 ± 0.735
2.565 ± 1.326	0.390 ± 0.754	0.409 ± 0.123	-2.373 ± 0.735
2.608 ± 1.334	0.383 ± 0.750	0.416 ± 0.125	-2.376 ± 0.738
2.608 ± 1.334	0.383 ± 0.750	0.416 ± 0.125	-2.376 ± 0.738
2.608 ± 1.334	0.383 ± 0.750	0.416 ± 0.125	-2.376 ± 0.738
2.652 ± 1.342	0.377 ± 0.745	0.424 ± 0.128	-2.380 ± 0.740
2.652 ± 1.342	0.377 ± 0.745	0.424 ± 0.128	-2.380 ± 0.740
2.696 ± 1.350	0.371 ± 0.741	0.431 ± 0.130	-2.383 ± 0.743
2.696 ± 1.350	0.371 ± 0.741	0.431 ± 0.130	-2.383 ± 0.743
2.740 ± 1.358	0.365 ± 0.736	0.438 ± 0.133	-2.386 ± 0.745
2.784 ± 1.366	0.359 ± 0.732	0.445 ± 0.135	-2.389 ± 0.748
2.784 ± 1.366	0.359 ± 0.732	0.445 ± 0.135	-2.389 ± 0.748

Tabla No. 63: Corrida No. 2 a 55°C para cinética de primer orden.

v_c (g/L) ^{0.5}	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
2.79 ± 0.26	7.79 ± 0.72	0.030 ± 0.00	0.031 ± 0.00
2.83 ± 0.26	8.03 ± 0.73	0.031 ± 0.00	0.032 ± 0.00
2.87 ± 0.26	8.26 ± 0.74	0.032 ± 0.00	0.033 ± 0.00
4.79 ± 0.26	22.93 ± 1.24	0.089 ± 0.01	0.094 ± 0.01
5.16 ± 0.26	26.65 ± 1.34	0.104 ± 0.01	0.110 ± 0.01
5.50 ± 0.26	30.20 ± 1.43	0.118 ± 0.01	0.125 ± 0.01
9.86 ± 0.28	97.29 ± 2.76	0.379 ± 0.01	0.477 ± 0.01
11.90 ± 0.29	141.66 ± 3.46	0.552 ± 0.02	0.803 ± 0.02
11.99 ± 0.29	143.65 ± 3.50	0.560 ± 0.02	0.820 ± 0.02
12.07 ± 0.29	145.65 ± 3.52	0.567 ± 0.02	0.838 ± 0.02
12.07 ± 0.29	145.65 ± 3.53	0.567 ± 0.02	0.838 ± 0.02
12.15 ± 0.29	147.66 ± 3.56	0.575 ± 0.02	0.856 ± 0.02
12.15 ± 0.29	147.66 ± 3.56	0.575 ± 0.02	0.856 ± 0.02
12.28 ± 0.29	150.71 ± 3.61	0.587 ± 0.02	0.885 ± 0.02
12.65 ± 0.30	160.04 ± 3.75	0.624 ± 0.02	0.977 ± 0.02
12.69 ± 0.30	161.10 ± 3.77	0.628 ± 0.02	0.988 ± 0.02
12.78 ± 0.30	163.22 ± 3.80	0.636 ± 0.02	1.010 ± 0.02
13.03 ± 0.30	169.66 ± 3.91	0.661 ± 0.02	1.082 ± 0.02
13.11 ± 0.30	171.83 ± 3.94	0.670 ± 0.02	1.107 ± 0.02
13.52 ± 0.30	182.91 ± 4.12	0.713 ± 0.02	1.247 ± 0.02
13.57 ± 0.30	184.04 ± 4.13	0.717 ± 0.02	1.263 ± 0.02
13.61 ± 0.30	185.17 ± 4.15	0.721 ± 0.02	1.278 ± 0.02
13.61 ± 0.30	185.17 ± 4.15	0.721 ± 0.02	1.278 ± 0.02
13.65 ± 0.31	186.30 ± 4.17	0.726 ± 0.02	1.294 ± 0.02
13.65 ± 0.31	186.30 ± 4.17	0.726 ± 0.02	1.294 ± 0.02
13.69 ± 0.31	187.44 ± 4.19	0.730 ± 0.02	1.311 ± 0.02
13.73 ± 0.31	188.58 ± 4.20	0.735 ± 0.02	1.327 ± 0.02
13.77 ± 0.31	189.72 ± 4.23	0.739 ± 0.02	1.344 ± 0.02
13.86 ± 0.31	192.02 ± 4.25	0.748 ± 0.02	1.379 ± 0.02

Tabla No. 64: Continuación de Tabla No. 63: Corrida No. 2 a 55°C para cinética de primer orden.

v_c (g/L) ^{0.5}	Concentración (g/L)	Xa	$-\ln(1-Xa)$
13.90 ± 0.31	193.18 ± 4.27	0.753 ± 0.02	1.397 ± 0.02
13.94 ± 0.31	194.33 ± 4.29	0.757 ± 0.02	1.415 ± 0.02
14.52 ± 0.32	210.91 ± 4.70	0.822 ± 0.03	1.725 ± 0.03
14.52 ± 0.32	210.91 ± 4.69	0.822 ± 0.03	1.725 ± 0.03
14.52 ± 0.32	210.91 ± 4.71	0.822 ± 0.03	1.725 ± 0.03
14.98 ± 0.33	224.41 ± 4.90	0.874 ± 0.03	2.074 ± 0.03
15.06 ± 0.33	226.91 ± 4.93	0.884 ± 0.03	2.155 ± 0.03
15.11 ± 0.33	228.17 ± 4.97	0.889 ± 0.03	2.198 ± 0.03
15.15 ± 0.33	229.43 ± 4.98	0.894 ± 0.03	2.243 ± 0.03
15.15 ± 0.33	229.43 ± 4.99	0.894 ± 0.03	2.243 ± 0.03
15.19 ± 0.33	230.69 ± 5.02	0.899 ± 0.03	2.291 ± 0.03
15.23 ± 0.33	231.95 ± 5.04	0.904 ± 0.03	2.341 ± 0.03
15.31 ± 0.33	234.49 ± 5.06	0.914 ± 0.03	2.449 ± 0.03
15.31 ± 0.33	234.49 ± 5.07	0.914 ± 0.03	2.449 ± 0.03
15.35 ± 0.33	235.77 ± 5.08	0.919 ± 0.03	2.509 ± 0.03
15.40 ± 0.33	237.05 ± 5.11	0.924 ± 0.03	2.572 ± 0.03
15.44 ± 0.33	238.33 ± 5.14	0.929 ± 0.03	2.640 ± 0.03
15.44 ± 0.33	238.33 ± 5.14	0.929 ± 0.03	2.640 ± 0.03
15.44 ± 0.33	238.33 ± 5.14	0.929 ± 0.03	2.640 ± 0.03
15.52 ± 0.33	240.91 ± 5.18	0.939 ± 0.03	2.791 ± 0.03
15.52 ± 0.33	240.91 ± 5.19	0.939 ± 0.03	2.791 ± 0.03
15.52 ± 0.33	240.91 ± 5.19	0.939 ± 0.03	2.791 ± 0.03
15.60 ± 0.33	243.50 ± 5.22	0.949 ± 0.03	2.971 ± 0.03
15.60 ± 0.34	243.50 ± 5.23	0.949 ± 0.03	2.971 ± 0.03
15.60 ± 0.34	243.50 ± 5.23	0.949 ± 0.03	2.971 ± 0.03
15.69 ± 0.34	246.10 ± 5.27	0.959 ± 0.03	3.191 ± 0.03
15.69 ± 0.34	246.10 ± 5.28	0.959 ± 0.03	3.191 ± 0.03
15.69 ± 0.34	246.10 ± 5.28	0.959 ± 0.03	3.191 ± 0.03
15.73 ± 0.34	247.41 ± 5.31	0.964 ± 0.03	3.324 ± 0.03
15.73 ± 0.34	247.41 ± 5.32	0.964 ± 0.03	3.324 ± 0.03
15.90 ± 0.34	252.67 ± 5.42	0.984 ± 0.03	4.166 ± 0.03
15.94 ± 0.34	253.99 ± 5.45	0.990 ± 0.03	4.570 ± 0.03
15.90 ± 0.34	252.67 ± 5.43	0.984 ± 0.03	4.166 ± 0.03
15.98 ± 0.34	255.32 ± 5.48	0.995 ± 0.03	5.262 ± 0.03
16.02 ± 0.34	256.65 ± 5.51	1.000 ± 0.03	- ± 0.03

Tabla No. 65: Corrida No. 2 a 55°C para cinética de orden n.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
0.091 ± 0.175	10.931 ± 5.707	-1.039 ± 0.756	(0.892) ± 0.144
0.092 ± 0.178	10.894 ± 5.623	-1.037 ± 0.750	-0.905 ± 0.137
0.092 ± 0.180	10.856 ± 5.542	-1.036 ± 0.744	-0.917 ± 0.131
0.114 ± 0.303	8.763 ± 3.300	-0.943 ± 0.518	-1.360 ± 0.094
0.120 ± 0.328	8.299 ± 3.053	-0.919 ± 0.485	-1.426 ± 0.128
0.127 ± 0.349	7.880 ± 2.865	-0.897 ± 0.457	-1.480 ± 0.156
0.338 ± 0.674	2.958 ± 1.485	-0.471 ± 0.172	-1.988 ± 0.441
0.646 ± 0.845	1.548 ± 1.184	-0.190 ± 0.073	-2.151 ± 0.539
0.665 ± 0.854	1.503 ± 1.171	-0.177 ± 0.069	-2.157 ± 0.544
0.685 ± 0.860	1.460 ± 1.163	-0.164 ± 0.066	-2.163 ± 0.547
0.685 ± 0.861	1.460 ± 1.161	-0.164 ± 0.065	-2.163 ± 0.548
0.705 ± 0.869	1.418 ± 1.151	-0.152 ± 0.061	-2.169 ± 0.552
0.705 ± 0.869	1.418 ± 1.151	-0.152 ± 0.061	-2.169 ± 0.552
0.737 ± 0.881	1.356 ± 1.135	-0.132 ± 0.055	-2.178 ± 0.558
0.845 ± 0.915	1.183 ± 1.093	-0.073 ± 0.039	-2.204 ± 0.574
0.858 ± 0.921	1.165 ± 1.086	-0.066 ± 0.036	-2.207 ± 0.577
0.885 ± 0.927	1.130 ± 1.079	-0.053 ± 0.033	-2.213 ± 0.580
0.972 ± 0.954	1.028 ± 1.048	-0.012 ± 0.020	-2.230 ± 0.592
1.004 ± 0.960	0.996 ± 1.041	0.002 ± 0.018	-2.235 ± 0.595
1.180 ± 1.004	0.847 ± 0.996	0.072 ± 0.002	-2.262 ± 0.614
1.200 ± 1.007	0.834 ± 0.993	0.079 ± 0.003	-2.265 ± 0.616
1.220 ± 1.013	0.820 ± 0.988	0.086 ± 0.005	-2.268 ± 0.618
1.220 ± 1.013	0.820 ± 0.988	0.086 ± 0.005	-2.268 ± 0.618
1.240 ± 1.018	0.806 ± 0.983	0.093 ± 0.008	-2.270 ± 0.620
1.240 ± 1.018	0.806 ± 0.983	0.093 ± 0.008	-2.270 ± 0.620
1.261 ± 1.023	0.793 ± 0.978	0.101 ± 0.010	-2.273 ± 0.622
1.282 ± 1.026	0.780 ± 0.975	0.108 ± 0.011	-2.275 ± 0.624
1.304 ± 1.031	0.767 ± 0.970	0.115 ± 0.013	-2.278 ± 0.626
1.348 ± 1.037	0.742 ± 0.964	0.130 ± 0.016	-2.283 ± 0.628
1.371 ± 1.042	0.729 ± 0.959	0.137 ± 0.018	-2.286 ± 0.631

Tabla No. 66: Continuación de Tabla No. 65: Corrida No. 2 a 55°C para cinética de orden n.

dt/dCA	dCa/dt	log(dCa/dt)	log (Ca)
1.394 ± 1.048	0.717 ± 0.955	0.144 ± 0.020	-2.289 ± 0.633
1.776 ± 1.146	0.563 ± 0.872	0.250 ± 0.059	-2.324 ± 0.672
1.776 ± 1.144	0.563 ± 0.874	0.250 ± 0.058	-2.324 ± 0.671
1.776 ± 1.149	0.563 ± 0.871	0.250 ± 0.060	-2.324 ± 0.673
2.163 ± 1.195	0.462 ± 0.837	0.335 ± 0.077	-2.351 ± 0.690
2.244 ± 1.204	0.446 ± 0.831	0.351 ± 0.081	-2.356 ± 0.693
2.285 ± 1.212	0.438 ± 0.825	0.359 ± 0.084	-2.358 ± 0.696
2.328 ± 1.216	0.430 ± 0.823	0.367 ± 0.085	-2.361 ± 0.697
2.328 ± 1.218	0.430 ± 0.821	0.367 ± 0.086	-2.361 ± 0.698
2.371 ± 1.224	0.422 ± 0.817	0.375 ± 0.088	-2.363 ± 0.700
2.415 ± 1.230	0.414 ± 0.813	0.383 ± 0.090	-2.365 ± 0.703
2.506 ± 1.234	0.399 ± 0.810	0.399 ± 0.091	-2.370 ± 0.704
2.506 ± 1.237	0.399 ± 0.809	0.399 ± 0.092	-2.370 ± 0.705
2.554 ± 1.240	0.392 ± 0.806	0.407 ± 0.096	-2.372 ± 0.706
2.602 ± 1.246	0.384 ± 0.802	0.415 ± 0.099	-2.375 ± 0.708
2.651 ± 1.255	0.377 ± 0.797	0.423 ± 0.099	-2.377 ± 0.711
2.651 ± 1.255	0.377 ± 0.797	0.423 ± 0.099	-2.377 ± 0.711
2.651 ± 1.255	0.377 ± 0.797	0.423 ± 0.102	-2.377 ± 0.711
2.753 ± 1.264	0.363 ± 0.791	0.440 ± 0.103	-2.382 ± 0.714
2.753 ± 1.267	0.363 ± 0.789	0.440 ± 0.103	-2.382 ± 0.715
2.753 ± 1.267	0.363 ± 0.789	0.440 ± 0.105	-2.382 ± 0.715
2.859 ± 1.274	0.350 ± 0.785	0.456 ± 0.106	-2.386 ± 0.718
2.859 ± 1.277	0.350 ± 0.783	0.456 ± 0.106	-2.386 ± 0.719
2.859 ± 1.277	0.350 ± 0.783	0.456 ± 0.109	-2.386 ± 0.719
2.969 ± 1.286	0.337 ± 0.778	0.473 ± 0.110	-2.391 ± 0.722
2.969 ± 1.289	0.337 ± 0.776	0.473 ± 0.110	-2.391 ± 0.723
2.969 ± 1.289	0.337 ± 0.776	0.473 ± 0.112	-2.391 ± 0.723
3.027 ± 1.295	0.330 ± 0.772	0.481 ± 0.113	-2.393 ± 0.725
3.027 ± 1.298	0.330 ± 0.771	0.481 ± 0.121	-2.393 ± 0.726
3.268 ± 1.323	0.306 ± 0.756	0.514 ± 0.124	-2.403 ± 0.734
3.332 ± 1.329	0.300 ± 0.752	0.523 ± 0.122	-2.405 ± 0.736
3.268 ± 1.326	0.306 ± 0.754	0.514 ± 0.127	-2.403 ± 0.735
3.397 ± 1.338	0.294 ± 0.747	0.531 ± 0.129	-2.407 ± 0.739
3.464 ± 1.345	0.289 ± 0.744	0.540 ± 0.129	-2.409 ± 0.741

Tabla No. 67: Resultado de orden y constante de la cinética de reacción a diferentes temperaturas.

Corrida	rango (g/L)	orden	constante
1 a 23 °C	0 - 142	1 ± 0	0.006772 ± 0.000047
1 a 23 °C	142 -245	0.390143 ± 0.002440	0.006131 ± 0.000012
2 a 55°C	0-221	1 ± 0	0.013802 ± 0.000061
2 a 55°C	221-257	0.283545 ± 0.000816	0.005536 ± 0.000005
4 a 45°C	0 -191	1 ± 0	0.011578 ± 0.000090
4 a 45°C	191-251	0.388744 ± 0.002165	0.006176 ± 0.000031

Tabla No. 68: Energía de activación de la reacción para cada rango de concentración

Rango (g/L)	Energía de activación
0 -191	$683.90 \pm 7.13 \frac{J}{mol}$
192-251	$9.53 \pm 0.82 \frac{J}{mol}$

Tabla No. 69: Diámetro óptimo de tubería en cada sistema.

Sistema	Velocidad óptima (ft/s)	Velocidad óptima (m/s)	Diámetro óptimo (m)	diámetro óptimo (in)	diámetro real (in)
agua desionizada	2.82	0.855	0.032	1.28	1.25
salmuera agotada	2.59	0.785	0.034	1.33	1.5
salmuera saturada	2.48	0.752	0.038	1.49	1.5

Tabla No. 70: Cálculo realizado para caracterización de bomba de descarga de salmuera saturada.

Etiqueta de equipo	P-1		Nombre de equipo	Bomba de descarga salmuera saturada	
Fluido de operación	salmuera saturada @ 251 g/L		tipo de tubería	SC 80 CPVC	
densidad	1.19 kg/L		Flujo volumétrico	4800 L/hora	
viscosidad	0.0014 Ns/m ²		Flujo volumétrico	80 L/min	
mínimo	35 °C		Flujo volumétrico	1.3 L/s	
promedio	45 °C		Flujo másico	1.587 kg/s	
máximo	55 °C		Flujo de diseño	2 kg/s	

Succión			Descarga		
diametro de tubería	50.8 mm 2 in		diametro de tubería	50.8 mm 2 in	
	normal	máximo		normal	máximo
velocidad	0.66	0.79	velocidad	0.66	0.79
factor de fricción	0.104	0.156	factor de fricción	0.366	0.556
largo de tubería	3	3	largo de tubería	40	40
perdida de presión	0.312	0.468	perdida de presión	14.658	22.259
Accesorios			Accesorios		
1 codo 45°	6.6 m		8 codo 90°	158.4 m	
			1 Tee 45°	13.2 m	
			1 codo 45°	26.4 m	
Largo total equivalente	9.6 m		Largo total equivalente	238 m	
Caida de presión	1.5 kPa		Caida de presión	132.4 kPa	

Caida de presión	

Caida de presión	
1 electroválvula 2"	100 Pa
1 expansor 1.5" - 2"	73 Pa

Caida de presión por fricción	134.1 kPa	especificación de bomba	IWAKI SMX (F) 545
Cabeza de necesaria	249.58 m ² /s ²	Eficiencia de bomba	N/A
Cabeza de necesaria	25 m	Potencia de bomba	1650 W
Potencia de fluido	396 W	Diametro entrada	2 in
		Diametro salida	1.5 in
		Velocidad de motor	3500 rpm
		diametro de impulsor	N/A
		eficiencia de bomba	45%
		Potencia de motor	3700 W

Tabla No. 71: Cálculo realizado para caracterización de bomba de alimentación de salmuera agotada.

Etiqueta de equipo	P - 2		Nombre de equipo	Bomba de alimentación de salmuera agotada	
Fluido de operación	salmuera agotada @ 191 g/L		tipo de tubería	SC 80 CPVC	
densidad	1.14 kg/L		Flujo volumétrico	2580 L/hora	
viscosidad	0.0014 Ns/m ²		Flujo volumétrico	43 L/min	
mínimo	50 °C		Flujo volumétrico	0.7 L/s	
promedio	65 °C		Flujo másico	0.817 kg/s	
máximo	80 °C		Flujo de diseño	0.980 kg/s	
Succión			Descarga		
diametro de tubería	50.8 mm 2 in		diametro de tubería	25.4 mm 1 in	
	normal	máximo		normal	máximo
velocidad	0.35	0.42 m/s	velocidad	1.41	1.70 m/s
factor de fricción	0.029	0.061 kPa/m	factor de fricción	0.102	0.215 kPa/m
largo de tubería	20	20 m	largo de tubería	10	10 m
perdida de presión	0.58814	1.22152 kPa	perdida de presión	1.01793	2.14896 kPa
<u>Accesorios</u>			<u>Accesorios</u>		
2 codo 45°	13.2 m		2 codo 90°	13.2 m	
			2 uniones lisas	13.2 m	
			3 codo 45°	19.8 m	
Largo total equivalente	33.2 m		Largo total equivalente	56.2 m	
Caída de presión	2.0 kPa		Caída de presión	12.1 kPa	
<u>Caída de presión</u>			<u>Caída de presión</u>		
1 reductor 2" x 1.5"	14.12 Pa		1 reductor jet 1" x 0.5"	7250.4 Pa	
1 reductor 1.5" x 1"	160.88 Pa				
Caída de presión por fricción	21.5 kPa		especificación de bomba	IWAKI MX (F) 250	
Cabeza de necesaria	-31.48 m ² /s ²		Eficiencia de bomba	35%	
Cabeza de necesaria	-3 m		Potencia de bomba	186 W	
Potencia de fluido	-23 W		Diametro entrada	1 in	
			Diametro salida	1 in	
			Velocidad de motor	3500 rpm	
			diametro de impulsor	2.95 in	
			Potencia de motor	370 W	

Tabla No. 72: Cálculo realizado para caracterización de bomba de alimentación de agua desionizada.

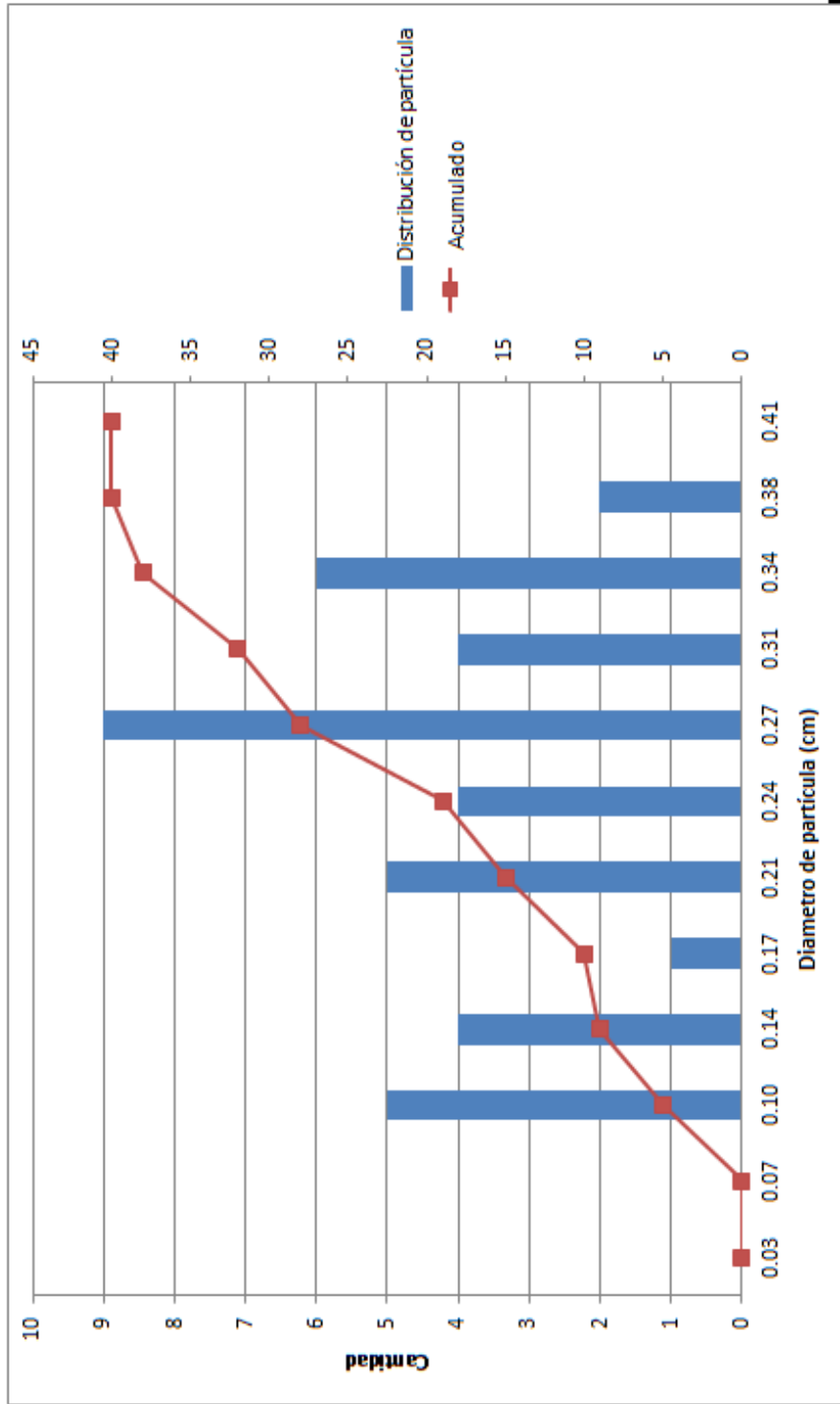
Etiqueta de equipo	P - 3		Nombre de equipo	Bomba de alimentación de agua desionizada	
Fluido de operación	agua desionizada		tipo de tubería	SC 40 PVC	
densidad	0.997 kg/L		Flujo volumétrico	2002 L/hora	
viscosidad	0.01 Ns/m ²		Flujo volumétrico	0.6 L/s	
mínimo	22 °C		Flujo másico	0.554 kg/s	
promedio	25 °C		Flujo de diseño	0.665 kg/s	
máximo	28 °C				
Succión			Descarga		
diámetro de tubería	31.75 mm 1.25 in		diámetro de tubería	31.75 mm 1.25 in	
	normal	máximo		normal	máximo
velocidad	0.70	0.84	velocidad	0.70	0.84
factor de fricción	0.152	0.321	factor de fricción	0.029	0.061
largo de tubería	20	20	largo de tubería	10	10
perdida de presión	3.0318	6.424	perdida de presión	0.29407	0.61076
Accesorios			Accesorios		
2 codo 45°	13.2 m		3 codo 90°	19.8 m	
			2 uniones lisas	13.2 m	
			5 codo 45°	33 m	
Largo total equivalente	33.2 m		Largo total equivalente	76 m	
Caída de presión	10.7 kPa		Caída de presión	4.6 kPa	
<u>Caída de presión</u>			<u>Caída de presión</u>		
			1 reductor jet 1.25" x 0.5" 6340.92 Pa		
Caída de presión por fricción	21.6 kPa		especificación de bomba	STA RITE DPC series - 1/2 hp.	
Cabeza de necesaria	-25.184 m ² /s ²		Eficiencia de bomba	N/A	
Cabeza de necesaria	0 m		Potencia de bomba	N/A W	
Potencia de fluido	-14 W		Diametro entrada	1.25 in	
			Diametro salida	1.25 in	
			Velocidad de motor	3450 rpm	
			diametro de impulsor	N/A in	
			eficiencia de motor	N/A	
			Potencia de motor	186 W	

Tabla No. 73: Inversión de capital necesaria para la ejecución del proyecto

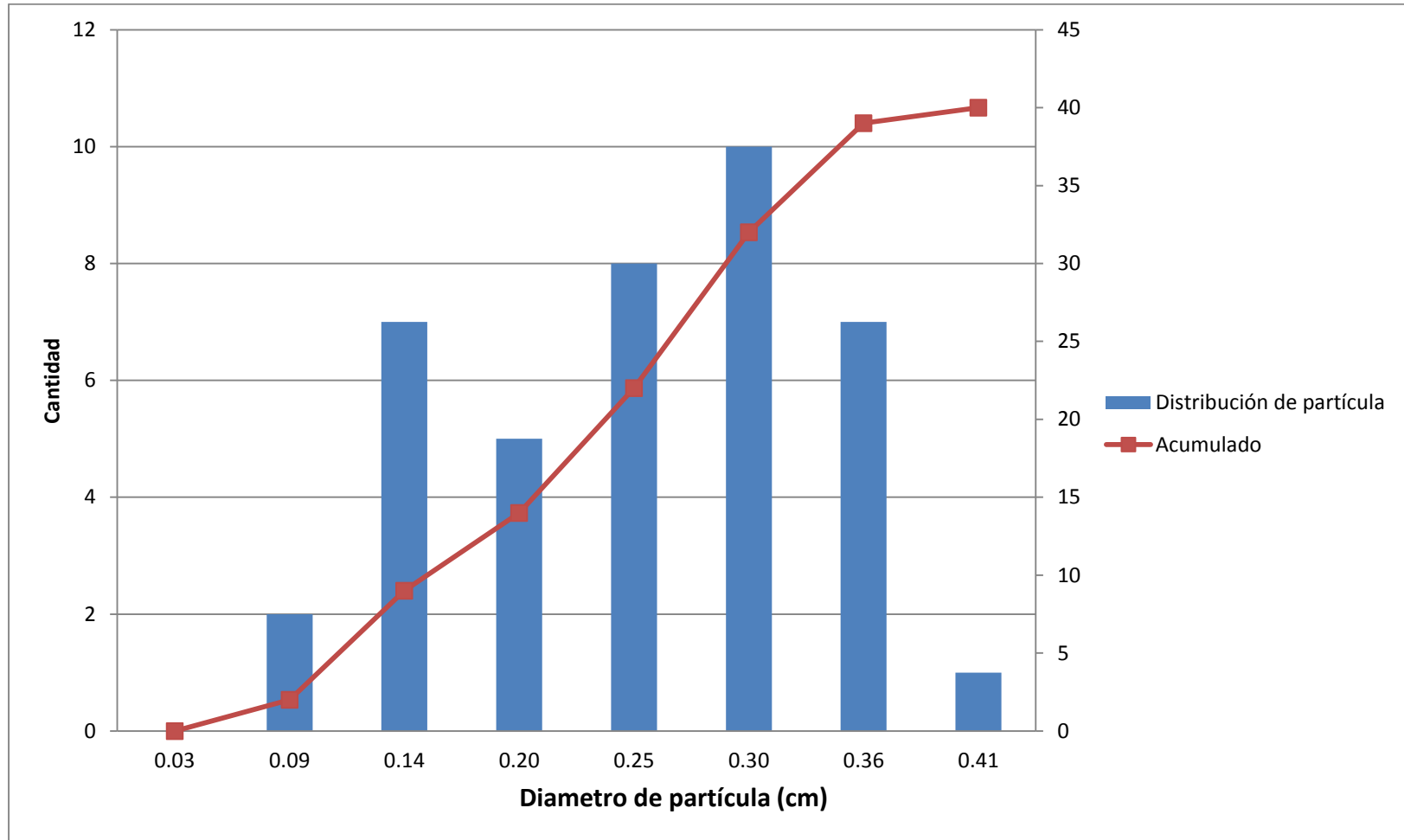
Inversión	Descripción	Cantidad	precio unitario	Total
<i>tanque de disolución</i>				\$ 8,500.00
	precio FOB	1	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00
	Transporte México - Guatemala	1	\$ 3,000.00	\$ 3,000.00
	tapete	1	\$ 500.00	\$ 500.00
<i>tolva</i>				\$ 27,600.00
	Fabricación	2	\$12,000	\$ 24,000.00
	vibrador	2	\$1,800	\$ 3,600.00
<i>soplador</i>				
	compra	1	\$ 3,000.00	\$ 3,000.00
<i>bombas</i>				
	compra	3	\$ 2,000.00	\$ 6,000.00
<i>Inversión de equipo</i>				\$ 45,100.00
Sistemas auxiliares	<i>tubería</i>	0.15		\$ 2,625.00
	<i>sistema de control</i>	0.1		\$ 4,510.00
	<i>instalación</i>	0.2		\$ 9,020.00
	<i>sistema eléctrico</i>	0.13		\$ 5,863.00
<i>Inversión total</i>				\$ 67,118.00

D. Gráficas

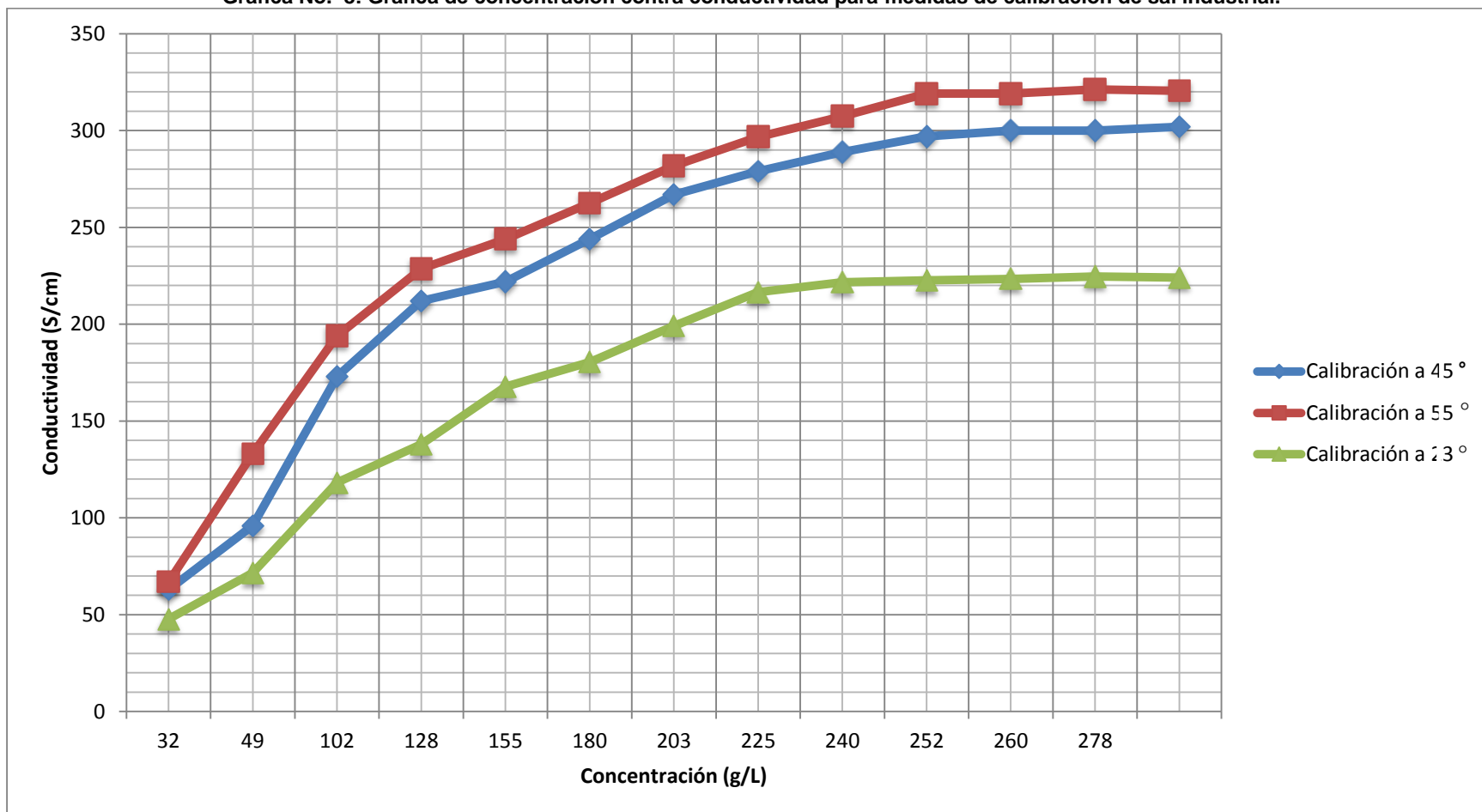
Gráfica No. 6: Distribución de partículas de sal con un intervalo de 0.035 cm de diámetro.



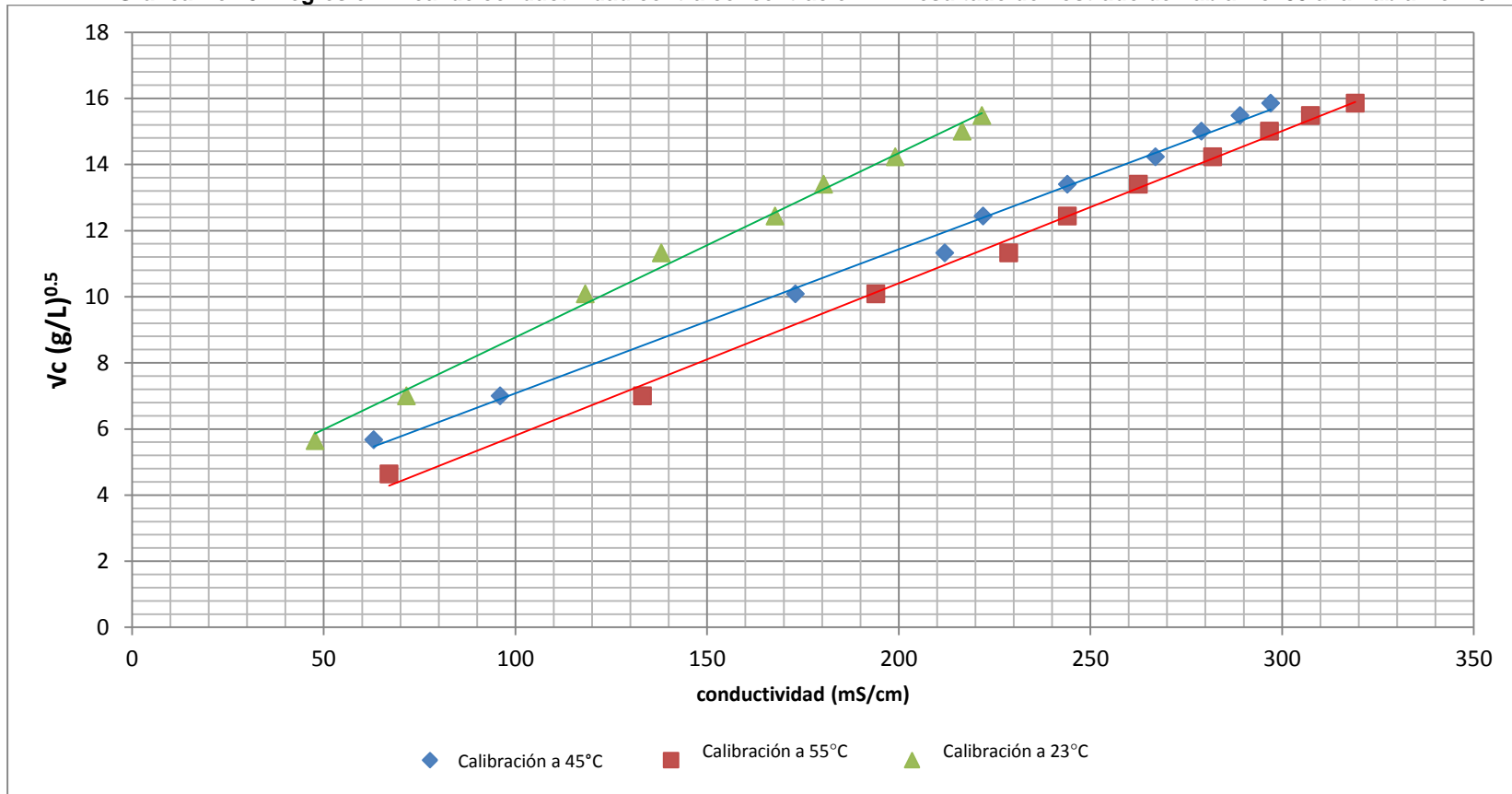
Gráfica No. 7: Distribución de partículas de sal con un intervalo de 0.055 cm de diámetro.



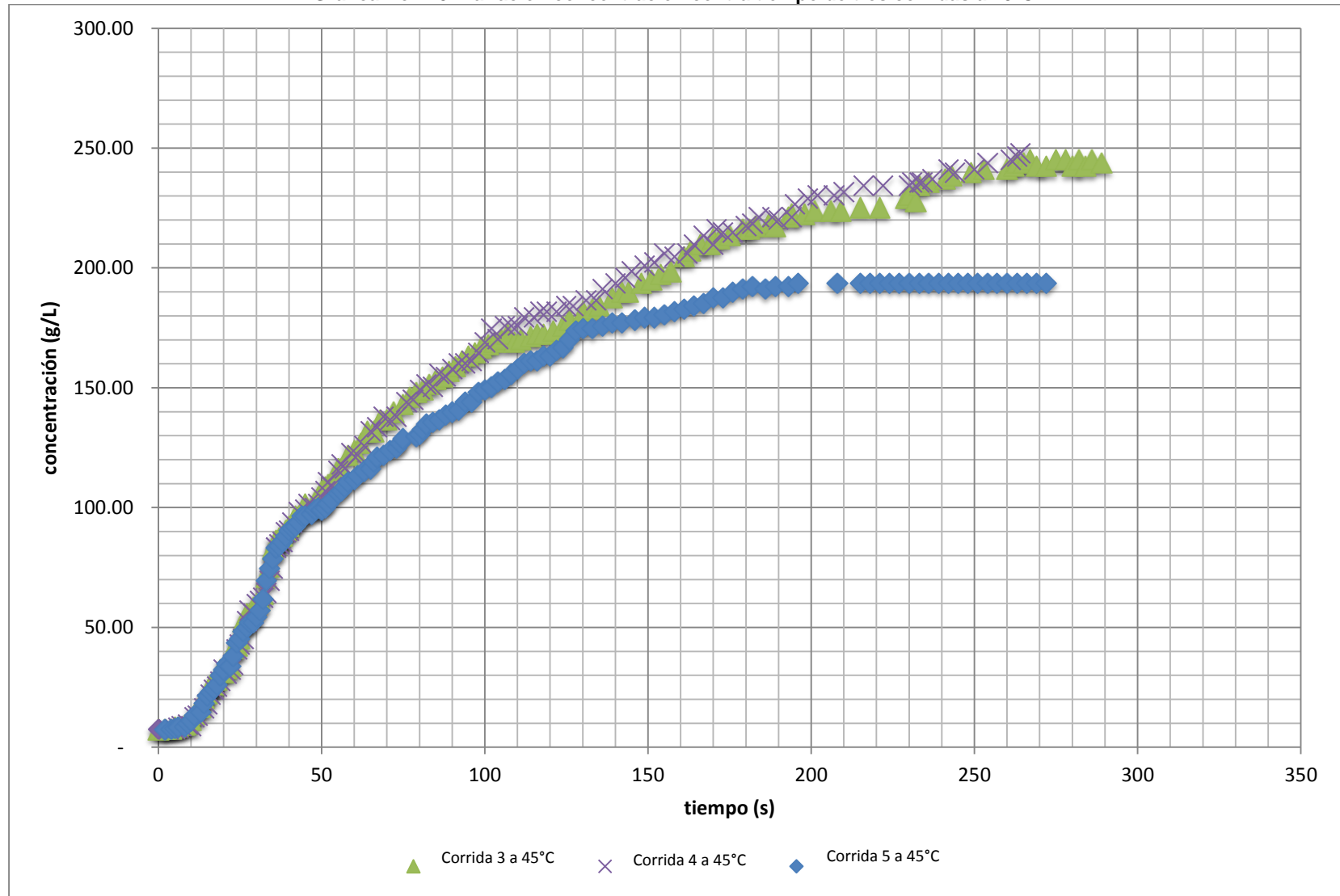
Gráfica No. 8: Gráfica de concentración contra conductividad para medidas de calibración de sal industrial.



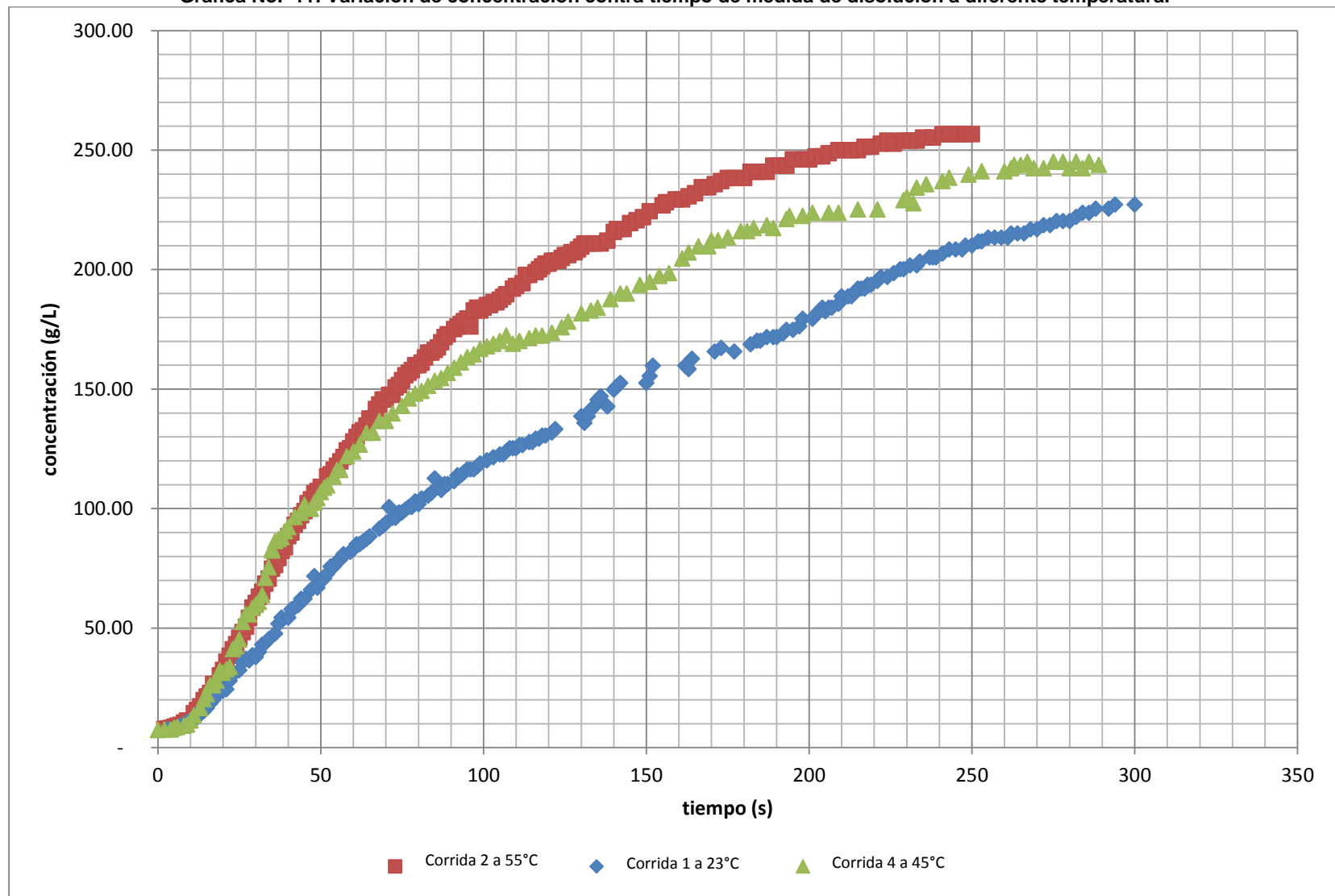
Gráfica No. 9: Regresión lineal de conductividad contra concentración ^{0.5}. Resultado demostrado de Tabla No. 39 a la Tabla No. 43.



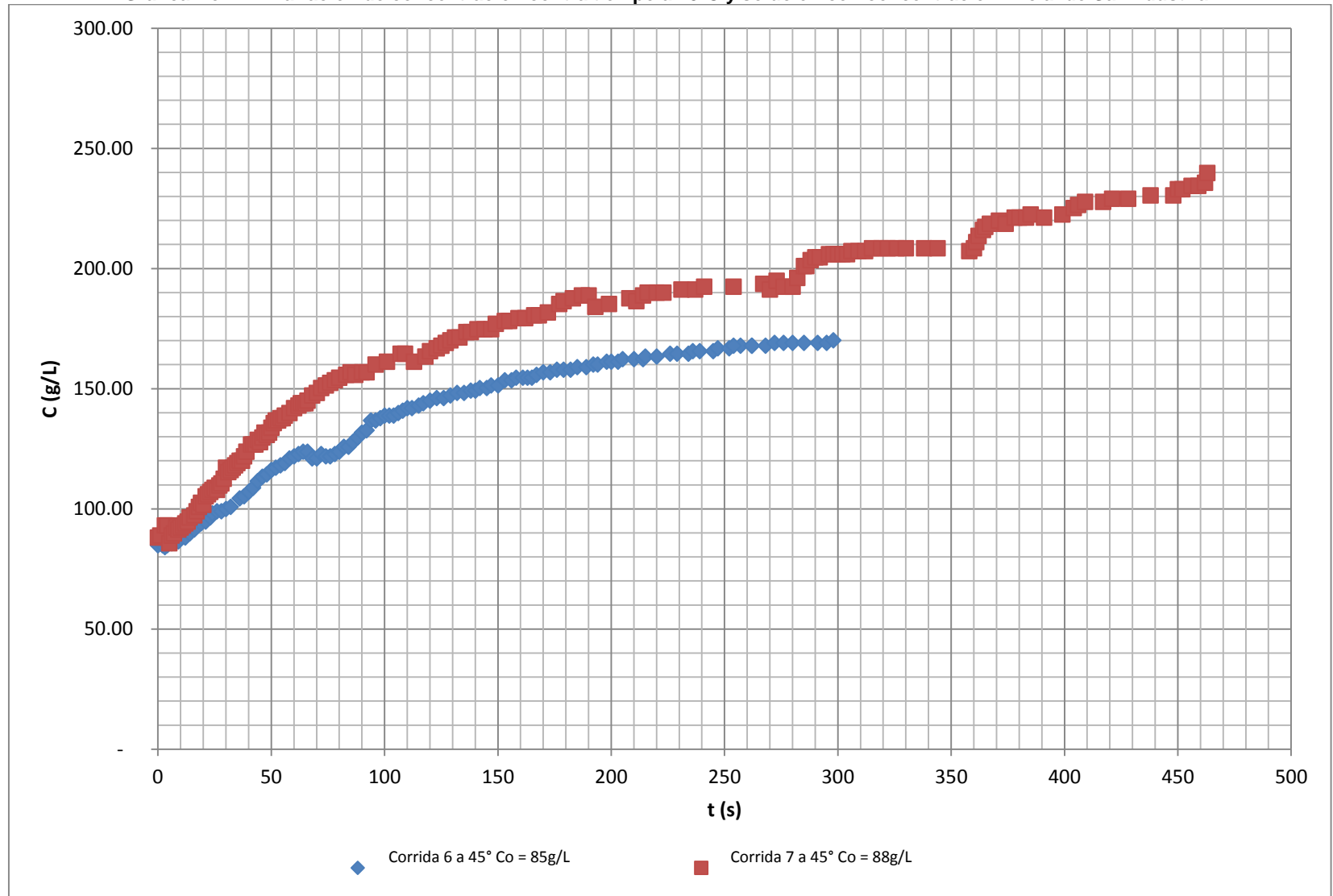
Gráfica No. 10: Variación concentración contra tiempo de tres corridas a 45°C.



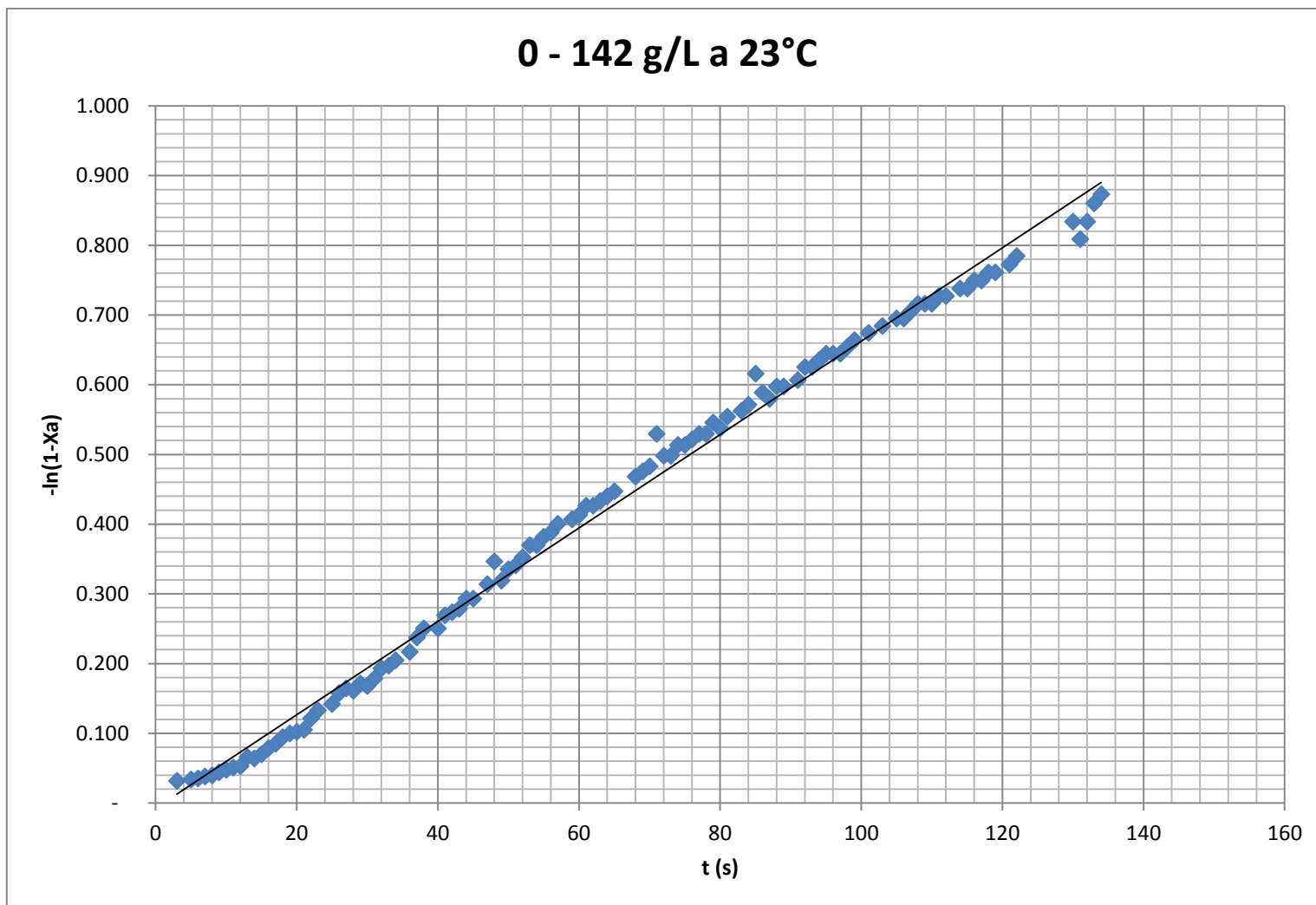
Gráfica No. 11: Variación de concentración contra tiempo de medida de disolución a diferente temperatura.



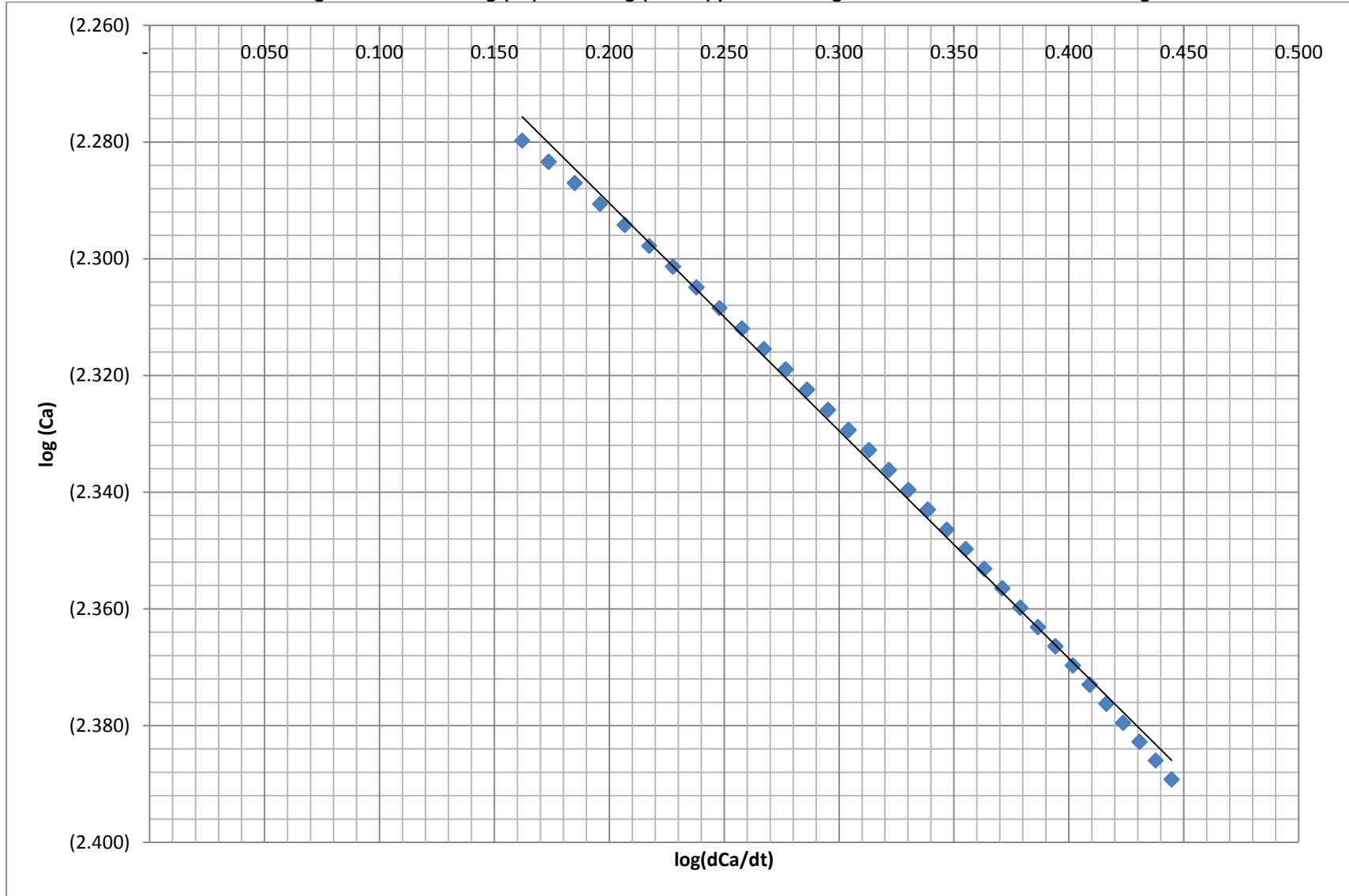
Gráfica No. 12: Variación de concentración contra tiempo a 45°C y solución con concentración inicial de Sal industrial.



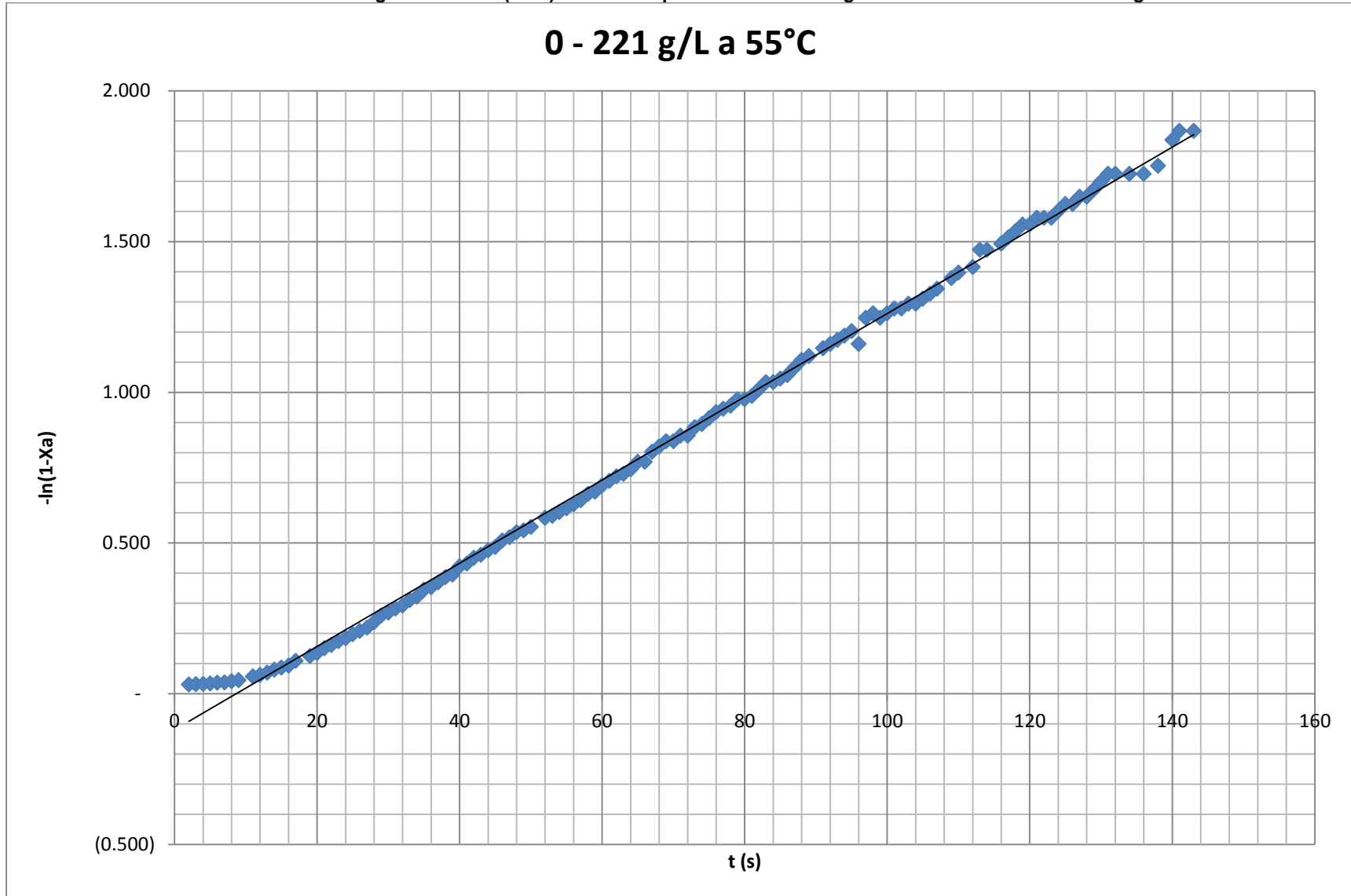
Gráfica No. 13: Regresión de $-\ln(1-X_a)$ contra tiempo a 23°C en un rango de concentración de 0 a 142 g/L.



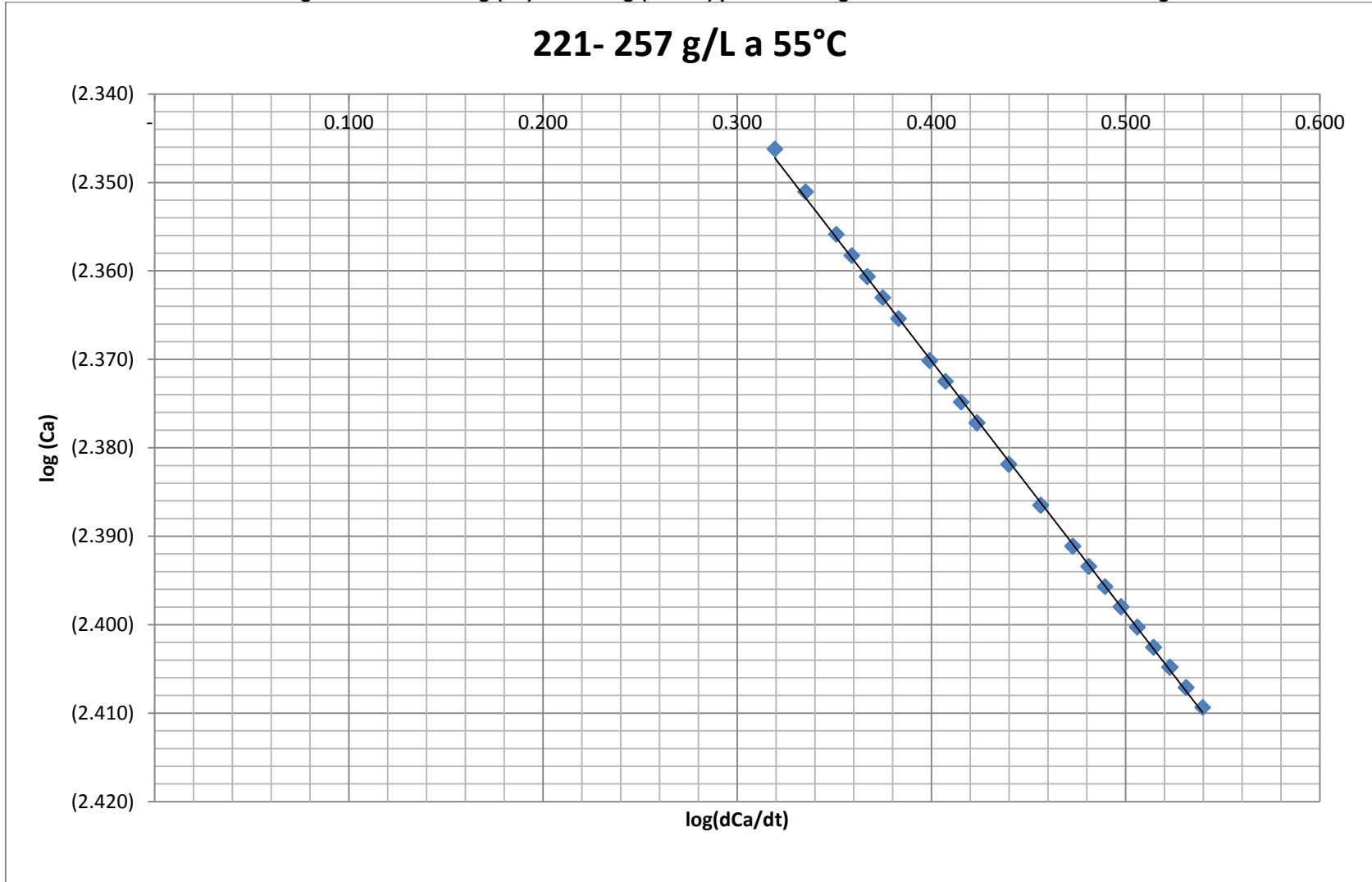
Gráfica No. 14: Regresión lineal de $\log(Ca)$ contra $\log(dCa/dt)$ para una rango de concentración de 142 – 245 g/L a 23°C.



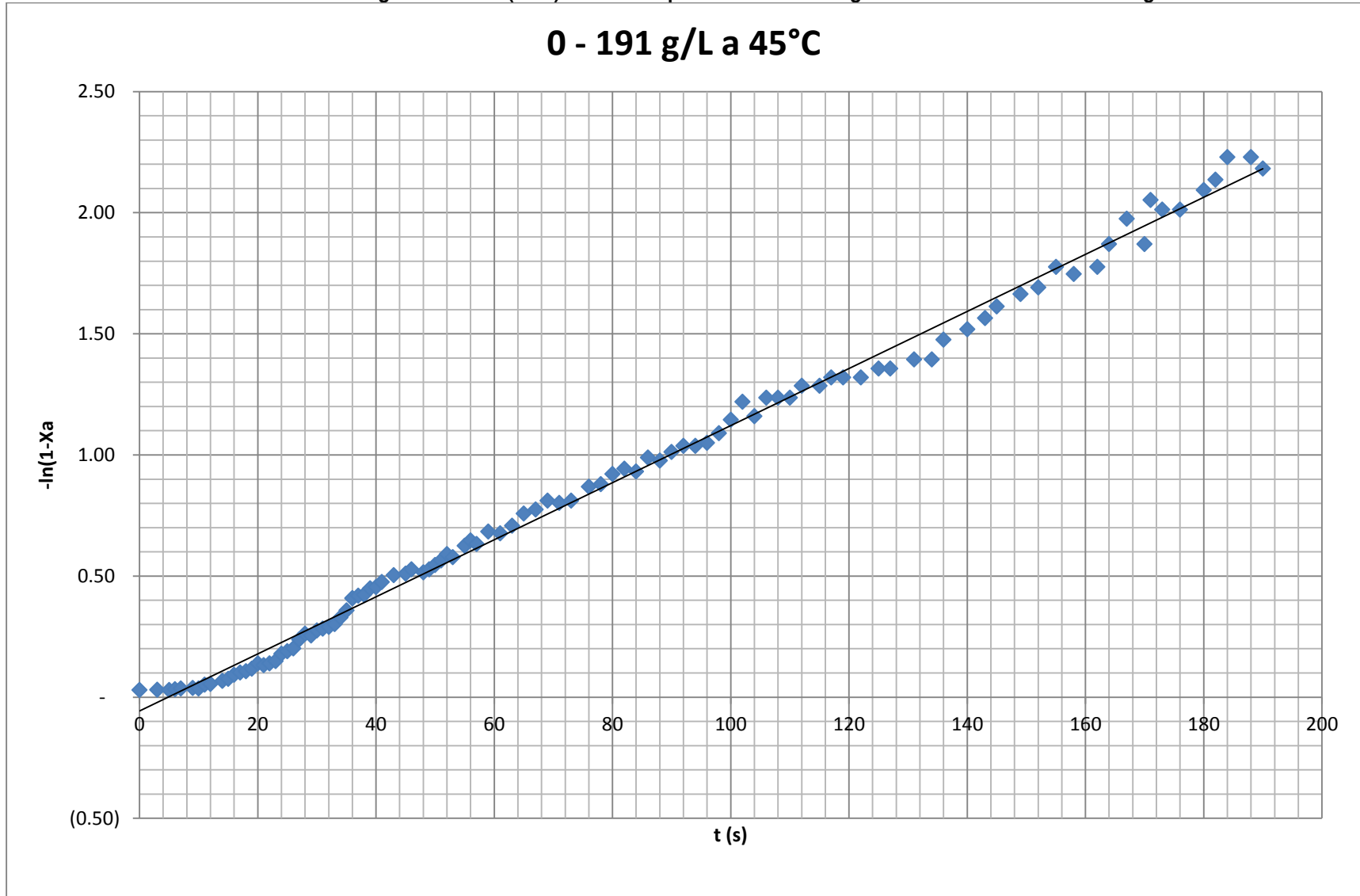
Gráfica No. 15: Regresión de $-\ln(1-X_a)$ contra tiempo a 55°C en un rango de concentración de 0 a 221 g/L.



Gráfica No. 16: Regresión lineal de $\log(Ca)$ contra $\log(dCa/dt)$ para una rango de concentración de 221 – 257 g/L a 55°C.



Gráfica No. 17: Regresión de $-\ln(1-X_a)$ contra tiempo a 45°C en un rango de concentración de 0 a 191 g/L.



Gráfica No. 18: Regresión lineal de $\log(Ca)$ contra $\log(dCa/dt)$ para una rango de concentración de 191 – 251 g/L a 45°C.

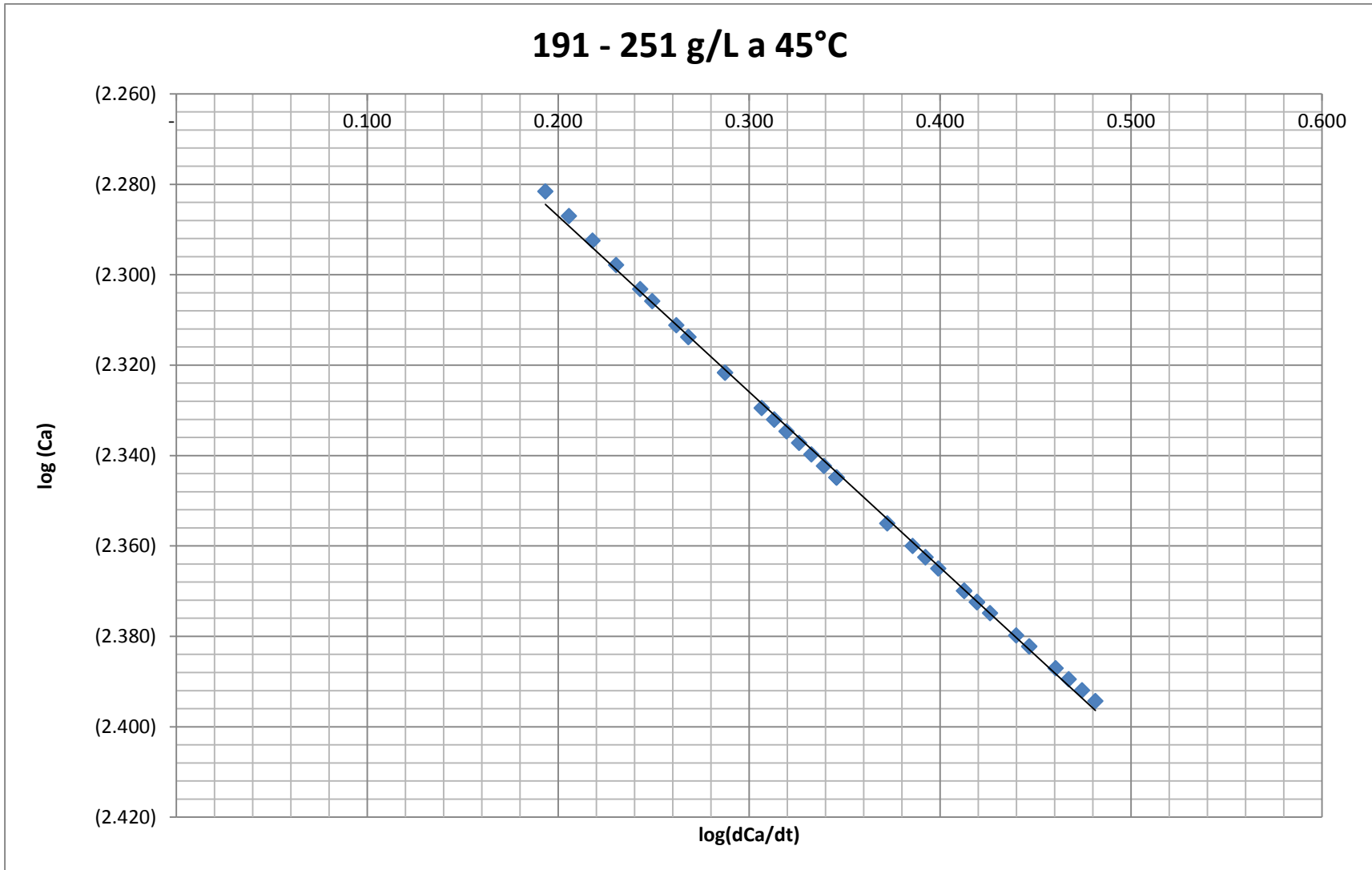
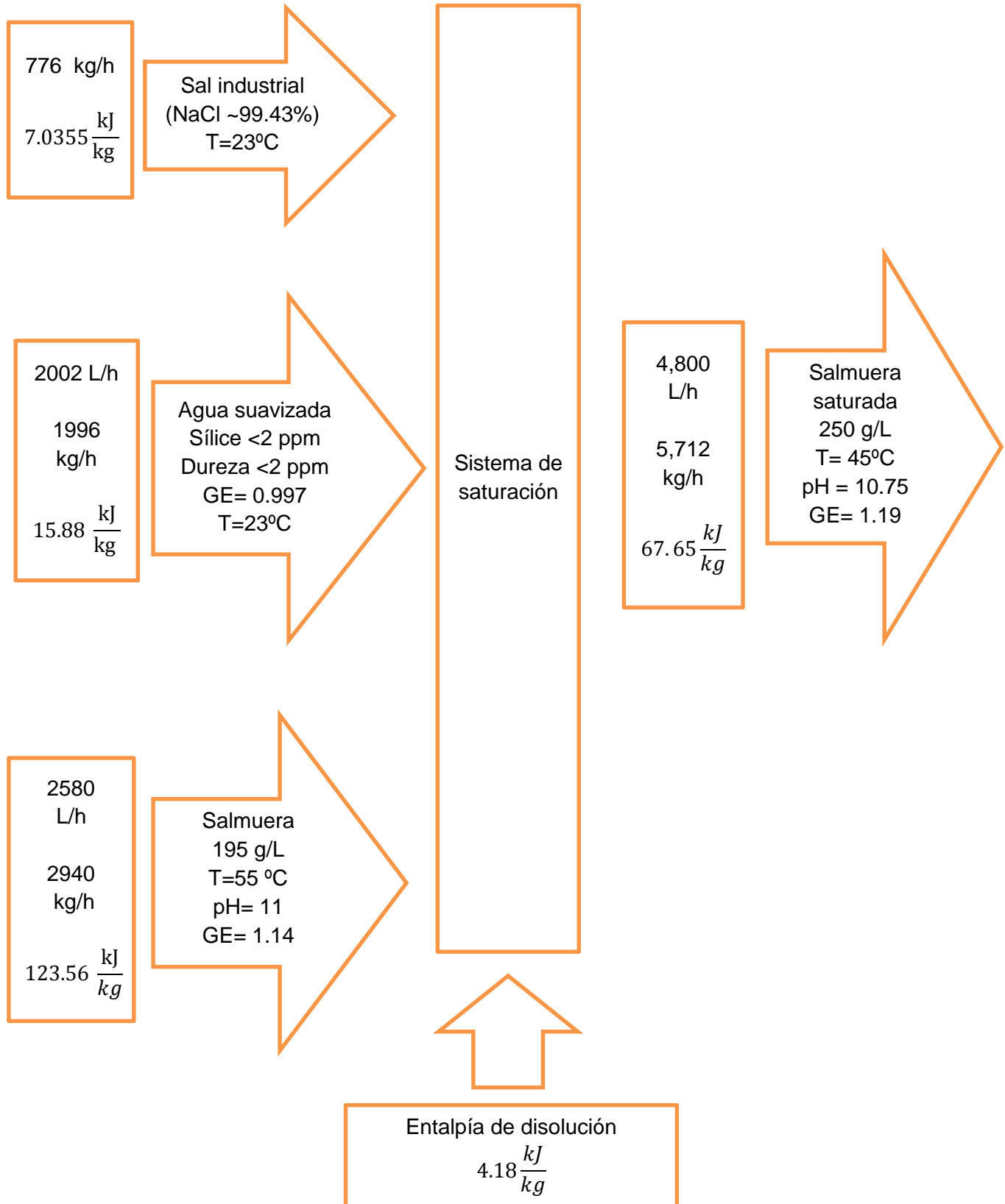


Imagen No. 20: Balance de masa y energía del sistema



E. Equipos

Tabla No. 74: Composición de sal industrial indicada en certificado de análisis de proveedor.

Componente	Análisis
Cloruro de sodio	99.43%
Calcio	0.07%
Magnesio	0.06%
Sulfato	0.24 %
Humedad superficial	2%
Compuestos insolubles	0.05%

Tabla No. 75: Precisión del puente de conductividad YSI 35.

Rango mostrado	Lectura		Precisión (± % de escala completa)	
	Máxima	Resolución	15 a 30°C ambiente	0- 15 °C 30-45°C
0–20.00 micromho	19.9 9	0.01 micromho	0.25	0.6
0–200.0 micromho	19 9.9	0.1 micromho	0.25	0.6
0–2000 micromho	19 9 9	1 micromho	0.25	0.6
0–20.00 millimho	19.9 9	0.01 millimho	0.25	0.6
0–200.0 millimho	19 9.9	0.1 millimho	0.25	0.6
0–2000 millimho	19 9 9	1 millimho	1.00	2.0

Imagen No. 21: Sistema utilizado para la medición de conductividad versus tiempo.

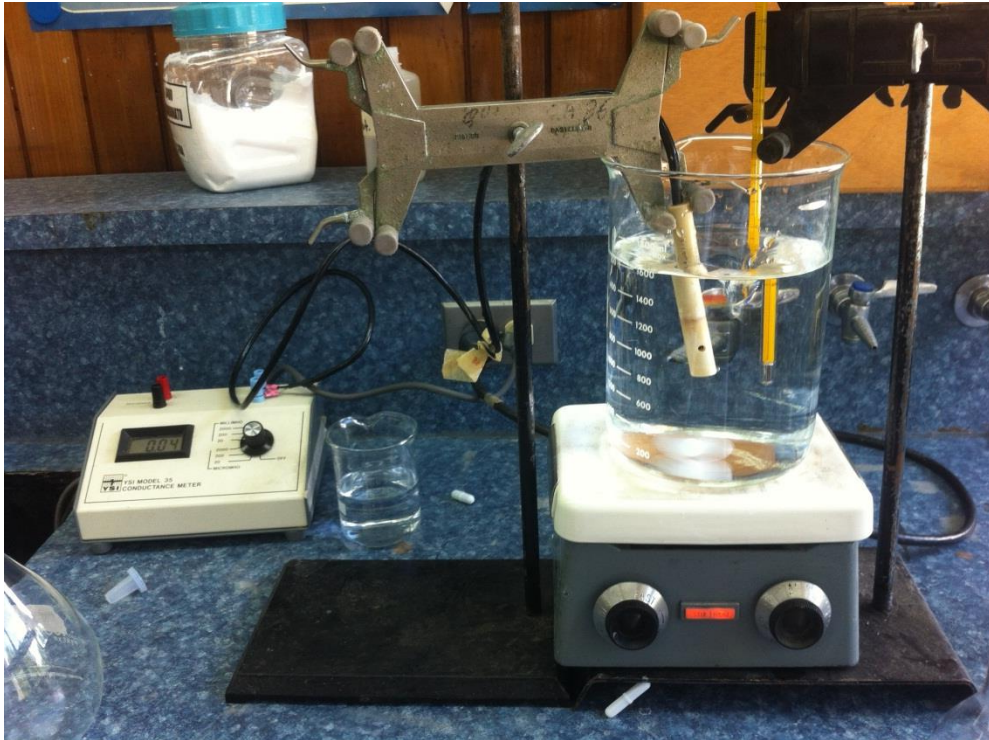


Imagen No. 22: Sistema de tanque piloto



Imagen No. 23: Lazo de control diseñado para el sistema

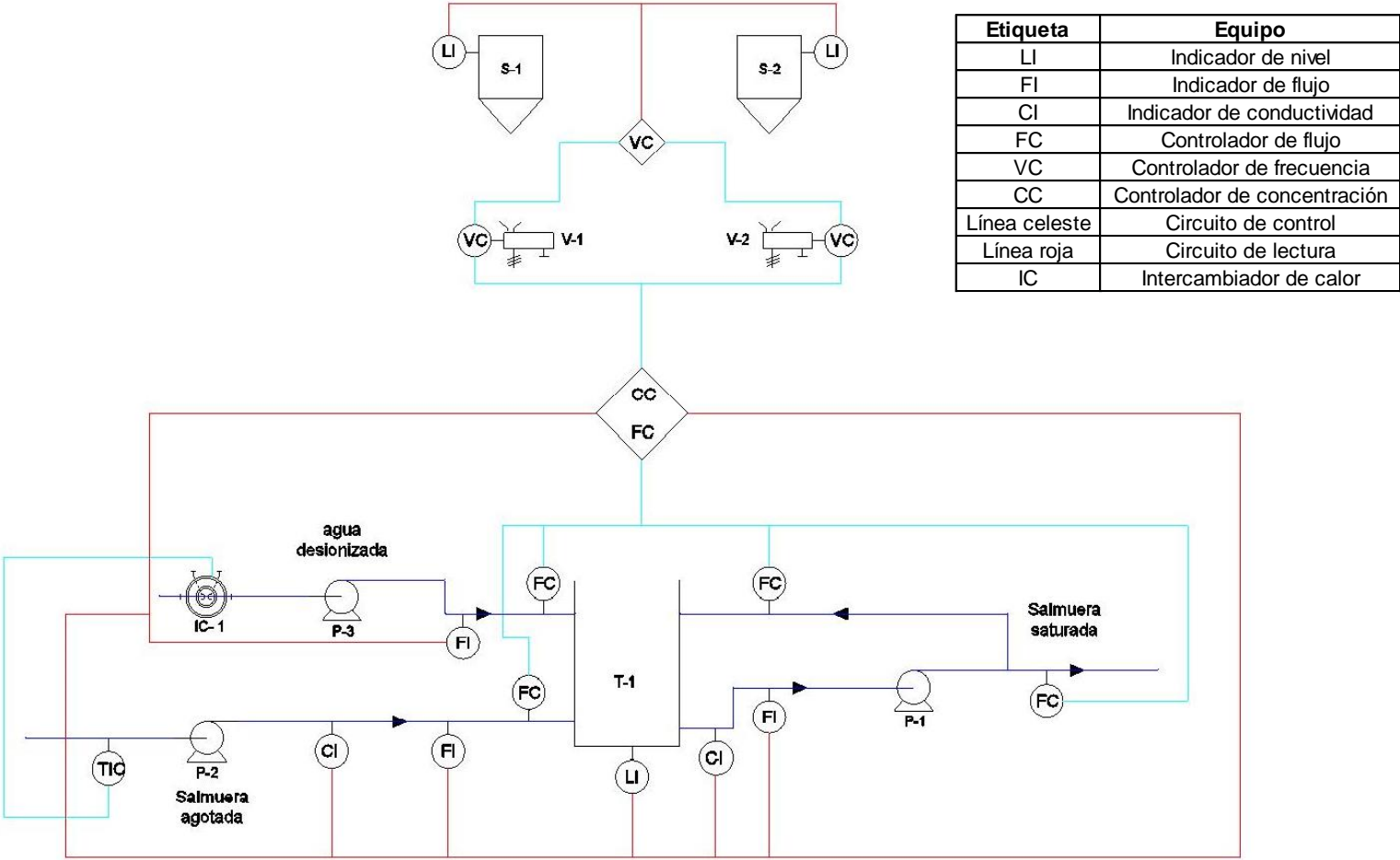
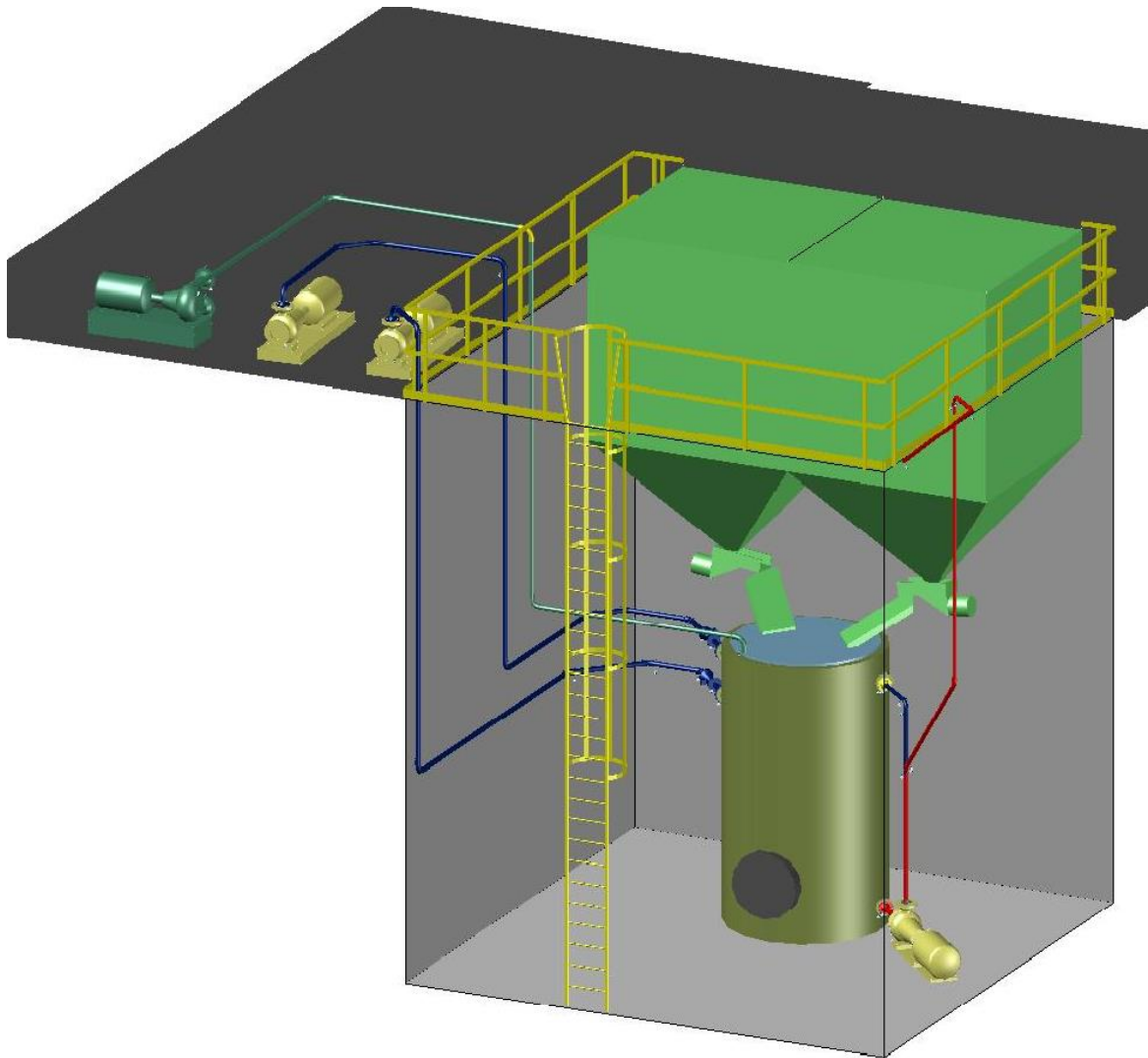
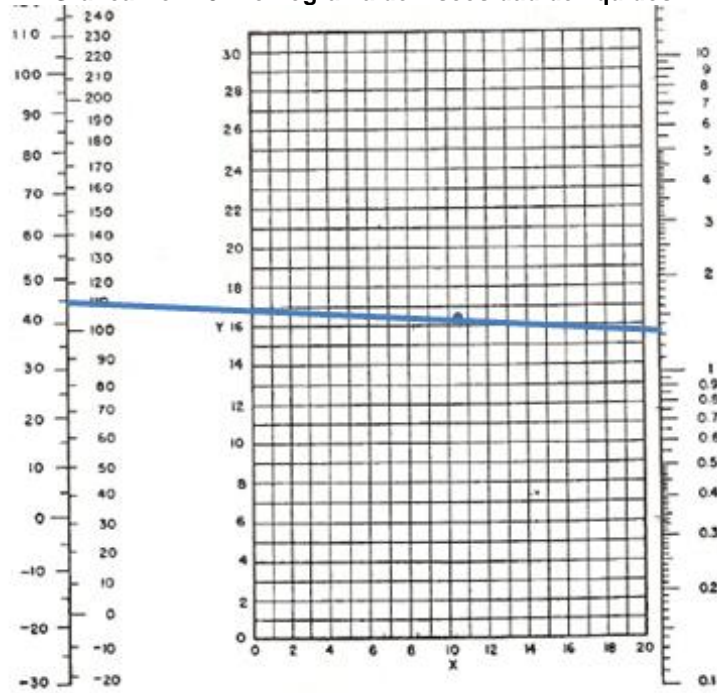


Imagen No. 24: Vista de sistema completo.

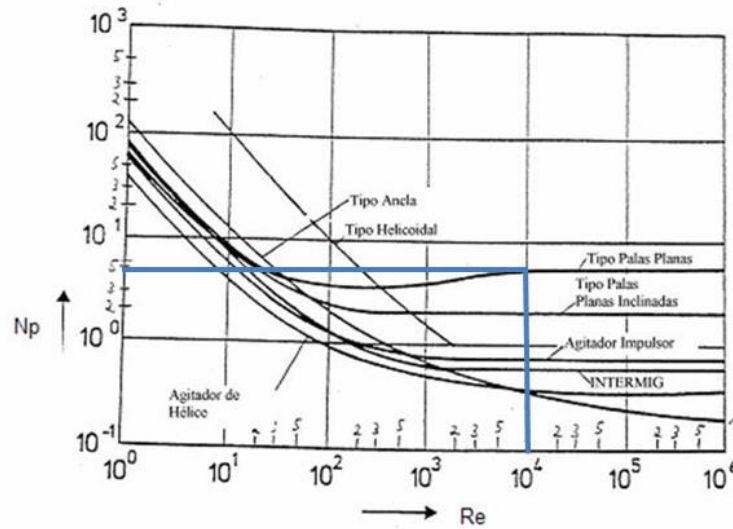


Gráfica No. 19: Nomograma de viscosidad de líquidos.



Fuente: (McCabe, 2007).

Gráfica No. 20: Cálculo del número de potencia para agitadores de placas planas

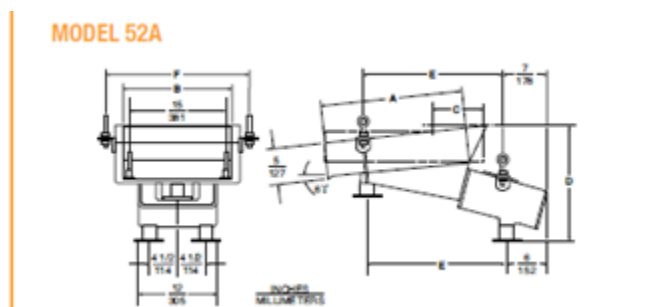


Suarez. (E. 2011. <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/684/1/96T00136.pdf>)

Imagen No. 25: Hoja técnica de alimentador por vibración 52A - Eriez



Suministro de potencia	115V o 230 V - 60 Hz
Consumo con carga completa	60 W
Suministro de potencia con carga completa	4 Amp a 115 V
Peso neto	79 kg



<i>A- Longitud de bandeja</i>	<i>0.61 m</i>
<i>B - Ancho de bandeja</i>	<i>0.305 m</i>
<i>D - Altura de vibrador</i>	<i>0.445 m</i>
<i>E – largo separación de suspensión</i>	<i>0.603 m</i>
<i>F – ancho separación de suspensión</i>	<i>0.438 m</i>

Fuente: Eriez.2012. <http://www.eriez.com/Products/Index/ERV>

Tabla No. 76: Pérdidas de presión por 100 pies de tubería para PVC y CPVC cédula 40.

galones por minuto	½ in.			¾ in.			1 in.			1½ in.			1½ in.			2 in.			3 in.			
	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Pérdida de fricción (psi)	
1	1.13	2.08	0.90	0.63	0.51	0.22																
2	2.26	4.16	1.80	1.26	1.02	0.44	0.77	0.55	0.24	0.44	0.14	0.06	0.33	0.07	0.03							
5	5.64	23.44	10.15	3.16	5.73	2.48	1.93	1.72	0.75	1.11	0.44	0.19	0.81	0.22	0.09	0.49	0.066	0.029	0.03	0.015	0.007	
7	7.90	43.06	18.64	4.43	10.52	4.56	2.72	3.17	1.37	1.55	0.81	0.35	1.13	0.38	0.17	0.69	0.11	0.048	0.49	0.021	0.009	
10	11.28	82.02	35.51	6.32	20.04	8.68	3.86	6.02	2.61	2.21	1.55	0.67	1.62	0.72	0.31	0.98	0.21	0.091	0.68	0.03	0.013	
15		4 in.		9.48	42.46	18.39	5.79	12.77	5.53	3.31	3.28	1.42	2.42	1.53	0.66	1.46	0.45	0.19	1.03	0.07	0.030	
20	0.51	0.03	0.013	12.65	72.34	32.32	7.72	21.75	9.42	4.42	5.59	2.42	3.23	2.61	1.13	1.95	0.76	0.33	1.37	0.11	0.048	
25	0.64	0.04	0.017		5 in.		9.65	32.88	14.22	5.52	8.45	3.66	4.04	3.95	1.71	2.44	1.15	0.50	1.71	0.17	0.074	
30	0.77	0.06	0.026	0.49	0.02	0.009	11.58	46.08	19.95	6.63	11.85	5.13	4.85	5.53	2.39	2.93	1.62	0.70	2.05	0.23	0.10	
35	0.89	0.08	0.035	0.57	0.03	0.013				7.73	15.76	6.82	5.66	7.36	3.19	3.41	2.15	0.93	2.39	0.31	0.13	
40	1.02	0.11	0.048	0.65	0.03	0.013				8.84	20.18	8.74	6.47	9.43	4.08	3.90	2.75	1.19	2.73	0.40	0.17	
45	1.15	0.13	0.056	0.73	0.04	0.017			6 in.	9.94	25.10	10.87	7.27	11.73	5.80	4.39	3.43	1.49	3.08	0.50	0.22	
50	1.28	0.16	0.069	0.81	0.05	0.022	0.56	0.02	0.009	11.05	30.51	13.21	8.08	14.25	6.17	4.88	4.16	1.80	3.42	0.60	0.26	
60	1.53	0.22	0.095	0.97	0.07	0.030	0.67	0.03	0.013				9.70	19.98	8.65	5.85	5.84	2.53	4.10	0.85	0.37	
70	1.79	0.30	0.13	1.14	0.10	0.043	0.79	0.04	0.017							6.83	7.76	3.36	4.79	1.13	0.49	
75	1.92	0.34	0.15	1.22	0.11	0.048	0.84	0.05	0.022							7.32	8.82	3.82	5.13	1.28	0.55	
80	2.05	0.38	0.16	1.30	0.13	0.056	0.90	0.05	0.022			8 in.				7.80	9.94	4.30	5.47	1.44	0.62	
90	2.30	0.47	0.20	1.46	0.16	0.069	1.01	0.06	0.026							8.78	12.37	5.36	6.15	1.80	0.78	
100	2.56	0.58	0.25	1.62	0.19	0.082	1.12	0.08	0.035	0.65	0.03	0.012				9.75	15.03	6.51	6.84	2.18	0.94	
125	3.20	0.88	0.38	2.03	0.29	0.125	1.41	0.12	0.052	0.81	0.035	0.015			10 in.				8.55	3.31	1.43	
150	3.84	1.22	0.53	2.44	0.40	0.17	1.69	0.16	0.069	0.97	0.04	0.017							10.26	4.63	2.00	
175	4.48	1.63	0.71	2.84	0.54	0.235	1.97	0.22	0.096	1.14	0.055	0.024							6.16	2.67		
200	5.11	2.08	0.90	3.25	0.69	0.30	2.25	0.28	0.12	1.30	0.07	0.030	0.82	0.027	0.012			12 in.	7.88	3.41		
250	6.40	3.15	1.36	4.06	1.05	0.45	2.81	0.43	0.19	1.63	0.11	0.048	1.03	0.035	0.015				11.93	5.17		
300	7.67	4.41	1.91	4.87	1.46	0.63	3.37	0.60	0.26	1.94	0.16	0.069	1.23	0.05	0.022							
350	8.95	5.87	2.55	5.69	1.95	0.85	3.94	0.79	0.34	2.27	0.21	0.091	1.44	0.065	0.028	1.01	0.027	0.012				
400	10.23	7.52	3.26	6.50	2.49	1.08	4.49	1.01	0.44	2.59	0.27	0.12	1.64	0.09	0.039	1.16	0.04	0.017				
450				7.31	3.09	1.34	5.06	1.26	0.55	2.92	0.33	0.14	1.85	0.11	0.048	1.30	0.05	0.022				
500				8.12	3.76	1.63	5.62	1.53	0.66	3.24	0.40	0.17	2.05	0.13	0.056	1.45	0.06	0.026				
750							8.43	3.25	1.41	4.86	0.85	0.37	3.08	0.28	0.12	2.17	0.12	0.052				
1000							11.24	5.54	2.40	6.48	1.45	0.63	4.11	0.48	0.21	2.89	0.20	0.087				
1250										8.11	2.20	0.95	5.14	0.73	0.32	3.62	0.31	0.13				
1500										9.72	3.07	1.33	6.16	1.01	0.44	4.34	0.43	0.19				
2000													8.21	1.72	0.74	5.78	0.73	0.32				
2500													10.27	2.61	1.13	7.23	1.11	0.49				

George Fisher. 2012. <http://www.us.piping.georgefisher.com/go>

Tabla No. 77: Pérdidas de presión por 100 pies de tubería para PVC y CPVC cédula 80.

galones por minuto	¾"			¾"			1"			1¼"			1½"			2"			2½"			3"		
	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)	Velocidad (ft/s)	Cabeza de fricción (ft)	Perdida de fricción (psi)
1	1.43	4.02	1.74	0.74	0.86	0.37																		
2	2.95	8.03	3.48	1.57	1.72	0.74	0.94	0.88	0.33	0.52	0.21	0.09	0.38	0.10	0.041									
5	7.89	45.23	19.59	3.92	9.67	4.19	2.34	2.78	1.19	1.30	0.66	0.29	0.94	0.30	0.126	0.56	0.10	0.040	0.39	0.05	0.022	0.25	0.02	0.009
7	10.34	83.09	35.97	5.49	17.76	7.59	3.23	5.04	2.19	1.82	1.21	0.53	1.32	0.55	0.24	0.78	0.15	0.088	0.54	0.07	0.032	0.35	0.023	0.013
10				7.84	33.84	14.65	4.68	9.61	4.16	2.60	2.30	1.00	1.88	1.04	0.45	1.12	0.29	0.13	0.78	0.12	0.052	0.50	0.04	0.017
15				11.76	71.70	31.05	7.01	20.36	8.82	3.90	4.87	2.11	2.81	2.20	0.95	1.63	0.62	0.27	1.17	0.26	0.11	0.75	0.09	0.039
20	0.57	0.04	0.017				9.35	34.68	15.02	5.20	8.30	3.59	3.75	3.75	1.62	2.23	1.06	0.44	1.56	0.44	0.19	1.00	0.15	0.055
25	0.72	0.06	0.026				11.69	52.43	22.70	6.50	12.55	5.43	4.69	5.67	2.46	2.79	1.60	0.69	1.95	0.67	0.29	1.25	0.22	0.095
30	0.86	0.08	0.035	0.54	0.03	0.013	14.03	73.48	31.62	7.80	17.59	7.62	5.63	7.95	3.44	3.35	2.25	0.97	2.34	0.94	0.41	1.49	0.31	0.13
35	1.00	0.11	0.048	0.63	0.04	0.017				9.10	23.40	10.13	6.57	10.58	4.58	3.91	2.99	1.29	2.73	1.25	0.64	1.74	0.42	0.13
40	1.15	0.14	0.061	0.72	0.04	0.017				10.40	29.97	12.98	7.50	13.55	5.87	4.47	3.86	1.66	3.12	1.60	0.89	1.99	0.54	0.23
45	1.29	0.17	0.074	0.81	0.05	0.020				11.70	37.27	16.14	8.44	16.85	7.30	5.03	4.76	2.07	3.51	1.90	0.86	2.24	0.67	0.29
50	1.43	0.21	0.091	0.90	0.07	0.030	0.63	0.03	0.013	13.00	45.30	19.61	9.38	20.48	8.87	5.58	5.79	2.51	3.90	2.42	1.05	2.49	0.81	0.35
60	1.72	0.30	0.13	1.08	0.10	0.043	0.75	0.04	0.017				11.26	28.70	12.43	6.70	8.12	3.52	4.68	3.39	1.47	2.98	1.14	0.49
70	2.01	0.39	0.17	1.26	0.13	0.056	0.88	0.05	0.022							7.82	10.80	4.68	5.46	4.51	1.35	3.49	1.51	0.65
75	2.15	0.45	0.19	1.35	0.14	0.061	0.94	0.06	0.026							8.38	12.27	5.31	5.85	5.12	2.22	3.74	1.74	0.74
80	2.29	0.50	0.22	1.44	0.16	0.069	1.00	0.07	0.030				8 in.			8.93	13.83	5.99	6.24	6.77	2.50	3.99	1.94	0.84
90	2.58	0.63	0.27	1.62	0.20	0.087	1.13	0.08	0.035							10.05	17.20	7.45	7.02	7.18	3.11	4.48	2.41	1.04
100	2.87	0.76	0.33	1.80	0.24	0.10	1.25	0.10	0.043							11.17	20.90	9.05	7.80	8.72	3.78	4.98	2.93	1.27
125	3.59	1.16	0.50	2.25	0.37	0.16	1.57	0.16	0.068	0.90	0.045	0.019						9.75	13.21	5.72	6.23	4.43	1.92	
150	4.30	1.61	0.70	2.70	0.52	0.23	1.88	0.22	0.095	1.07	0.05	0.022						11.70	18.48	8.00	7.47	6.20	2.68	
175	5.02	2.15	0.93	3.15	0.69	0.30	2.20	0.29	0.12	1.25	0.075	0.033										8.72	8.26	3.58
200	5.73	2.75	1.19	3.60	0.88	0.38	2.51	0.37	0.16	1.43	0.09	0.039	0.90	0.036	0.015							9.97	10.57	4.58
250	7.16	4.16	1.81	4.50	1.34	0.58	3.14	0.56	0.24	1.79	0.14	0.61	1.14	0.045	0.02							12.46	16.00	8.93
300	8.60	5.33	2.52	5.40	1.87	0.81	3.76	0.78	0.34	2.14	0.20	0.087	1.36	0.07	0.03									
350	10.03	7.76	3.35	6.30	2.49	1.08	4.39	1.04	0.45	2.50	0.27	0.12	1.59	0.085	0.037	1.12	0.037	0.016						
400	11.47	9.93	4.30	7.19	3.19	1.38	5.02	1.33	0.68	2.86	0.34	0.15	1.81	0.11	0.048	1.28	0.05	0.022						
450				8.09	3.97	1.72	5.64	1.65	0.71	3.21	0.42	0.18	2.04	0.14	0.061	1.44	0.06	0.026						
500				8.99	4.82	2.09	6.27	2.00	0.87	3.57	0.51	0.22	2.27	0.17	0.074	1.60	0.07	0.030						
750							9.40	4.25	1.84	5.36	1.08	0.47	3.40	0.36	0.16	2.40	0.15	0.065						
1000							12.54	7.23	3.13	7.14	1.84	0.80	4.54	0.61	0.26	3.20	0.20	0.11						
1250										8.93	2.78	1.20	5.67	0.02	0.40	4.01	0.40	0.17						
1500										10.71	3.89	1.68	6.80	1.29	0.56	4.81	0.55	0.24						
2000													9.07	2.19	0.95	6.41	0.84	0.41						
2500													11.34	3.33	1.44	8.01	1.42	0.62						
3000																9.61	1.99	0.86						
3500																11.21	2.65	1.15						
4000																12.82	3.41	1.48						

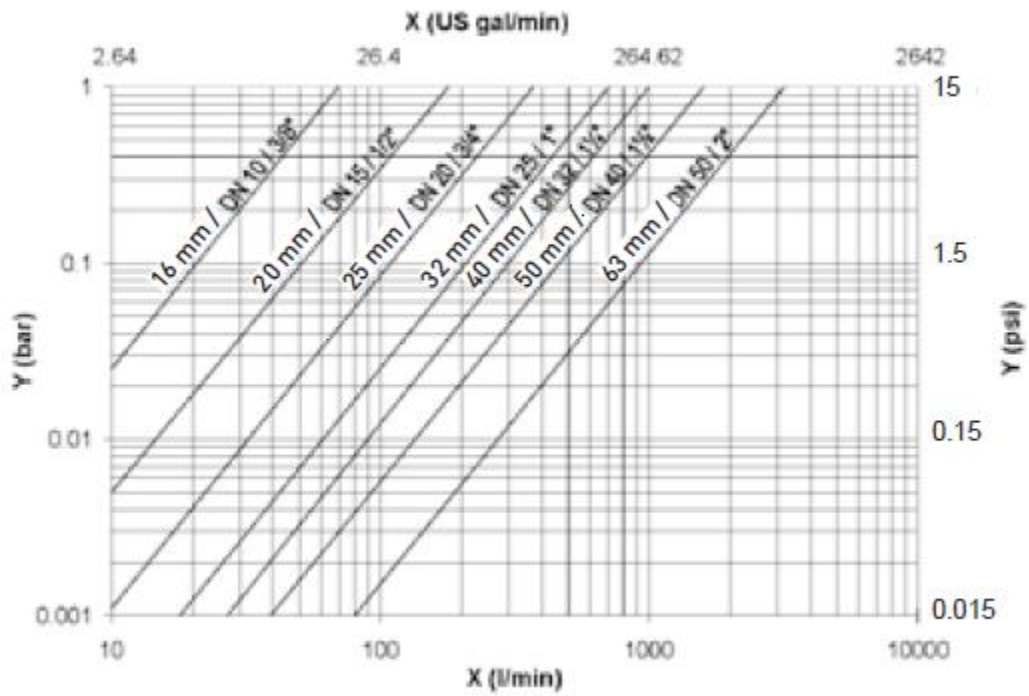
George Fisher. 2012. <http://www.us.piping.georgefisher.com/go>

Tabla No. 78: Correspondiente largo de tubería con misma pérdida de presión que accesorios de PVC cédula 40 y 80.

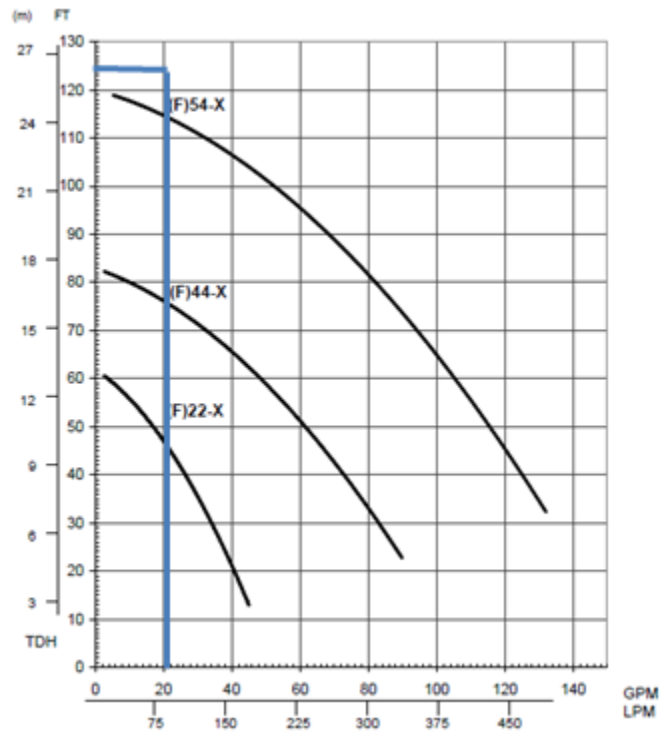
diametro nominal (in)	¾"	½"	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	3½"	4"	6"	8"
Tee descarga lateral	3	4	5	6	7	8	12	15	16	20	22	32	38
codo 90°	1½	1½	2	2¾	4	4	6	8	8	10	12	18	22
codo 45°	¾	¾	1	1¾	1¾	2	2½	3	4	4½	5	8	10
unión	—	½	¾	1	1¼	1½	2	3	3	—	4	6¼	—
adaptador macho - hembra	—	1	1½	2	2¾	3½	4½	—	6½	—	9	14	—

George Fisher. 2012. <http://www.us.piping.georgefisher.com/go>

Gráfica No. 21: Caída de presión por electroválvula George Fisher tipo 133 CPVC y PVC.

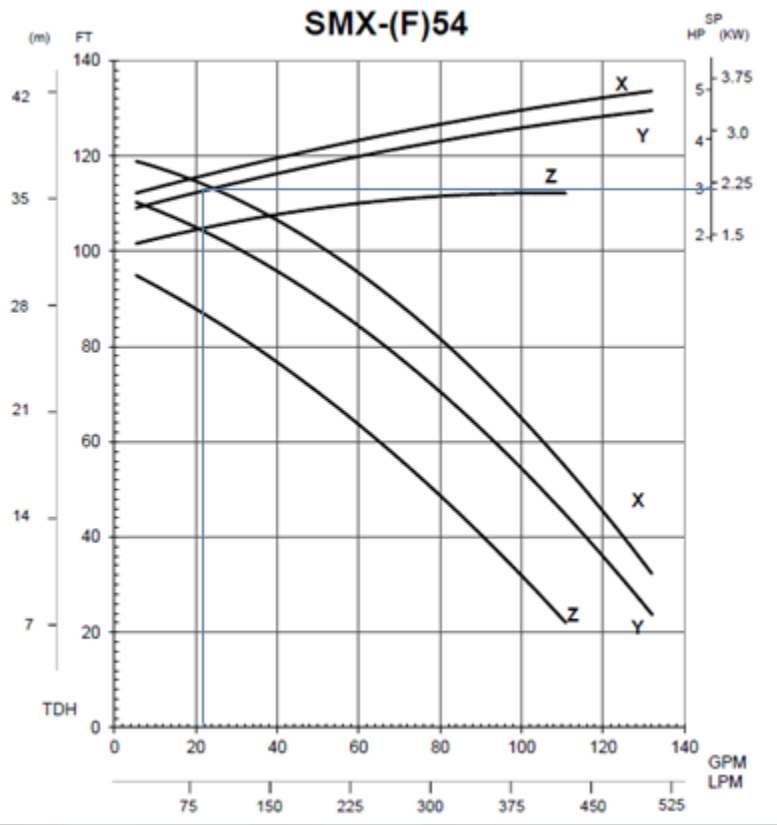


Gráfica No. 22: Familia de bombas IWAKI SMX.



Fuente: IWAKI America ©. 2012. <http://www.iwakiamerica.com/products/smX.htm>

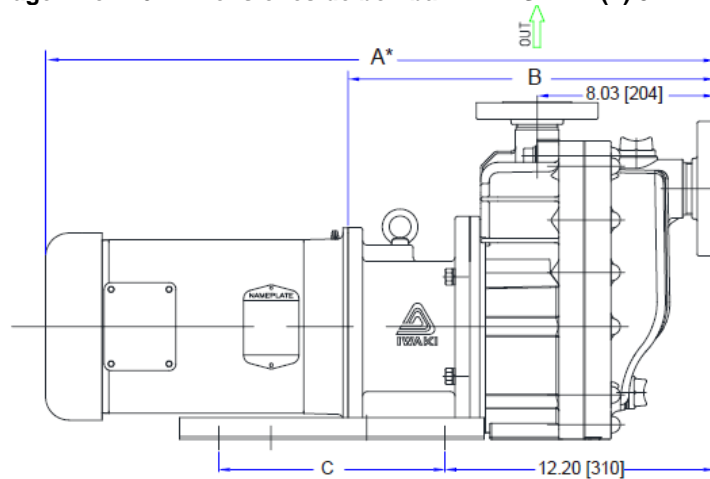
Gráfica No. 23: Curva característica de la familia de bombas SMX – (F) 54 IWAKI.



Modelo	Succión/descarga	Código de impeller	Máxima Capacidad (GPM)	Cabeza (ft)	Motor (RPM)	Motor(HP)
					3500	3
SMX-(F)543	2 x 1½	Z	110	96	3500	3
SMX-(F)545	2 x 1½	Y	132	112		5
SMX-(F)545	2 x 1½	X	132	119		5

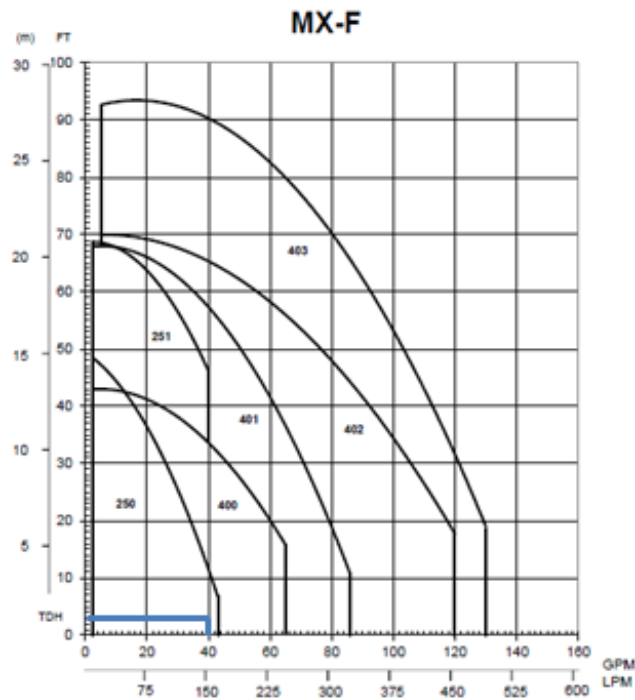
Fuente: IWAKI America ®. 2012. <http://www.iwakiamerica.com/products/smX.htm>

Imagen No. 26: Dimensiones de bomba IWAKI SMX – (F) 54 IWAKI.



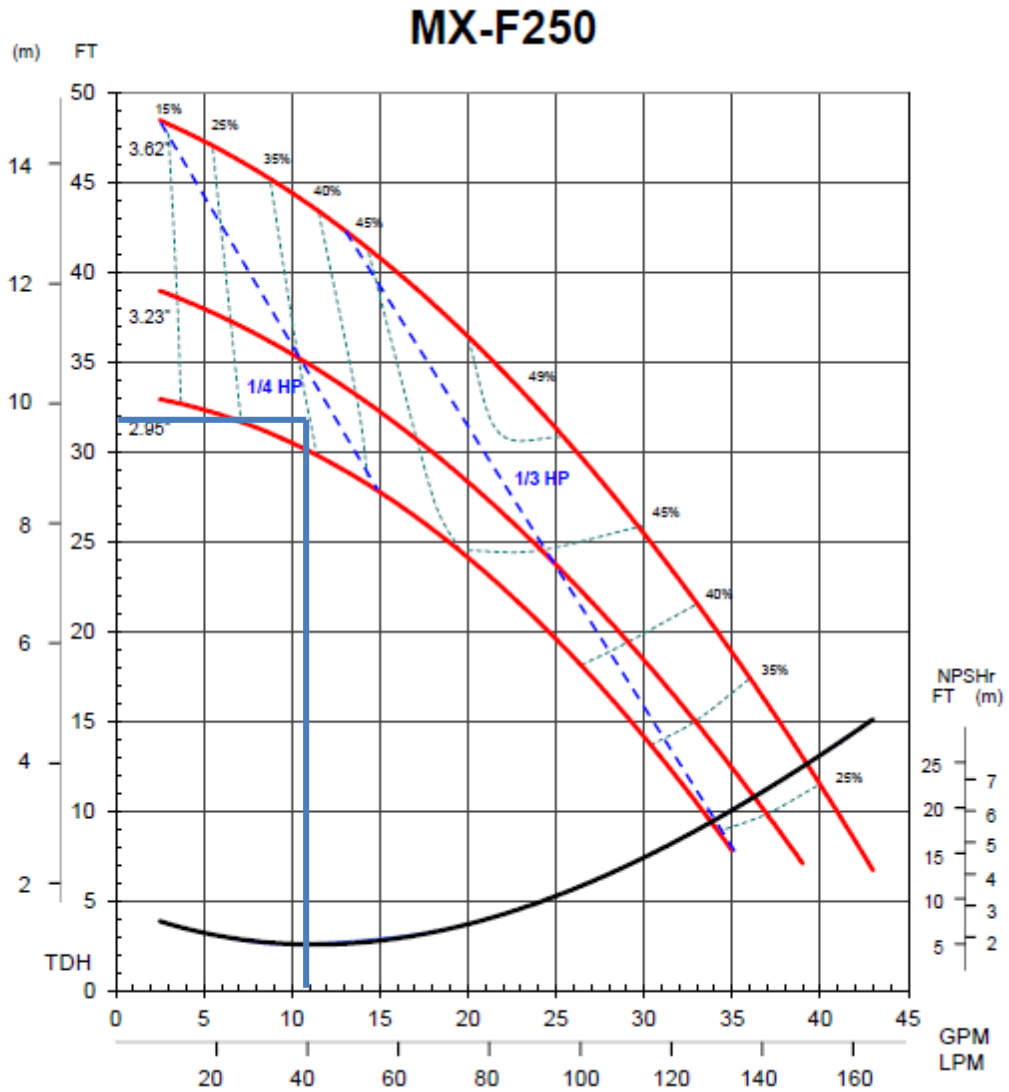
A	769 mm
B	421 mm
C	260 mm
D	230 mm

Gráfica No. 24: Curva de familia de bomba MX- F IWAKI.



Fuente: IWAKI America ©. 2012. <http://www.iwakiamerica.com/products/smX.htm>

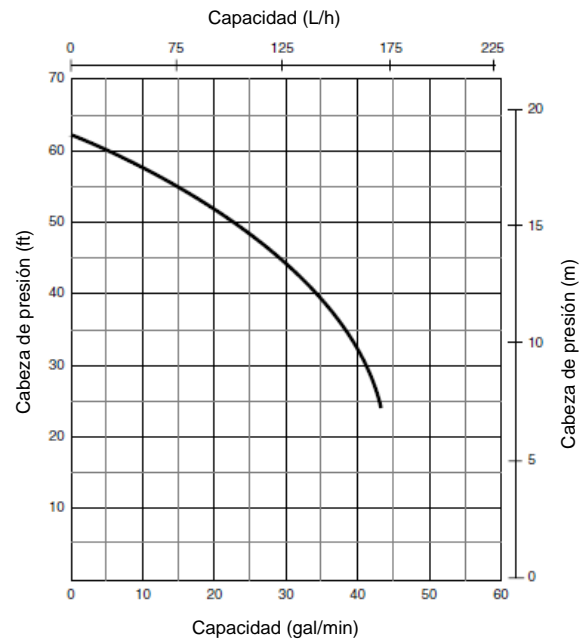
Gráfica No. 25: Curva característica de bomba MX – F250 IWAKI



Modelo	Conexión carga-descarga in (mm)	Presión máxima de descarga ft (m)	Flujo máxima GPM (LPM)	Gravedad específica	Motor a 60Hz HP (kW)
MX-250	1 x 1 (25.4 x 25.4)	53 (16)	40 (151)	1.0	0.5 (.37)

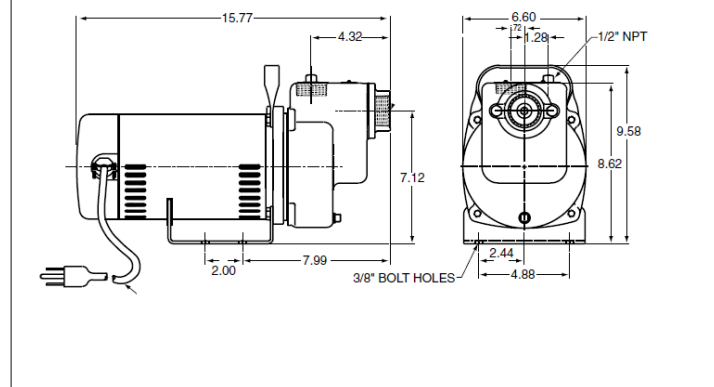
Fuente: IWAKI America ©. 2012. <http://www.iwakiamerica.com/products/mX.htm>

Gráfica No. 26: Curva característica de bomba STA RITE serie DPC 0.5 hp



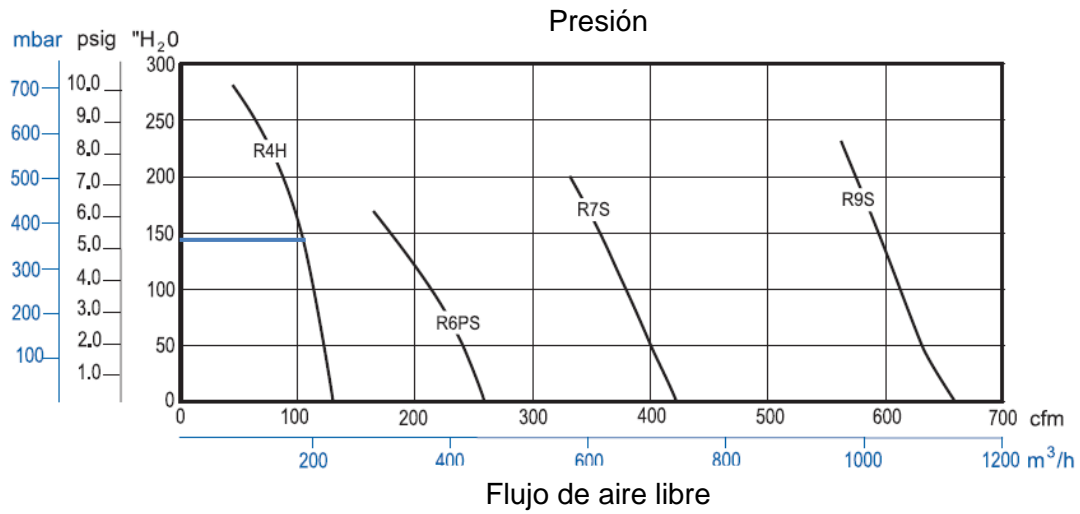
Fuente: STA RITE. 2012. http://www.starite.com/ResidentialProduct_sr_ws_cn_DPC.aspx

Gráfica No. 27: Dimensiones de bomba STA RITE serie DPC 0.5 hp



Fuente: STA RITE. 2012. http://www.sta-ite.com/ResidentialProduct_sr_ws_cn_DPC.aspx

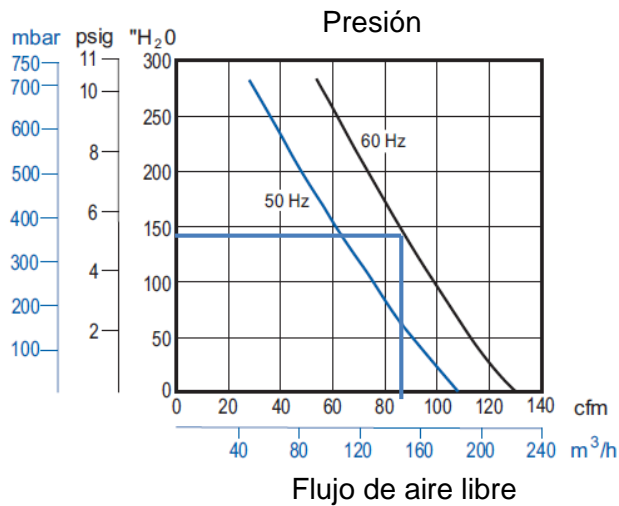
Gráfica No. 28: Curva característica soplador GAST® para altas presiones.



Fuente: Regenair. 2012.

http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

Gráfica No. 29: Curva característica de soplador GAST R4H.



Fuente: Regenair. 2012.

http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

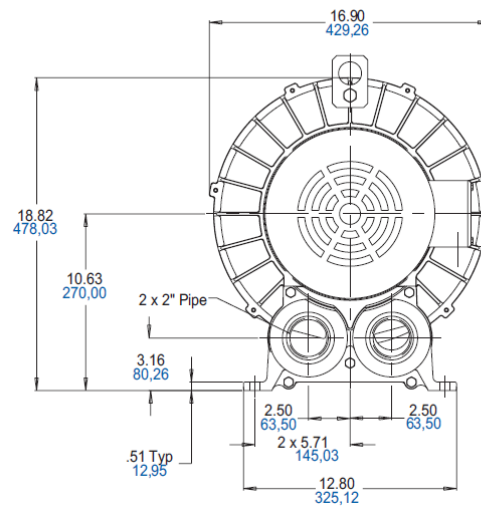
Tabla No. 79: Datos técnicos de soplador GAST R4H.

Número de modelo		R4H3060A
Sello de motor		TEFC
HP/kW	60 Hz	6/4.4
	50 Hz	5/3.7
Voltaje	60 Hz	208-230/460-3
	50 Hz	190-220/380-440-3
Amperaje	60 Hz	19.5-18.2/9.1
	50 Hz	16.8-16.0/8.4-8.0
Amperaje en arranque	60 Hz	83 @ 460V
	50 Hz	72 @ 380V

Fuente: *Regenair. 2012.*

http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

Imagen No. 27: Dimensiones de soplador GAST R4H.



Fuente:

Regenair.

2012.

http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

Tabla No. 80: Tamaño ideal de tubería para flujo de aire de sopladora.

Rango por tubería	0-11 CFM	12-22 CFM	23-44 CFM	45-56 CFM	57-115 CFM	100-160 CFM	150-300 CFM	250-550 CFM
Diámetro de tubería	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"

Fuente: *Regenair.* 2012.
http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

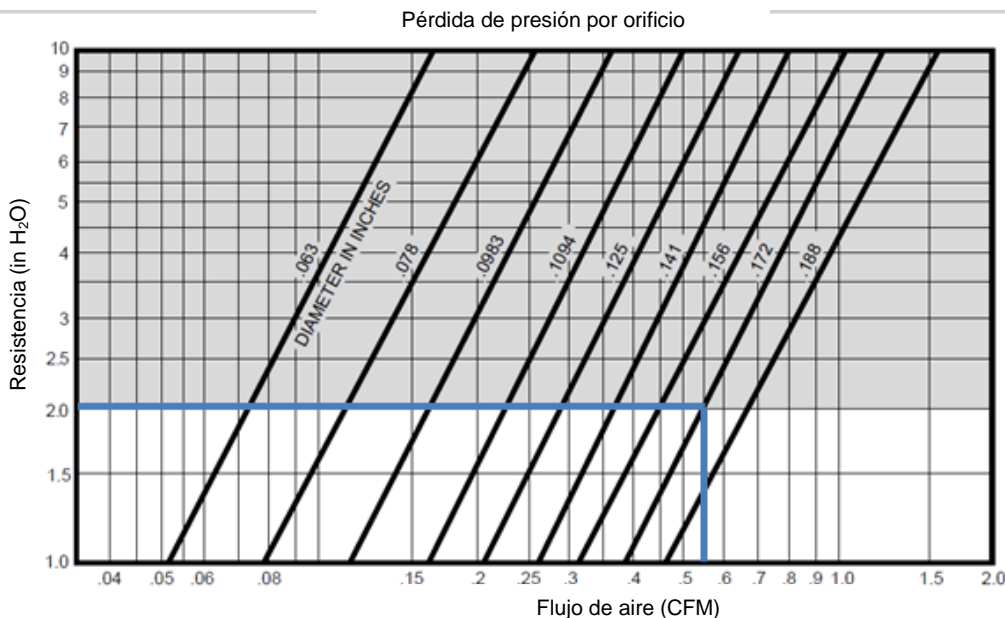
Tabla No. 81: Correspondiente largo de tubería para accesorios.

Supply Pipe Size Conversion Factor

accesorio	#	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"
codo 90°	x	2.0	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0
Tee estándar	x	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	7.0
Tee estándar	x	4.0	5.0	7.0	8.0	10.5	12.5	15.5	20.0
válvula de cheque	x	7.0	9.0	11.5	13.5	17.0	20.5	25.5	34.0
válvula de compuerta	x	.55	.70	.90	1.0	1.5	2.0	2.0	3.0

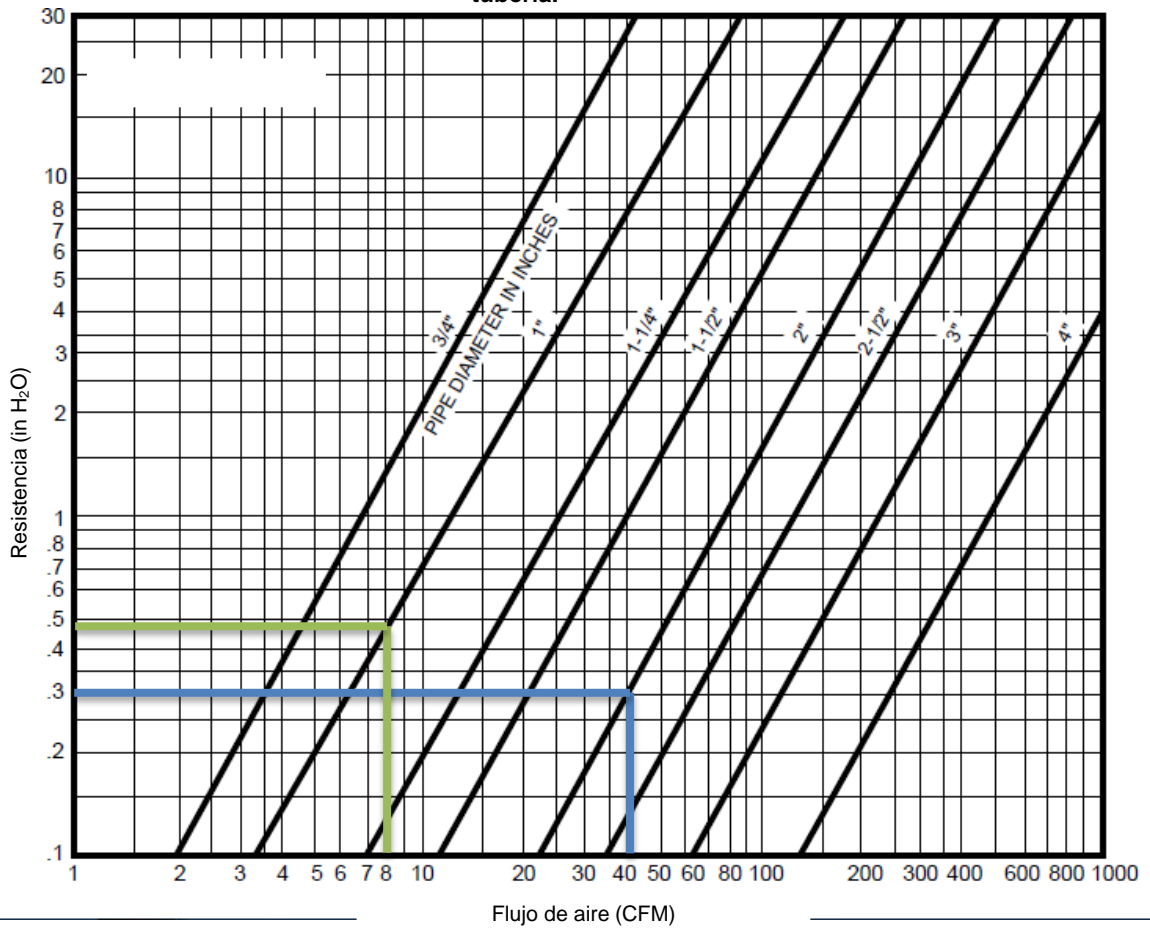
Fuente: *Regenair.* 2012.
http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

Gráfica No. 30: Caída de presión de aire por agujero.



Fuente: *Regenair.* 2012.
http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

Gráfica No. 31: Caída de presión de aire por tubería y accesorios para soplador por cada 10 ft de tubería.



Fuente: *Regenair.* 2012.
http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/GastGroup/Regenair_Regenerative_Blower_Catalog/4414/0

Imagen No. 28: Cotización de tanque de fibra de vidrio para correlacionar inversión de capital



COSTOS:

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
1	Tanque para una capacidad de 79 m3.	\$ 39,320.47	\$ 39,320.47
1	Tanque para una capacidad de 22 m3.	\$ 15,265.31	\$ 15,265.31
1	Escalera de A.C. tipo marina con pintura anticorrosiva para tanque de 79 m3 de capacidad.	\$ 2,695.22	\$ 2,695.22
1	Tapete de poliuretano de 1" de espesor para tanque 22 m3.	\$ 500.00	\$ 500.00
1	Tapete de poliuretano de 1" de espesor para tanque 79 m3.	\$ 560.00	\$ 560.00
2	Transporte de Tampico, Tamaulipas a Hidalgo, Chiapas.	\$ 3,000.00	\$ 6,000.00
		Total USD	\$ 64,341.00

Imagen No. 29: Cotización de bomba IWAKI para relacionar inversión de capital.

Cantidad	Descripción	Unitario	Total
1	Bomba centrífuga de sello magnetico Marca IWAKI modelo MX-F403-RFVX produccion de 51 gpm con 80 pies de carga, succión 2" y descarga en 1.5". Impulsor a 4.96". Materiales de contruccion PTFE/High purity alumina ceramic/FKM (EPDM/AFLAS). Acoplada a motor de 3 Hp, 3500 RPM / 3 / 60 Hz / 230-460v. TENV, Frame 145TC, MTR1018.	Q 23,900.00	Q 23,900.00
		Sub-Total	Q 23,900.00

F. Terminología

g	Gramo
L	Litro
°Be	Grados Baumé
GE	Gravedad específica
k	Conductividad
S	Siemens
H	Entalpía
cP	Centi Poise
hp	Caballos de fuerza
S _T	Desplazamiento de la unidad vibratoria
f	Frecuencia eléctrica
Q	Flujo (másico o volumétrico)
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidad estática
ρ	Densidad
h _f	Pérdida de fricción en tubería
η	Eficiencia del equipo
W _p	Potencia de la bomba a utilizar
cP	Capacidad calorífica
X _A	Porcentaje de conversión
r _A	Velocidad de reacción respecto al componente A.
k	Constante cinética de la reacción
n	Orden de la reacción.
R	Constante universal de los gases (8.314 J/(mol K))
C _{A0}	Concentración inicial de A en la solución.
τ	Espacio tiempo de la reacción.
D _a	Diámetro de impulsor

W	Ancho de impulsor
h	Altura de tanque
D_t	Diámetro de tanque
ΔSG	Diferencia de gravedad específica
F_o	Número de Fourier para determinar agitación por boquilla jet.
θ	Tiempo de mezclado de una tanque
VAN/NPV	Valor actual neto
TIR	Tasa interna de retorno