



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y AMBIENTALES

“Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos”

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

FAUSTO RICARDO BASANTES MONTENEGRO

NILO BAYARDO MONTESDEOCA PICHUCHO

MYRIAN GABRIELA SANTOS TORRES

GUAYAQUIL - ECUADOR

2014

AGRADECIMIENTO

A Dios, a nuestros padres y familiares, a nuestros amigos, que permitieron que culminemos esta etapa de nuestra vida con amor y éxito.

El más profundo agradecimiento a nuestro director de Tesis, Msc. José Guillermo Cárdenas Murillo, por su guía, sus enseñanzas y dedicación.

Al Sr. Arturo Palacios, por su apoyo incondicional y amistad sincera que nos brindo durante y después de la elaboración de esta investigación.

A nuestros profesores y todos los que conforman el ICQA por el soporte brindado no sólo en lo profesional sino también en lo personal.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre Mariana por ser mi apoyo emocional aunque no esté físicamente presente, fue mi mayor ejemplo de perseverancia y dedicación junto con mi abuela Nelly.

A mi novia Vanessa quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

Definitivamente a ustedes amados familiares y amigos.

A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma.

FAUSTO R. BASANTES MONTENEGRO

DEDICATORIA

A mi hija, a mi esposa por la paciencia brindada y por haber sabido sobrellevar mi ausencia en el tiempo que me tocaba estar lejos de casa.

A mis padres, a quienes les debo todo, fueron quienes siempre creyeron en mí y me dieron todo el aporte tanto moral como económico para poder culminar mis estudios lejos de mi ciudad.

A mis hermanos, a mis amigos y en general a todas las personas que de una u otra forma estuvieron conmigo en todo este tiempo

NILO B. MONTESDEOCA PICHUCHO

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y familiares, por brindarme su apoyo de forma incondicional para llegar a la culminación de mis estudios y de todo lo que me he propuesto realizar.

Esta tesis, encierra un esfuerzo grande, se la dedico a Ud. papá por haber sido mi mayor ejemplo de entereza y dedicación, y a Ud. mamá porque ha sido la única responsable de que haga este hermoso sueño realidad.

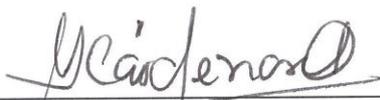
Definitivamente ustedes padres están en mi corazón y en cada una de las páginas de mi tesis, la cual lleva sus nombres.

MYRIAN G. SANTOS TORRES

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



MSc. Oswaldo Valle
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



MSc. José Cárdenas Murillo
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Carlos Balladares Grazzo
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

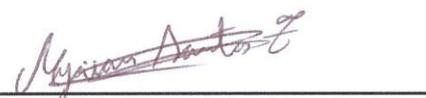
“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”
(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Fausto R. Basantes Montenegro



Nilo B. Montesdeoca Pichucho



Myrian G. Santos Torres

RESUMEN

La evaporación es una operación unitaria de transferencia de calor, muy utilizada en el sector industrial y alimenticio; que consiste en separar un solvente de una solución por la vaporización parcial de éste, con el consecuente aumento en la concentración del soluto en la mezcla, y como producto se obtienen concentrados alimenticios y productos químicos inorgánicos finales. El equipo en el cual se lleva a cabo esta operación unitaria se llama evaporador y su estudio es necesario para el conocimiento de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

El presente proyecto de graduación engloba Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos, construido casi en su totalidad de acero inoxidable y montado sobre un soporte de hierro.

El equipo se encuentra instalado actualmente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química de la ESPOL.

Debido a que este equipo debe ser utilizado para fines didácticos, se escogió el azúcar, una sustancia comúnmente usada en las industrias que utilizan evaporadores, para pruebas en el evaporador.

El evaporador contará con un manual de operación que indica el modo de inicio y finalización de una prueba de laboratorio.

ABREVIATURAS

A	Área
AGA	American Gas Accumulator
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
BTU	British Thermal Units
c40	Cédula 40
c80	Cédula 80
EPE	Elevación del Punto de Ebullición
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
H/N	Hierro negro
HP	Horse Power
INOX	Inoxidable
LOPU	Laboratorio de Operaciones Unitarias
P	Presión
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PSIA	Pounds per Square Inch Absolute
PSI	Pounds per Square Inch
PVC	Policloruro de vinilo
TIG	Tungsten Inert Gas

SIMBOLOGÍA

A	Amperio
Ø	Diámetro
%	Porcentaje
“	Pulgadas
Btu/h ft ² °F	BTU por hora-pie cuadrado- grados Fahrenheit
cm	centímetros
Cu	Cobre
cP	Centipoise
g	gramo
Kg	Kilogramo
Kg/cm ²	Kilogramo por centímetros cuadrados
Kg/h	Kilogramo por hora
Kg/mm ²	Kilogramo por milímetros cuadrados
KJ/kg	Kilojoule por kilogramo
KJ/kg °C	Kilojoule por kilogramo - grados centígrados
KJ/h	Kilojoule por hora
KJ/h m ² °C	Kilojoule por hora-metro cuadrado- grados centígrados
kPa	kilopascal

L	Litro
m	metros
m ²	metros cuadrados
ml	mililitro
mm	milímetro
°BRIX	Grados BRIX
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
P	Poise
Q	Calor
V	Voltios
W	Watts
W/m ² °C	Watts por metro cuadrado - grados centígrados

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIAS	III
RESUMEN	VIII
ABREVIATURAS	IX
SIMBOLOGÍA	X
ÍNDICE GENERAL	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XVIII
ÍNDICE DE TABLAS	XIX
INTRODUCCIÓN	XX
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	1
1. ANTECEDENTES	2
1.1 Justificación	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Metodología Utilizada	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO	10
2. MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO	11
2.1 Evaporación	11

2.2 Factores de la Vaporización.....	11
2.3 Materiales de Construcción	12
2.4 Factores Primarios del Diseño de un Evaporador.....	13
2.4.1 Transferencia de Calor.....	13
2.4.2 Separación Líquido - Vapor	14
2.4.3 Características del fluido a concentrar	16
2.4.4 Elevación del punto de ebullición (EPE).....	16
2.5 Tipos de Evaporadores	17
2.6 Evaporadores de efecto simple	20
2.7 Características de un evaporador de simple efecto.....	23
CAPÍTULO 3: ECUACIONES DE DISEÑO	24
3. ECUACIONES DE DISEÑO	25
3.1 Balance de materia	26
3.2 Balance de energía	27
3.3 Cantidad de calor transferido	29
3.4 Coeficiente global de transmisión de calor	30
3.5 Valores típicos de coeficientes globales en evaporadores	31
3.6 Economía de los evaporadores	32
CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL EVAPORADOR	34
4. DISEÑO DEL EVAPORADOR	35
4.1 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (teórico) .	35
4.2 Cálculo del área de calefacción.....	37

4.2.1 Balance de materia para todo el sistema.....	38
4.2.2 Cálculo de la elevación del punto de ebullición (EPE)	39
4.2.3 Cálculos de las entalpías de alimentación y concentrado	39
4.2.4 Cálculo de la entalpía y temperatura en base al vapor de la solución	41
4.2.5 Cálculo de la entalpía y temperatura en base al vapor de la agua.....	41
4.2.6 Balance de energía para todo el sistema.....	42
4.2.7 Cálculo de la superficie de calefacción	43
4.3 Cálculo del espesor de la carcaza	43
4.4 Cálculo del diámetro del evaporador	44
4.4.1 Distancia entre tubos	45
4.4.2 Arreglo de los tubos.....	45
4.4.3 Tubo central.....	46
4.5 Cálculo del espesor de las placas de centrado (espejos).....	47
4.6 Cálculo de las bridas	48
4.7 Determinación de la altura de la cámara de evaporación	50
4.8 Determinación de los tapones capa	50
4.9 Condensador.....	52
CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO	54

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL EVAPORADOR DE SIMPLE	
EFFECTO	55
5.1 Construcción de la Cámara de Calefacción	55
5.2 Instalación del Sistema Eléctrico	56
5.3 Construcción de la Estructura de Soporte del Evaporador	58
5.4 Instrumentación	59
5.5 Montaje del Evaporador Piloto de Tubos Cortos Verticales de Simple Efecto	59
5.6 Materiales usados en la construcción.....	60
5.6.1 Descripción de Materiales	60
5.6.2 Costos	66
5.7 Mantenimiento del Evaporador Piloto de Tubos Cortos Verticales de Simple Efecto	71
CAPÍTULO 6: MANUAL DE OPERACIÓN.....	73
6. MANUAL DE OPERACIÓN.....	74
6.1 Construcción de la Cámara de Calefacción.....	74
6.2 Preparación de la solución de trabajo.....	77
6.3 Puesta en Marcha del Equipo	77
6.4 Funcionamiento Continuo de la Unidad.....	78
6.5 Toma de muestras de la solución concentrada (producto)	78
6.6 Toma de muestras del condensado	79
6.7 Parada de la Unidad de Evaporación	79

CAPÍTULO 7: EXPERIMENTACIÓN	80
7. EXPERIMENTACIÓN	81
7.1 Pruebas Experimentales de la Unidad Construida	81
7.2 Tratamiento matemático y análisis de los datos experimentales ...	88
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES	99
APÉNDICES	100
BIBLIOGRAFÍA	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología utilizada	9
Figura 2.1 Haz de tubos cortos	21
Figura 2.2 Diagrama simplificado de un evaporador de efecto simple	22
Figura 3.1 Diagrama básico de un evaporador de simple efecto	25
Figura 4.1 Diagrama básico de un Evaporador	38
Figura 4.2 Especificaciones para el dimensionamiento del diámetro de nuestro evaporador	46
Figura 4.3 Dimensiones de las bridas de nuestro evaporador ..	49
Figura 4.4 Dimensiones de los espejo-brida de nuestro evaporador	49
Figura 4.5 Dimensiones de nuestro evaporador	51
Figura 4.6 Dimensiones de nuestro condensador	53
Figura 5.1 Partes del Evaporador	55
Figura 5.2 Arrancador de la Bomba	57
Figura 5.3 Soporte del Equipo	58
Figura 6.1 Vista Lateral del Equipo	74
Figura 6.2 Vista Frontal del Equipo	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 7.1 Concentración vs Tiempo de la Prueba #1	82
Gráfico 7.2 Concentración vs Tiempo de la Prueba #2	83
Gráfico 7.3 Concentración vs Tiempo de la Prueba #3	84
Gráfico 7.4 Concentración vs Tiempo de la Prueba #4	85
Gráfico 7.5 Concentración vs Tiempo de la Prueba #5	86
Gráfico 7.6 Concentración vs Tiempo de la Prueba #6	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Resumen de las Ventajas y Desventajas de los Tipos de Evaporadores.....	19
Tabla II. Coeficientes Globales Típicos de Evaporadores.....	32
Tabla III. Datos Experimentales del Evaporador Piloto	36
Tabla IV. Datos obtenidos de las Tablas de Vapor	36
Tabla V. Costo Total de los Materiales usados en la Construcción	67
Tabla VI. Simbología del Equipo	76
Tabla VII. Datos Obtenidos de la Prueba #1	82
Tabla VIII. Datos Obtenidos de la Prueba #2	83
Tabla IX. Datos Obtenidos de la Prueba #3	84
Tabla X. Datos Obtenidos de la Prueba #4	85
Tabla XI. Datos Obtenidos de la Prueba #5	86
Tabla XII. Datos Obtenidos de la Prueba #6	87
Tabla XIII. Resultado de las Pruebas Experimentales	96

INTRODUCCIÓN

Los procesos químicos consisten en la unión de diversas etapas, independiente del material involucrado en el proceso o de las características del sistema en particular. En el diseño del proceso, cada etapa del mismo se estudia de forma individual, debido a que algunas de ellas, implican reacciones químicas o cambios físicos. Esta división de los procesos químicos en etapas físicas individuales se las conoce como Operaciones Unitarias.

Entre estas Operaciones Unitarias, podemos encontrar procesos que involucran la concentración de los componentes de una mezcla. Uno de esos procesos de separación más utilizado en la industria es la Evaporación, que consiste en separar un solvente de una solución por la vaporización parcial de este, con el consecuente aumento en la concentración del soluto en la mezcla. La evaporación es utilizada en procesos de concentración de soluciones acuosas de azúcar, cloruro de sodio, hidróxido de sodio, glicerina, gomas, leche, jugo de naranja y cualquier otro proceso que involucre la concentración de una solución. En todos estos casos, el producto deseado es la solución concentrada y el agua suele desecharse.

Esta Operación Unitaria se lleva a cabo en un recipiente cerrado denominado evaporador. La mayoría de los evaporadores se calientan con vapor de agua que condensa sobre tubos metálicos.

La carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, dispone de un Laboratorio de Operaciones Unitarias, donde se observan procesos como destilación, filtración, torres de enfriamiento; pero carece de un equipo para la operación unitaria de Evaporación.

Este proyecto de tesis está orientado al Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos, en donde se realizarán prácticas de laboratorio para mejor entendimiento de esta operación. Para ello, se requerirán pruebas experimentales en un evaporador piloto, de tal manera que se conozca las dimensiones requeridas que necesitará nuestro equipo, además de los materiales necesarios para su construcción.

Además se verificará el diseño y construcción del evaporador mediante la obtención de coeficiente global transferencia de calor, el mismo que será comparado con datos de la literatura actualizada.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

A través de los años, se conoce que la Evaporación es un proceso físico indispensable en el ciclo regenerativo del agua y por ende de la vida. Gracias a esta referencia, el hombre ha estudiado este fenómeno para poderlo emplear en sus necesidades cotidianas.

Es a partir de la Edad Media, específicamente, en la Revolución Industrial, que el hombre aplica este fenómeno para la obtención de productos alimenticios. Por ejemplo, para la obtención de sal, se utilizó salmuera, la cual se la colocó en un depósito rectangular, al que se le suministró fuego de combustible por la parte inferior.

En los tiempos de la Revolución Industrial, se empieza a emplear vapor de agua en un equipo conocido como “Máquina de Vapor”, que no es más que un motor de combustión externa que transforma la energía térmica de una cantidad de vapor de agua en energía mecánica o cinética. [1]

Este vapor de agua fue utilizado como medio calefactor para concentrar soluciones diluidas, separar las mismas y obtener productos más valiosos.

Por consiguiente, la Evaporación es considerada como una Operación Unitaria debido a su método de separación de soluciones líquidas de una disolución sólido-líquido mediante ebullición, proceso muy utilizado en la historia y en la actualidad, además es uno de los procesos esenciales en la mayoría de las industrias como: láctea, azucarera, farmacéutica, petroleras y alimenticia.

1.1 Justificación

La Evaporación es una de las Operaciones Unitarias fundamental en cualquier pensum de la carrera de Ingeniería Química y se utiliza en las operaciones de la mayoría de industrias.

Este proceso se lo puede apreciar en un aparato denominado Evaporador, el cual, con el pasar del tiempo, ha sufrido una lenta y continua evolución, para mejorar el rendimiento de esta Operación Unitaria. [2]

Existen diversos tipos de evaporadores, y para nuestro caso nos basaremos en el Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos que sirve para la concentración de ciertos fluidos en la industria y también sirve en la recuperación de solventes orgánicos.

A largo plazo, nuestro proyecto servirá como equipo piloto para futuras prácticas experimentales, y si alguna industria lo requiera, también se lo puede aplicar para diseño de otro evaporador mediante toma de datos experimentales o pruebas de laboratorio; pero el objetivo principal de nuestro proyecto es dotar al Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU) ubicado en la ESPOL en el kilómetro 30,5 Vía Perimetral dentro del campus Gustavo Galindo.

El desarrollo de este proyecto ayudará a los futuros compañeros en las prácticas experimentales que se llevan a cabo dentro de la materia de

Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), materia indispensable en la formación de un Ingeniero Químico, ya que en la actualidad éste laboratorio no cuenta con un Evaporador que sirva para dichas prácticas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar y construir un Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos para ser utilizado en las prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Elegir los materiales apropiados para la construcción del Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos.
- Determinar los coeficientes globales de transferencia de calor.
- Calcular la capacidad del Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos mediante la experimentación tratando 60 kg/h de una solución azucarada a 14 °BRIX.
- Calcular la eficiencia de evaporación del equipo construido.

- Elaborar un manual de operación del equipo para su uso en las clases de Operaciones Unitarias.

1.3 Metodología Utilizada

- **FASE 1. INVESTIGACIÓN DE OTROS PROYECTOS**

Esta fase comprende la recopilación de información de diversas fuentes acerca del equipo, procedente de trabajos de tesis sobre evaporadores, que fueron realizadas en otras universidades; además de libros que describen dicha operación unitaria. [4]

Uno de los métodos que se emplea en estos proyectos de tesis es el método analítico, mediante la obtención de datos experimentales como el tiempo, la concentración, la temperatura y la presión; variables que son controladas durante el proceso industrial [3] y ecuaciones de balance de materia y energía que se utilizan para determinar las dimensiones de un evaporador piloto.

Asimismo, se menciona que el material de construcción más utilizado para este equipo es el acero inoxidable [1], por su alta resistencia a la corrosión, a temperaturas elevadas y propiedades higiénicas.

Además de este material, también se puede emplear acero, hierro, cromo o níquel, cuya selección dependerá de las características del líquido a concentrar. [4]

Con esta información obtenida de estas fuentes, se procede a realizar los cálculos pertinentes para el correcto dimensionamiento del evaporador de simple efecto.

- **FASE 2. PRUEBAS, CÁLCULOS Y VERIFICACIÓN**

Esta fase consiste en el desarrollo de pruebas experimentales en un evaporador piloto, con la finalidad de determinar las dimensiones de nuestro evaporador de simple efecto.

El evaporador piloto para las pruebas experimentales se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Guayaquil ubicado en la Cdla. Universitaria Salvador Allende en la Facultad de Ingeniería Química.

En estas prácticas, se empleó una solución de agua azucarada al 2% a una presión manométrica de 5 psia y presión atmosférica de la ciudad de Guayaquil (14,696 psia).

Con estos datos, se procede a determinar el coeficiente global de transferencia de calor, U , que, para este tipo de evaporador, se encuentra entre 3000 - 10500 kJ/h m²°C. [4]

Luego, se verifica si el coeficiente de operación cumple con el rango especificado.; si es así, entonces se determina el área de la cámara de evaporación y las dimensiones de las demás partes del evaporador.

- **FASE 3. ADQUISICIÓN DE MATERIALES, CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS**

Esta fase consiste en la compra de los materiales necesarios para la construcción del equipo; como las planchas de acero inoxidable que servirán para la elaboración del evaporador de simple efecto; tuberías y accesorios de hierro negro y acero inoxidable para la entrada y salida de vapor, tuberías y accesorios para la entrada de alimentación y ángulos de hierro para la construcción de la estructura de soporte para el equipo.

Cabe indicar que también se necesita de la soldadura para acoplar las partes del evaporador y la formación de la estructura de soporte; también se necesita la instalación eléctrica para el funcionamiento de la bomba de alimentación. Por lo tanto, se necesita personal calificado para realizar estas labores.

Luego de la compra y construcción del equipo, se realizarán pruebas experimentales que determinen el coeficiente global de

transferencia de calor, la capacidad y eficiencia del equipo con su respectivo análisis.

- **FASE 4. ENTREGA DEL EQUIPO Y REDACCIÓN DE TESIS**

Esta fase consiste en la entrega del Evaporador de Simple Efecto al Laboratorio de Operaciones Unitarias para uso de los estudiantes y profesores en prácticas experimentales con su respectivo manual de operaciones.

Finalmente, se procede a la redacción del proyecto de tesis.

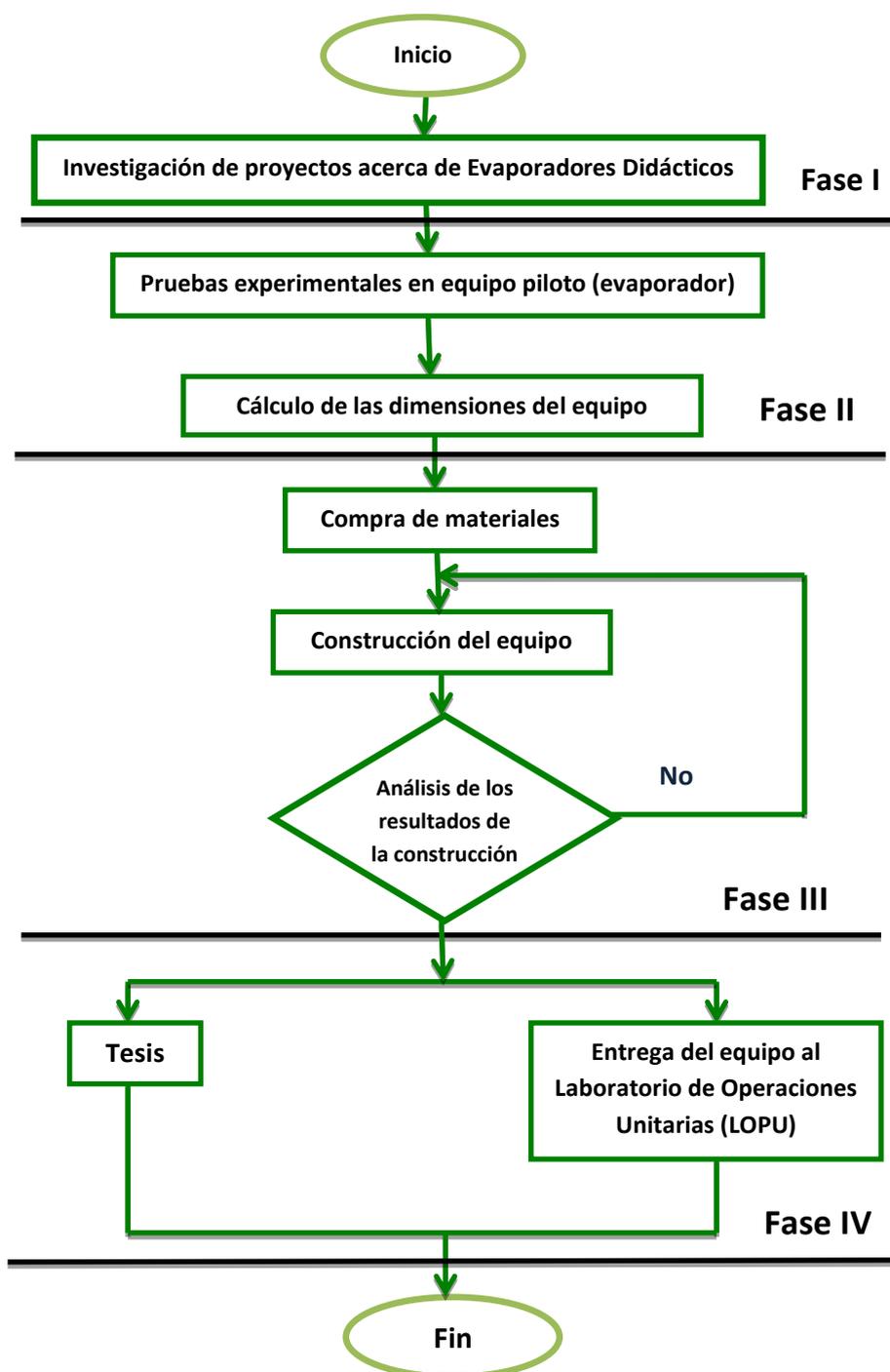


Figura 1.1: Metodología utilizada
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO

2. MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO

2.1 Evaporación

El proceso de evaporación se fundamenta en la eliminación de un líquido de una solución, suspensión o emulsión por tratamientos térmicos. Se dice entonces, que la solución, suspensión o emulsión se está concentrando, y para lograr dicho propósito debemos suministrar una fuente de calor externo; esta fuente calórica se logra generalmente con vapor de agua, el cual se pone en contacto con el producto a través de una superficie calefactora. [5]

2.2 Factores de la vaporización

Para que la vaporización se dé en forma continua, debe tener dos condiciones:

1. El calor para el proceso de vaporización debe suministrarse de forma continua
2. El equilibrio que se forma entre la presión de vapor del líquido y su presión parcial en el espacio circunvecino debe destruirse de manera continua

De no cumplirse, cualquiera de estas condiciones la vaporización será retardada o interrumpida. [6]

En cualquier sistema de evaporación se debe instalar:

1. Suministro de vapor de agua a la superficie de calentamiento
2. Medios para eliminar el condensado y los gases incondensables
3. Espacio de desprendimiento para la separación del vapor del líquido en ebullición
4. Medios para la admisión y remoción de la solución a concentrarse
5. Sistema para la eliminación del vapor desprendido

2.3 Materiales de Construcción.

Para seleccionar el material a construcción, se considera los siguientes parámetros: [7]

- Tendencias corrosivas y erosivas del fluido en el proceso
- Aplicación industrial
- Recursos económicos factibles
- De acuerdo a la predilección del cliente

2.4 Factores Primarios del Diseño de un Evaporador

Existen elementos principales que rigen el diseño de los evaporadores tales como:

2.4.1 Transferencia de Calor

Consideramos la transferencia de calor el factor más importante en el diseño de un evaporador debido a que la superficie de calentamiento representa la mayor parte del costo de un evaporador, generalmente el costo total de un evaporador está relacionado en función de los m² de área de calentamiento, materiales de construcción y tipo de evaporador.

La trasmisión de calor en evaporadores es expresado más comúnmente en términos de la ecuación:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (Ec. 2.1)$$

De donde:

Q: Cantidad de calor transferido al evaporador (kJ/h)

U: Coeficiente global de transferencia de calor (kJ/h m² °C)

A: Área de transferencia de calor (m²)

ΔT: Diferencia útil de temperatura (°C)

El coeficiente de transmisión de calor (U) en la mayoría de los tipos de evaporadores es una fuerte función de las diferencias de temperatura ΔT .

La experiencia ha demostrado que U depende de las propiedades de la solución, del medio de calentamiento y de la geometría de la superficie y del tipo de evaporador.

Con respecto al área de calefacción "A", es la superficie a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor medida sobre el líquido. En un evaporador ya construido el valor de este factor es fijo e independiente de las condiciones de operación.

La diferencia de temperaturas (ΔT) entre el vapor condensante y el líquido hirviente es función de los siguientes factores: Las condiciones del vapor de calefacción, la presión de la cámara de evaporación, la concentración de la disolución. [8]

2.4.2 Separación Líquido – Vapor

Dentro del diseño de un evaporador de cualquier tipo, la separación líquido – vapor constituye en sí, una parte importante dentro de la construcción del evaporador, ya que suministra calor para que se realice la evaporación se debe recuperar o separar los vapores del líquido.

Las cámaras de separación de vapor son diseñadas para:

- Lograr máxima capacidad
- Disminuir arrastre y
- Permitir la operación sanitaria del equipo.

Cuando un líquido hierve, los vapores forman burbujas en la superficie del líquido; al reventar se producen gotitas las que originan lo que se conoce como arrastre. El arrastre no es otra cosa que la salida de gotas de líquido del evaporador, debido al hecho que la velocidad del vapor es mayor que la rapidez con que se sedimentan las gotas.

La espuma implica alguna propiedad especial del líquido que se hace que se forme una masa de burbujas estables.

Si una gota es arrastrada desde la superficie de un líquido a una masa de vapor, se elevará hasta cierta altura y luego empezara a caer, teniendo fundamento esto, el aumento de la cámara de vapor situada encima de un líquido en ebullición disminuye el arrastre de las gotas mayores, pero no produce ningún efecto sobre las muy pequeñas. [8]

2.4.3 Características del fluido a concentrar

Las características físicas y químicas del fluido, al cual se desea evaporar son claves para la selección del evaporador. La viscosidad es una de ellas, ya que se considera en el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, esto conlleva a afectar directamente al área de transferencia de calor.

Todas estas características se relacionan entre más alta sea la viscosidad, más bajo será el coeficiente y más grande el área. [7]

2.4.4 Elevación del punto de ebullición (EPE)

La elevación del punto de ebullición de una solución, en la cual hay presencia de un sólido disuelto, dependerá de la concentración y la presión hidrostática añadida por la altura que tenga la columna del líquido a evaporar. Dado que las dimensiones de los equipos a escala piloto son pequeñas, la elevación del punto de ebullición por presión hidrostática se considera despreciable. [9]

Para una solución azucarada, la elevación del punto de ebullición por concentración ha sido un campo bastante explorado, existiendo nomogramas y ecuaciones de diversos autores cuyo fin ha sido lograr una mayor precisión mediante la consideración

de diversas variables. Sin embargo, Hugot (1986) presenta una ecuación bastante sencilla para determinar la elevación del punto de ebullición de una sustancia azucarada pura considerando el grado brix y la presión de trabajo a la que se encuentra. Dicha ecuación es la siguiente: [10]

$$EPE = 0,025B \left(\frac{30 + B}{103,6 - B} \right) \left(1 - \frac{0,54 h}{229 - h} \right) \quad (Ec. 2.2)$$

De donde:

B: Concentración másica de sacarosa

h: Vacío al cual está sometido el fluido (cm Hg)

2.5 Tipos de Evaporadores

Los evaporadores se clasifican en dos grandes grupos: de circulación natural y de circulación forzada.

A su vez los **evaporadores de circulación natural** se dividen de la siguiente manera: [11]

- Tubos horizontales
- Tubos verticales con canasta
- Cámara de calefacción con tubos verticales
- Evaporadores con chaqueta externa

Los **evaporadores de circulación forzada** se utilizan para líquidos viscosos, para los que forman sales, y las soluciones que tienden a incrustarse.

Los evaporadores de este tipo se dividen en gran variedad de arreglos y se clasifica en: [11]

- Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor vertical
- Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor externo vertical
- Evaporadores de película descendente
- Evaporadores de película ascendente

TABLA I: RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE EVAPORADORES

TIPO DE EVAPORADOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS	MEJORES APLICACIONES	DIFICULTADES
CIRCULACION FORZADA	<ul style="list-style-type: none"> *Coeficientes de transferencia de calor elevados. *Circulación positiva. *Libertad relativa de ensuciamiento 	<ul style="list-style-type: none"> *Costo elevado *Energía necesaria para la bomba de circulación. *Tiempo de residencia o retención relativa alto 	<ul style="list-style-type: none"> *Productos cristalinos. *Soluciones corrosivas. *Soluciones viscosas. 	<ul style="list-style-type: none"> *Atascamiento de de las entradas de los tubos por deposiciones de sales. *Mala circulación, debido a pérdidas de cargas más altas que las esperadas. *Formación de deposiciones de sales, debido a la ebullición en los tubos. *Corrosión y erosión.
VERTICALES DE TUBO CORTO	<ul style="list-style-type: none"> *Coeficientes de transferencia de calor elevados con diferencias altas de temperatura. *Espacio superior bajo. *Libertad relativa de ensuciamiento *Eliminación mecánica sencilla de las escamas. *relativamente poso costoso. 	<ul style="list-style-type: none"> *Mala transferencia de calor con diferencias bajas de temperaturas y a Temp. Bajas. *Espacio elevado de terreno y peso alto. *Retención relativamente alta. *Mala transferencia de calor con líquidos viscosos. 	<ul style="list-style-type: none"> *Líquidos limpios. *Productos cristalinos. *Líquidos relativamente no corrosivos, puesto que el cuerpo es grande y costoso, si se construye de materiales que no sean hierro colado o acero dulce. *Soluciones con formación ligera de escamas, que requieren una limpieza mecánica, puesto que los tubos son cortos y de diámetros grandes. 	
VERTICALES DE TUBO LARGO	<ul style="list-style-type: none"> *Bajo costo. *Superficie amplia de calentamiento en un cuerpo. *baja retención. *Necesidad de poco espacio de terreno. *Buenos coeficientes de transferencia de calor con diferencias razonables de temperaturas (Película ascendente) *Buenos coeficientes de transferencia de calor a todas las diferencias de temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> *Espacio superior elevado. *No son adecuados para liq. que forman deposiciones de sales o escamas. *Requiere recirculación para la versión de película descendente 	<ul style="list-style-type: none"> *Con líquidos limpios. *Con líquidos espumosos. *Con soluciones corrosivas. *Con grandes cargas de evaporación. *Con diferencias elevadas de temperatura (Ascendente) Con diferencias bajas de temperaturas (descendentes) 	<ul style="list-style-type: none"> *Sensibilidad de las unidades de película ascendente a los cambios de las condiciones operacionales. *Mala distribución de l material de alimentación a las unidades de película descendente.
TUBO HORIZONTAL	<ul style="list-style-type: none"> *Espacio superior muy bajo. *Buenos coeficientes de transferencia de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> *No son adecuados para los líquidos que dejan deposiciones de sales. *Inapropiados para los líquidos que forman escamas. *Costo elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> *Espacio superior elevado. *Pequeña capacidad. Líquidos que no formen deposiciones de sales o escamas. 	

Fuente: Msc. Zoila Pontiles De Hernández / Área de Tecnología / Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (Venezuela).

2.6 Evaporadores de efecto simple.

En los evaporadores de un solo paso, el líquido de alimentación pasa sólo una vez a través de los tubos, desprende el vapor y sale de la unidad como líquido concentrado. Toda la evaporación se produce en un único paso. [11]

Estos evaporadores, son especialmente útiles para el tratamiento de materiales sensibles al calor. Con un solo paso rápido a través de los tubos, el líquido concentrado está durante un corto periodo de tiempo a la temperatura de evaporación, y se puede enfriar bruscamente a medida que abandona el evaporador. [11]

Los evaporadores de efecto simple se usan con frecuencia cuando la capacidad necesaria de operación es relativamente pequeña o el costo del vapor es relativamente barato comparado con el costo del evaporador. Sin embargo al usar más de un efecto, reducirá de manera significativa los costos del vapor.

El tipo de evaporador de simple efecto que usamos en esta tesis es de tubos verticales cortos, el mismo que se puede ser del tipo cámara de calefacción, el cual consiste en un haz de tubos verticales colocados entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador. (Ver figura 2.1)



Figura 2.1 Haz de tubos cortos
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

Esta circulación natural incrementa el coeficiente de transferencia de calor.

El vapor fluye por fuera de los tubos por lo que el vapor se condensa en el exterior, los tubos verticales van colocados en soportes ubicados interiormente en el contenedor metálico. El haz de tubos es desmontable y de fácil limpieza.

Generalmente se diseñan con el fondo cónico y se puede o no instalar un agitador para aumentar la circulación. Este tipo se usa para licores que tienen tendencia a la incrustación.

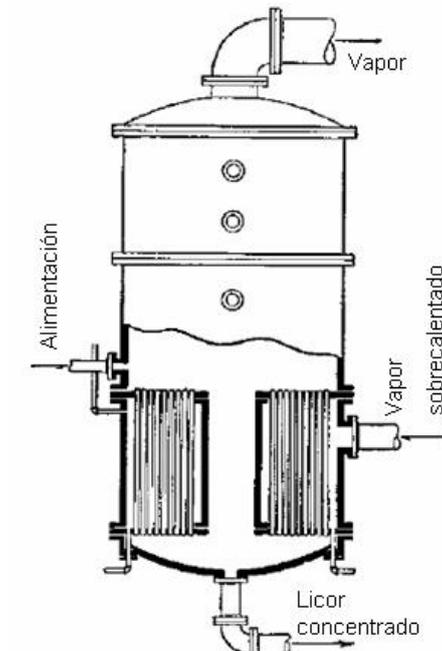


FIGURA. 2.2. Diagrama simplificado de un evaporador de efecto simple.

Fuente: Geankoplis C.J., Procesos de transporte y operaciones unitarias, Año 1998

Al aumentar los efectos, aumenta la calidad del producto que se requiere, por la eliminación continua del agua. Los evaporadores pueden ser de efecto simple o multi-efectos. Estos arreglos permiten el aprovechamiento del calor del vapor generado en el evaporador.

2.7 Características de un evaporador de simple efecto

Las características más comunes de un evaporador de simple efecto se describen a continuación:

- El líquido de alimentación pasa una sola vez a través de los tubos, desprende el vapor y sale de la unidad como líquido concentrado.
- Son especialmente útiles para el tratamiento de materiales sensibles al calor, y operando con un vacío elevado se puede mantener el líquido a baja temperatura.
- Con un solo paso rápido a través de los tubos, el líquido concentrado está durante un corto período de tiempo a la temperatura de evaporación y se puede enfriar bruscamente a medida que abandona el evaporador.
- Los evaporadores de película: agitada, ascendente y descendente también pueden operar de esta forma.

CAPÍTULO 3

ECUACIONES DE DISEÑO

3. ECUACIONES DE DISEÑO

Las ecuaciones de diseño son la manera matemática de diseñar y construir un equipo para la operación unitaria, en nuestro caso un evaporador de simple efecto.

Las ecuaciones de diseño presentadas a continuación han sido establecidas desde hace muchos años en este tipo de construcción. Nosotros nos hemos basado en las ecuaciones de diseño que son de conocimiento general para las personas que saben acerca de las operaciones de transmisión de calor y evaporación.

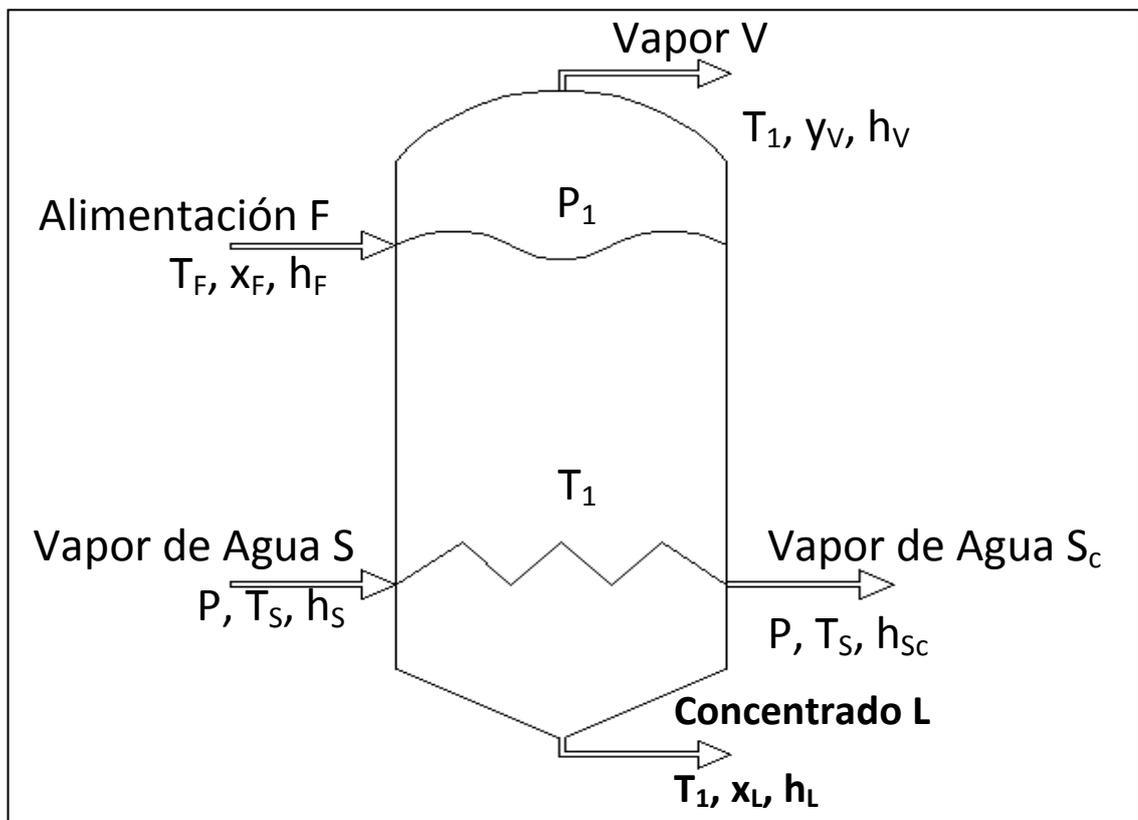


Figura 3.1 Diagrama básico de un evaporador de simple efecto

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

3.1 Balance de materia

El concepto general para todo balance de materia es “entrada menos salida igual a acumulación”, considerando esto y tomando como referencia la imagen 3.1, podemos deducir que:

$$F + S = L + V + S_C \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Ahora considerando que el vapor de agua que entra a la cámara de calefacción sale como vapor de agua condensado, tenemos que:

$$S = S_C \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Por lo tanto la ecuación 3.1 nos quedará de la siguiente manera:

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 3.3})$$

La ecuación 3.3 es lo que se conoce como el balance global de materia para un evaporador de simple efecto; también podemos formar el balance de soluto, esto en base a las concentraciones de entrada y de salida de la solución que se evapora:

$$Fx_F = Lx_L + Vy_V \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Al considerarse el proceso de evaporación como eficiente, podemos asumir que no habrá arrastre alguno de soluto en el vapor, entonces:

$$y_V = 0 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Reemplazando la ecuación 3.5 en 3.4, nos quedará:

$$Fx_F = Lx_L \quad (\text{Ec. 3.6})$$

De donde:

F: Flujo de alimentación que entra al evaporador (kg/h)

S: Vapor de agua que entra a la cámara de calefacción (kg/h)

L: Flujo del líquido concentrado que sale del evaporador (kg/h)

V: Vapor de la solución que sale del evaporador (kg/h)

S_C: Vapor de agua condensado que sale de la cámara de calefacción (kg/h)

x_F: Concentración inicial de la solución

x_L: Concentración final de la solución

3.2 Balance de energía

Si asumimos que no existen pérdidas de calor (convección y radiación) hacia los alrededores, el balance de energía es: [12]

$$Fh_F + Sh_S = Lh_L + Vh_V + S_c h_{S_c} \quad (Ec. 3.7)$$

Reemplazando la ecuación 3.2 tenemos que:

$$Fh_F + S(h_S - h_{S_c}) = Lh_L + Vh_V \quad (Ec. 3.8)$$

El vapor de agua que entra a la cámara de calefacción está a una temperatura T_S y una entalpía h_S, así mismo se asume que el vapor de agua condensado sale a una temperatura T_S y con una entalpía h_{S_C}, esto nos indica que el vapor de agua sólo transfiere su calor latente, es decir, solo cambia de fase pero no de temperatura, por lo tanto:

$$\lambda_S = h_S - h_{Sc} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Reemplazando la ecuación 3.9 en 3.8:

$$Fh_F + S\lambda_S = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 3.10})$$

De donde:

h_F : Entalpía específica de la alimentación (kJ/kg)

λ_S : Calor latente del vapor de agua (kJ/kg)

h_L : Entalpía específica del líquido concentrado (kJ/kg)

h_V : Entalpía específica del vapor de la solución (kJ/kg)

El calor latente del vapor de agua y la entalpía del vapor de la solución pueden determinarse de las tablas de vapor de agua (Apéndice A) por medio de las temperaturas T_S y T_1 , respectivamente. Sin embargo la entalpía de la alimentación y la entalpía del líquido concentrado no se conocen generalmente, pero se pueden estimar si se conocen sus calores específicos usando las siguientes fórmulas:

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 3.12})$$

De donde:

cp_F : Calor específico de la alimentación (kJ/kg °C)

T_F : Temperatura de entrada de la alimentación (°C)

c_{pL} : Calor específico del líquido concentrado (kJ/kg °C)

T_1 : Temperatura de ebullición del líquido concentrado (°C)

T_{Ref} : Temperatura de referencia, generalmente es 0 °C

3.3 Cantidad de calor transferido

En un evaporador la cantidad de calor que se transfiere a la solución a concentrar es suministrado por el vapor de agua que entra a la cámara de calefacción, y como ya se explicó anteriormente este vapor de agua solo cambia de estado, es decir, solo transfiere su calor latente, por lo tanto la cantidad de calor a transferir se expresa como:

$$Q = S \cdot \lambda_s \quad (Ec. 3.13)$$

De donde:

Q: Cantidad de calor transferido al evaporador (kJ/h)

Es posible conocer también la cantidad de calor que ingresa a un aparato de evaporación, a través de la ecuación de diseño, y es la que generalmente se usa por estar en función de términos que son conocidos de antemano en un evaporador ya diseñado y probado. [8]

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (Ec. 2.1)$$

3.4 Coeficiente global de transmisión de calor

La capacidad de un evaporador está afectada tanto por la caída de temperatura como por el coeficiente global de transferencia de calor. La caída de temperatura está fijada por las propiedades del vapor de agua y del líquido que hierve y, excepto por lo que respecta a la carga hidrostática, no depende de la construcción del evaporador. Por otra parte, el coeficiente global está fuertemente influenciado por el diseño y la forma de operación del evaporador. [4]

La resistencia global a la transmisión de calor entre el vapor de agua y el líquido en ebullición es la suma de cinco resistencias individuales: la resistencia de la película de vapor; las dos resistencias de las costras, interior y exterior de los tubos; la resistencia de la pared del tubo; y la resistencia del líquido en ebullición. El coeficiente global es el inverso de la resistencia total. En la mayoría de los evaporadores el factor de ensuciamiento del vapor de agua condensante y la resistencia de la pared del tubo, son muy pequeños, y generalmente pueden despreciarse en el cálculo de evaporadores. [4]

Debido a la dificultad de medir los elevados coeficientes de película individuales en un evaporador, los resultados experimentales generalmente se expresan en función de los coeficientes globales, que están basados en la caída neta de temperatura corregida para tener en cuenta la elevación del punto de ebullición. Los coeficientes

globales están, por supuesto, influenciados por los mismos factores que los coeficientes individuales; pero, sí una resistencia (tal como la de película del líquido) es controlante, variaciones importantes de las demás resistencias apenas tendrían efecto sobre el coeficiente global.

[4]

Cabe indicar que la determinación detallada del coeficiente global de transferencia de calor no es el tema a tratar en nuestra tesis, y para la construcción de nuestro evaporador, nosotros determinamos éste valor realizando una práctica en un evaporador piloto, determinación que se explicará más detalladamente en el capítulo 4.

3.5 Valores típicos de coeficientes globales en evaporadores

En la siguiente tabla, se presentan coeficientes globales típicos para diferentes tipos de evaporadores. Estos coeficientes se aplican a condiciones en los que ordinariamente operan los distintos evaporadores. [4]

TABLA II: COEFICIENTES GLOBALES TÍPICOS DE EVAPORADORES

Tipo	Coeficiente global U	
	BTU/h ft ² °F	W/m ² °C
Evaporadores de tubos verticales largos:		
Circulación natural	200 - 600	1000 - 3000
Circulación forzada	400 - 1000	2000 - 5000
Evaporadores de película agitada, líquido newtoniano, viscosidad:		
1 cP	400	2000
1P	300	2000
100 P	120	600

Fuente: McCabe W., Smith J., Harriott P. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química [4]

3.6 Economía de los evaporadores

Cuando se estudia la evaporación a simple efecto para fines de diseño, tomamos como base que: para evaporar un kilogramo de agua a T_1 , necesitamos aproximadamente un kilogramo de vapor de calefacción, generalmente en la práctica no sucede esto, ya que necesitamos casi siempre más de un kilogramo para evaporar otro kilogramo de otra solución, de acuerdo a esto introducimos el concepto de economía en los evaporadores, que no es otra cosa que la efectividad con que el aparato de evaporación trabaja, se obtiene este importante resultado, dividiendo los kilogramos de vapor que se desprende de la solución para los kilogramos de vapor de calefacción.

[8]

$$E = \frac{V}{S} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

De donde:

E: Economía del evaporador

En un evaporador de simple efecto en la práctica este valor es casi siempre menor a uno. [8]

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL EVAPORADOR

4. DISEÑO DEL EVAPORADOR

Para el diseño de un evaporador, ya sea de simple o múltiple efecto, existen varias consideraciones teóricas que sirven en la realización de dicho proceso; pero la construcción conlleva a mucho más que consideraciones teóricas, también se requiere conocimientos en otras disciplinas, tal como la mecánica.

De esta manera, en conjunto con nuestro director de tesis, se decidió construir un evaporador de simple efecto con una capacidad de alimentación máxima de 60 kg/h, esto en base a las condiciones que ofrece el laboratorio de operaciones unitarias de nuestra facultad.

4.1 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (teórico)

Para llevar a cabo el cálculo de nuestro coeficiente global de transferencia de calor teórico, realizamos una práctica en el evaporador de doble efecto que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de Ingeniería Química en la Universidad de Guayaquil. Cabe recalcar que éste evaporador está diseñado para trabajar como un evaporador de simple efecto, es así que obtuvimos los siguientes resultados:

TABLA III: DATOS EXPERIMENTALES DEL EVAPORADOR PILOTO

Área	Masa Condensado (S)	Presión Absoluta	Temperatura Vapor de la Solución (T ₁)
1,02 m ²	19,5 kg/h	135,8 kPa	102 °C

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

TABLA IV: DATOS OBTENIDOS DE LAS TABLAS DE VAPOR

Presión Absoluta	λ _s	T _s
135,8 kPa	2234,29 kJ/kg	108,29 °C

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

Con estos datos procedemos a calcular la cantidad de calor transferido y el respectivo coeficiente global de transferencia de calor teórico.

$$Q = S \cdot \lambda_s \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\Delta T = T_s - T_1 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Reemplazando 3.13 y 4.1 en 2.1 y despejando U tenemos:

$$U = \frac{S \cdot \lambda_s}{A \cdot (T_s - T_1)}$$

$$U = \frac{(19,5) \cdot (2234,29)}{1,02 \cdot (108,29 - 102)}$$

$$U = 6790,84 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Tomamos este valor de U como referencia para el cálculo de la cámara de evaporación, debido a que se encuentra dentro del rango establecido (3000 – 10500 kJ/h m² °C).

4.2 Cálculo del área de calefacción

Para realizar el cálculo del área de calefacción es necesario conocer las condiciones de operación con las cuales vamos a trabajar:

- Se dispone de una solución de agua azucarada a 27 °C que se alimenta al evaporador a razón de 60 kg/h con una concentración inicial de 14 °BRIX, el vapor de agua que es suministrado para el calentamiento de la solución se encuentra entre (5 - 7) psi de presión manométrica. Con estos valores calculamos el área necesaria si deseamos concentrar la solución hasta el 20 °BRIX asumiendo que la solución actúa termodinámicamente igual que el agua pura y tomando como base un coeficiente global de transferencia de calor teórico de 6790,84 kJ/h m² °C.

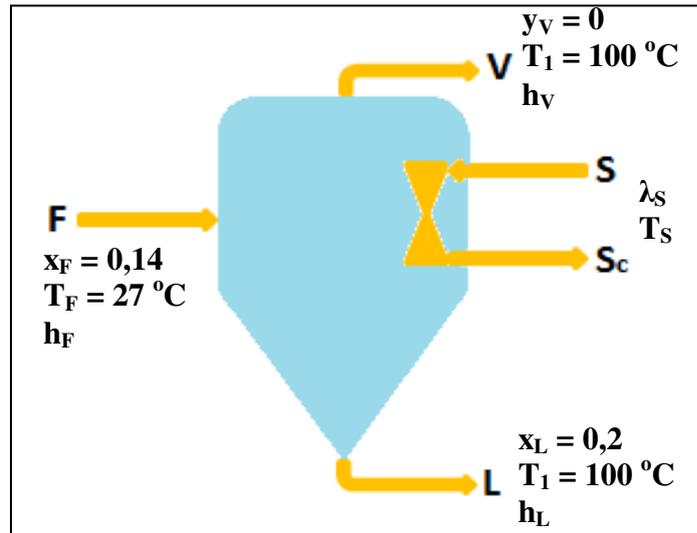


Figura 4.1 Diagrama básico de un evaporador
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

4.2.1 Balance de materia para todo el sistema

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$F x_F = L x_L \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Reemplazando datos en 3.6 tenemos que:

$$(60)(0,14) = L(0,2)$$

$$L = 42 \frac{kg}{h}$$

Ahora reemplazando datos en 3.3 tenemos que:

$$60 = 42 + V$$

$$V = 18 \frac{kg}{h}$$

4.2.2 Cálculo de la elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE = 0,025B \left(\frac{30 + B}{103,6 - B} \right) \left(1 - \frac{0,54 h}{229 - h} \right) \quad (Ec. 2.2)$$

No existe vacío dentro de nuestra cámara de evaporación, la única presión que ejerce fuerza sobre nuestro evaporador es la presión atmosférica. De esta manera tenemos que:

$$B = 0,14$$

$$h = 76 \text{ cm Hg}$$

$$EPE = 0,025(0,14) \left(\frac{30 + 0,14}{103,6 - 0,14} \right) \left(1 - \frac{0,54(76)}{229 - 76} \right)$$

$$EPE = 0,000746$$

El valor del EPE fue mínimo, por lo que se despreciará este dato.

4.2.3 Cálculos de las entalpías de alimentación y concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 3.11)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 3.12)$$

Para calcular éstas entalpías, es necesario conocer sus respectivos calores específicos. Para una solución azucarada a distintas concentraciones podemos usar la siguiente fórmula: [13]

$$cp_i = cp_{Agua}(1 - 0,55x_i) \quad (Ec. 4.2)$$

De donde:

c_{p_i} : Calor específico de la solución azucarada (kJ/kg °C)

$c_{p_{\text{Agua}}}$: Calor específico del agua a la temperatura de la solución (kJ/kg °C)

x_i : Fracción en masa de azúcar

El calor específico del agua; según las tablas de calores específicos (Apéndice A6); a 27 °C y a 100 °C es 4,179 (kJ/kg °C) y 4,216 (kJ/kg °C) respectivamente, entonces tenemos que:

$$c_{p_F} = 4,179(1 - (0,55 * 0,14))$$

$$c_{p_F} = 3,857 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4,216(1 - (0,55 * 0,2))$$

$$c_{p_L} = 3,752 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para el cálculo de dichas entalpías, tomaremos como temperatura de referencia 0 °C, entonces:

$$h_F = 3,857(27 - 0)$$

$$h_F = 104,14 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_L = 3,752(100 - 0)$$

$$h_L = 375,2 \frac{kJ}{kg}$$

4.2.4 Cálculo de la entalpía y temperatura en base al vapor de la solución

Para este caso, asumimos que el punto de ebullición de la solución es 100 °C, por lo tanto la entalpía del vapor de la solución, según las tablas de vapor (Apéndice A3), será:

$$h_V = 2675,6 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_1 = 100 \text{ °C}$$

4.2.5 Cálculo de la entalpía y temperatura en base al vapor de agua

La presión del vapor de agua usado para el calentamiento es:

$$P = (5 + 14,696) \text{ psia}$$

$$P = 19,696 \text{ psia}$$

Por lo tanto, según las tablas de vapor de agua (Apéndice A4), su temperatura (T_S) y entalpía (λ_S) serán:

$$T_S = 108,29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_S = 2234,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.2.6 Balance de energía para todo el sistema

$$Fh_F + S\lambda_S = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$(60)(104,14) + S(2234,29) = (42)(375,2) + (18)(2675,6)$$

$$S = 25,81 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Entonces la cantidad de calor necesario será:

$$Q = S \cdot \lambda_S \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Q = 25,81 * 2234,29$$

$$Q = 57667,02 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

4.2.7 Cálculo de la superficie de calefacción

Por último, despejando la ecuación 2.1 calculamos el área de nuestro evaporador:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T}$$

$$A = \frac{57667,02}{6790,84 \cdot (108,29 - 100)}$$

$$A = 1,02m^2$$

Como rango de seguridad en la construcción del evaporador se tomará un 15% más del área calculada teóricamente, es decir: [8]

$$\text{Área a construirse} = (1,15 - 1,20) m^2$$

4.3 Cálculo del espesor de la carcaza

Tanto en la cámara de calefacción como en la cámara de evaporación se trabajará con presiones de (10 - 40) psia; y con un factor de seguridad de 1,5; lo que nos da una presión de diseño de 60 psia, esto corresponde, según tabla #1 (Apéndice A1), un espesor de:

Para 60 psia \longrightarrow 1,92 mm de espesor

Por la disponibilidad de nuestro mercado local utilizaremos un espesor de 2 mm.

4.4 Cálculo del diámetro del evaporador

Calculamos el diámetro del evaporador según el total de número de tubos que se vayan a emplear en la construcción de la cámara de calefacción:

$$n = \frac{A}{\pi \cdot D_o \cdot L} \quad (Ec. 4.3)$$

De donde:

n: número de tubos

A: área de calefacción (m²)

D_o: diámetro externo de los tubos (m)

L: longitud de los tubos (m)

Por referencia de trabajos similares y por la disponibilidad en el mercado local, decidimos usar tubos de 1 ¼" de diámetro externo con 40 cm de largo, entonces tenemos que:

$$n = \frac{1,2}{\pi(0,0318)(0,4)}$$

$$n = 30,03$$

$$n \approx 30 \text{ tubos}$$

Una vez obtenido la cantidad de tubos necesitaremos considerar ciertas especificaciones que la detallaremos a continuación:

4.4.1 Distancia entre tubos

La distancia mínima permitida entre dos tubos, desde el centro de uno hasta el centro del otro, se lo conoce como “pitch”, y para un diámetro externo de 1 ¼” éste debe de ser de un máximo de 1,5 veces del tubo empleado. (Tabla #4, Apéndice A2)

4.4.2 Arreglo de los tubos

Distribuiremos los tubos con un arreglo triangular, porque es más eficiente que el arreglo cuadrado, según lo especifica las normas TEMA, sección 5. [14]

4.4.3 Tubo central

El tubo central, también conocido como tubo de descenso o cañón, tiene como finalidad llevar a cabo en la cámara de calefacción una circulación natural de la solución a concentrar.

[15]

Su diámetro es entre $1/4$ y $1/8$ del diámetro interior del cuerpo, por eso decidimos usar un tubo central de 3 in que cumple con las especificaciones requeridas. [10]

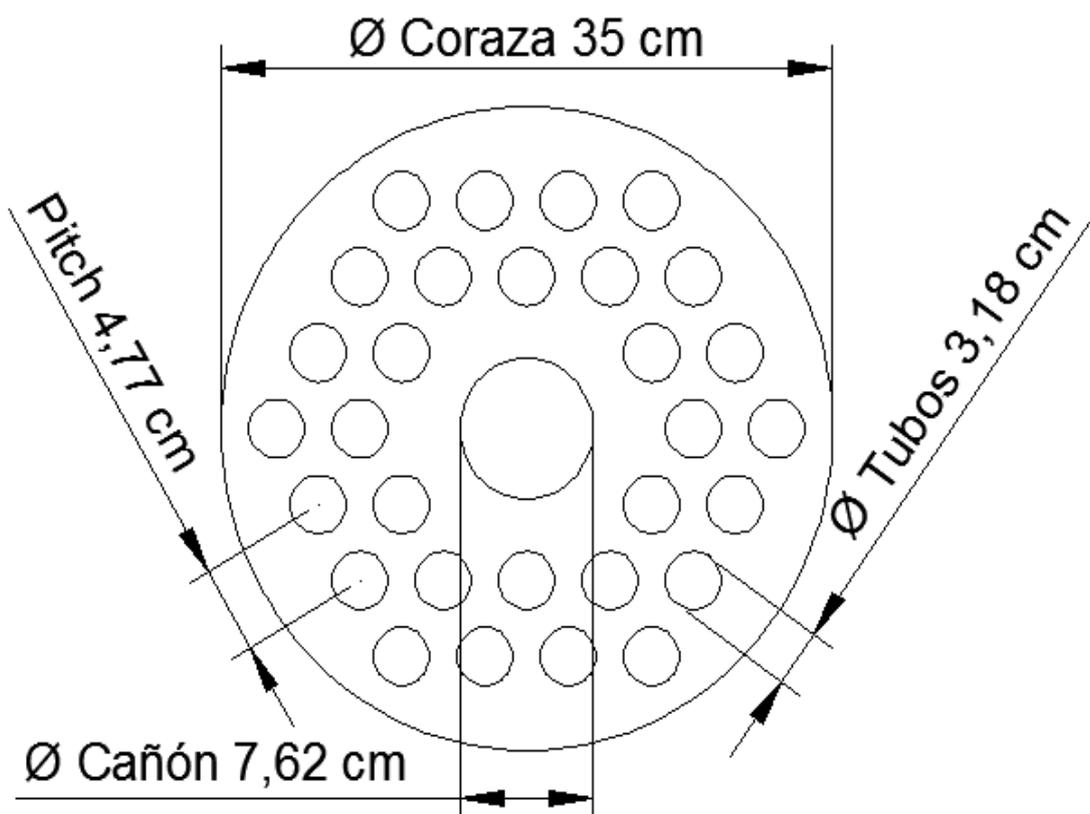


Figura 4.2 Especificaciones para el dimensionamiento del diámetro de nuestro evaporador

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

Según las especificaciones descritas y por lo que se puede apreciar en la imagen, el diámetro idóneo para nuestro evaporador será de 35 cm.

4.5 Cálculo del espesor de las placas de centrado (espejos)

En los espejos, los tubos que forman la cámara de calefacción entran a presión y se sueldan, de manera que no existan fugas, y de este modo un tubo puede ser cambiado, sin afectar a los demás. [15]

El espesor de los espejos se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$s = 0,35 \cdot d \sqrt{\frac{P}{100k/S}} + c \quad (\text{Ec. 4.4})$$

De donde:

- s: Espesor de la placa (mm)
- d: Diámetro de la placa (mm)
- P: Presión máxima admisible (kg/cm²)
- k: Coeficiente de resistencia del material (kg/mm²)
- S: Coeficiente de seguridad
- c: Sobreepesor para tener en cuenta el desgaste (mm)

El diámetro de la placa será 350 mm; la presión máxima admisible será 4,22 kg/cm²; el coeficiente de resistencia será 17 (Tabla #2,

Apéndice A); el coeficiente de seguridad será 1,5 (Tabla #3, Apéndice A2); y el sobreespesor se considerará un valor de 3mm; entonces:

$$s = 0,35(350) \sqrt{\frac{0,0422}{100(17)/1,5}} + 3$$

$$s = 3,75 \text{ mm}$$

Por disponibilidad en el mercado local usaremos espejos con unos espesores de 4 mm.

4.6 Cálculo de las bridas

Las bridas sirven para tener mayor facilidad en el desarme del equipo; es por eso que, en base a trabajos similares, decidimos hacer las bridas con acero 705 de 40 cm de diámetro exterior, 5 mm de espesor, y con un total de 24 pernos de 8x30 mm.

Para las bridas de los espejos se decidió mejor hacerlo en una sola pieza, es decir unos “espejos – bridas”, que llevarán las mismas especificaciones que las ya determinadas, con la excepción de que son de acero inoxidable y de un espesor de 4 mm como ya se determinó anteriormente en los espejos.

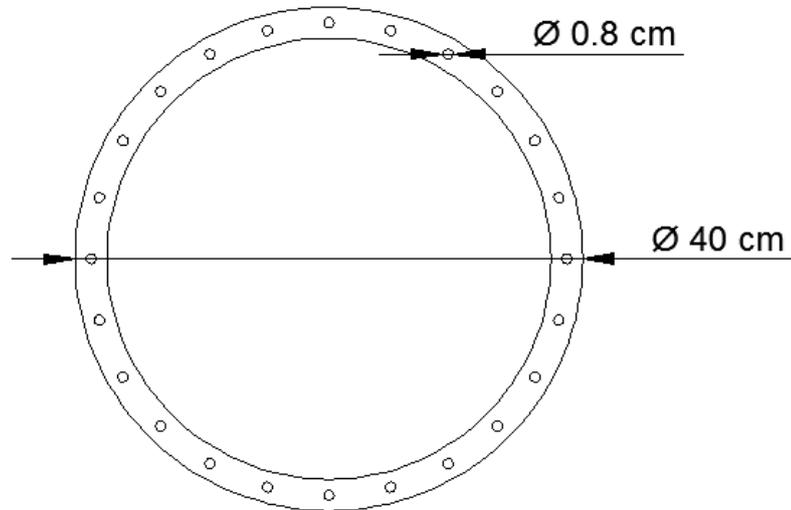


Figura 4.3 Dimensiones de las bridas de nuestro evaporador
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

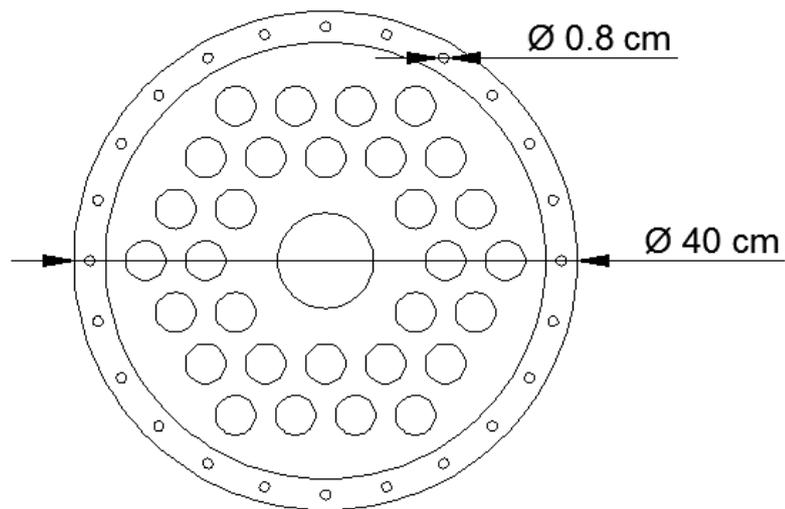


Figura 4.4 Dimensiones de los espejo – brida de nuestro evaporador

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

4.7 Determinación de la altura de la cámara de evaporación

La altura de la cámara de evaporación es muy importante porque su función es separar la mezcla líquido – vapor, de tal manera que el vapor salga sin ningún tipo de soluto hacía el condensador.

La altura de la cámara de evaporación debe de ser de 1,5 a 2 veces la altura de los tubos de la cámara de calefacción, es por esta razón que decidimos que la altura para nuestra cámara de evaporación sea de 80 cm. [10]

4.8 Determinación de los tapones capa

Estas dos partes son las que están en contacto directo con el vapor y la solución concentrada; por eso que decidimos elaborar los tapones de forma semielípticas, de acero inoxidable, con un espesor igual al de la carcasa, con alturas individuales; por el lado donde sale el concentrado la altura será de 8 cm, para evitar que el líquido no se quede atrapado al momento de salir; y por el lado por donde sale el vapor la altura será de 10 cm, para darle mayor circulación al vapor y evitar arrastre de solutos.

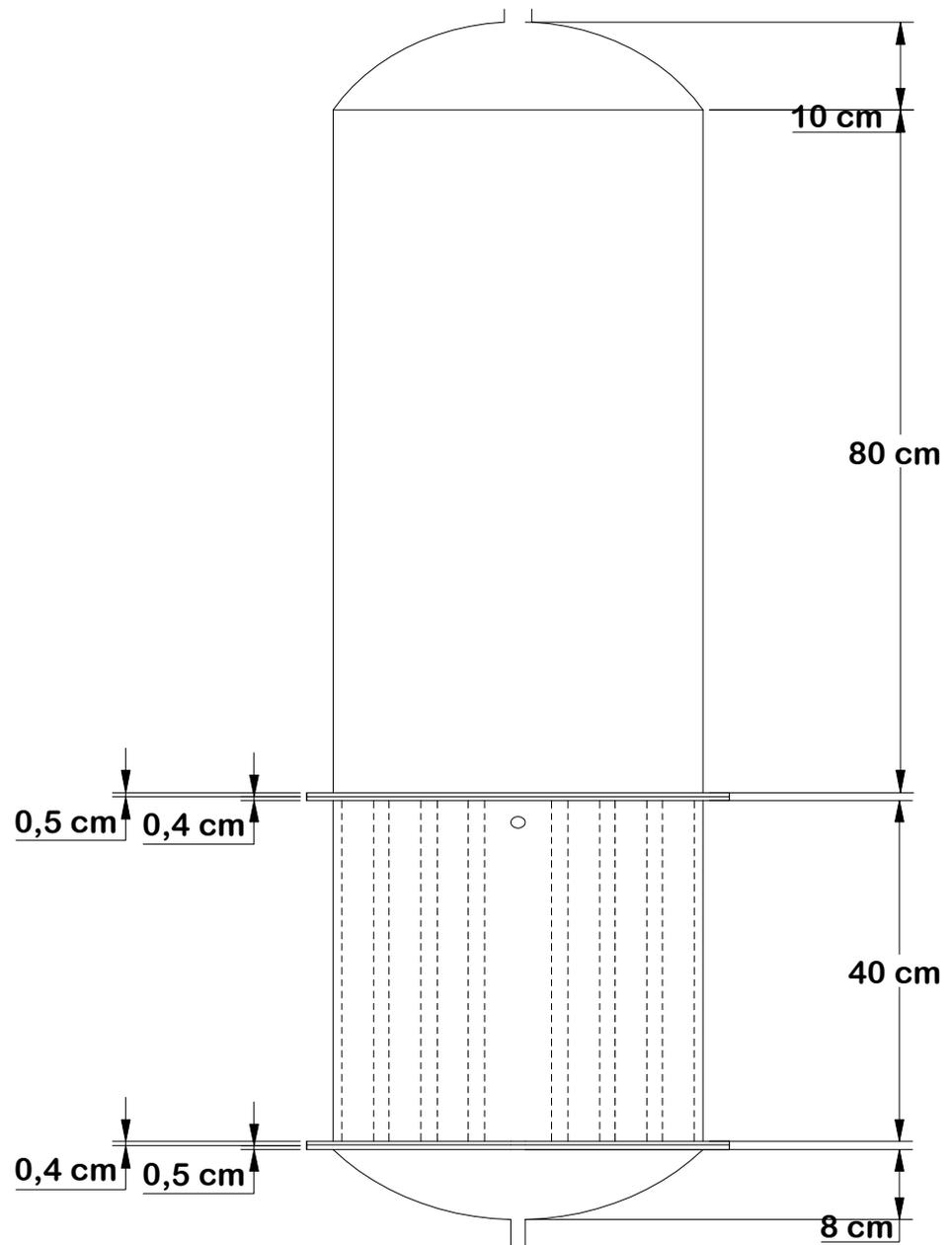


Figura 4.5 Dimensiones de nuestro evaporador

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

4.9 Condensador

Por medio de investigaciones en el mercado local, conseguimos un condensador de tubo y carcaza de un paso, en el que, el agua fluye por los tubos y el vapor fluye por la carcaza. Este equipo tiene las siguientes especificaciones:

Material: Acero Inoxidable

Número de tubos: 36

Diámetro de los tubos: 3/16 “

Diámetro de la carcaza: 12 cm

Largo: 57 cm

Flujo máximo de vapor a condensar: 100 kg/h

Presión de operación: 150 psia

Temperatura de operación: 204 °C

Según estas especificaciones, pudimos concluir que el equipo si es apto para nuestras necesidades ya que el vapor que se va a condensar no supera los 18 kg/h de operación; además, de tener una temperatura máxima de 110 °C. Por lo tanto, no fue necesario construir éste equipo ya que fue mucho más fácil y económico adquirirlo en el mercado local.

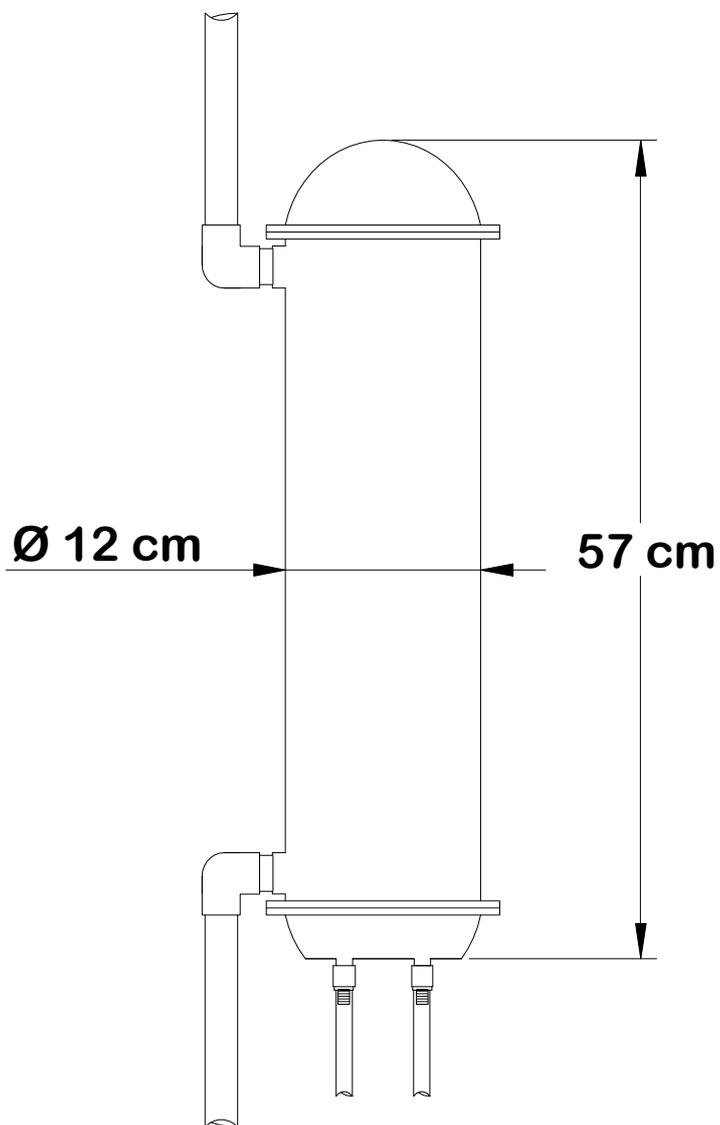


Figura 4.6 Dimensiones de nuestro condensador
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

CAPÍTULO 5
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE
DEL EVAPORADOR DE SIMPLE
EFECTO

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO

5.1 Construcción de la Cámara de Calefacción

En la construcción de la cámara de calefacción y del cuerpo del evaporador, se utilizó láminas de aceros inoxidables de 2 mm de espesor debidamente cortadas, roladas y soldadas con soldadura TIG con atmósfera de argón para garantizar que el sello de las placas sea el más adecuado y proveer futuras corrosiones en el cordón de soldadura.



Figura 5.1 Partes del Evaporador
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

Su capacidad máxima es de 100 litros, el cuerpo de la cámara de calefacción tiene a su vez al final del mismo un domo inferior conectado con una válvula para descargar el líquido concentrado, y está sujeta a la estructura del evaporador (Ver figura 5.3) por dos barras para darle más estabilidad.

5.2 Instalación del Sistema Eléctrico

En el sistema eléctrico del evaporador consta de dos partes:

- El arrancador de la bomba que sirve para encender o apagar la bomba de manera automatizada, la misma que sirve para la alimentación de la mezcla.



Figura 5.2 Arrancador de la Bomba
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

- La segunda parte es el breaker de protección de on / off para evitar cortocircuito. Del breque se conectó un cable al sistema eléctrico del LOPU, dicho cable tiene tres conexiones que son de corriente, neutro y el de tierra que están conectados al sistema eléctrico del laboratorio en mención.

5.3 Construcción de la Estructura de Soporte del Evaporador

Al momento de escoger el material para la base de soporte del equipo, se debe optar por un material resistente y de gran durabilidad.

Para este caso escogimos hierro, dispuesta en una estructura similar a un cuadrado que sostiene el evaporador, al condensador y a la bomba de manera estable, mientras permanece fijo sobre la superficie.



Figura 5.3 Soporte del equipo
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

5.4 Instrumentación

Para la construcción del evaporador, contamos con los siguientes instrumentos:

1. Trampa de vapor.
2. Tubos de nivel.
3. Válvula de aguja.
4. Manómetros.
5. Válvula de Bola.
6. Accesorios en general.

5.5 Montaje del Evaporador Piloto de Tubos Cortos Verticales de Simple Efecto

Luego de de finalizar los diseños del evaporador piloto de tubos cortos de simple efecto y de haber procedido con la construcción de cada una de sus partes, el siguiente paso para el montaje del equipo es adaptar la calandria junto con las bridas y al cuerpo del evaporador.

Además incorporar el medidor de presión que es el manómetro.

En segundo lugar, se procede acoplar cada parte de la calandria junta con el cuerpo del evaporador a la estructura, donde finalmente se realiza el atornillado del equipo.

Después de haber acoplado estos elementos, se realiza el montaje de la tubería, en donde se colocan a la vez acoples, trampa de vapor, válvulas y las mangueras de vapor y condensado por donde fluirá el líquido a concentrar.

Luego se instala la manguera de vapor por el domo superior a la tubería del vapor procedente de la caldera que se conecta a la unidad de destilación mediante una unión universal.

Por último se ajusta la instalación eléctrica para el arranque de la bomba para la entrada de la alimentación e inmediatamente se puede a comenzar a trabajar con el equipo.

5.6 Materiales usados en la construcción

5.6.1 Descripción de Materiales

Para seleccionar el material que se usará en la construcción de un equipo, se considera lo siguiente: [15]

a) Las tendencias corrosivas y erosivas del fluido en proceso.

[15]

b) La aplicación industrial, como es el caso en industrias farmacéuticas y alimenticias, donde los requerimientos de higiene para la prevención de contaminantes, es esencial el uso de aleaciones especiales. [15]

- c) Los recursos económicos disponibles. [15]
- d) La preferencia del usuario. [15]

En base a estos puntos mencionados y tomando en consideración de disponer de una unidad de evaporación didáctica de gran duración; a continuación, se describen los materiales empleados para la Construcción del Evaporador de Simple Efecto y equipo complementario:

- **Evaporador**

Con la finalidad de montar un equipo didáctico de larga duración y de acuerdo con las normas ASTM A240 y ASTM A312 [16], se escogió como material de construcción, el acero inoxidable austenítico grado 304 y 304L que son los tipos más comunes de aceros de acuerdo a la AISI. Estos materiales poseen una excelente resistencia a la corrosión, excelente soldabilidad, excelente factor de higiene, resistencia a bajas y altas temperaturas y son totalmente reciclables y amigables al medio ambiente; por ello son los materiales más utilizados en los equipos de evaporación.[17]

El evaporador consta de 3 partes: el domo superior, la cámara de calefacción y el domo inferior. Estas 3 partes están construidas de una plancha de acero inoxidable grado 304 de 2 mm de espesor.

La cámara de calefacción posee una serie de tubos de acero inoxidable grado 304L de 1 ¼" de diámetro exterior, arreglados alrededor de un tubo central de acero inoxidable 304 de 3" de diámetro. Los espejos de la calandria son de acero inoxidable 304 de 4 mm de espesor.

Las bridas están construidas en plancha de acero 705 de 5 mm de espesor.

La soldadura que se utilizó es la TIG, la cual se aplica en todo tipo de material, en este caso, acero inoxidable, logrando un acabado completamente liso. Con esta soldadura, se acoplaron cada una de las bridas y neoplos al domo superior e inferior respectivamente.

Se unieron los domos superior e inferior a la cámara de calefacción por medio de pernos de acero inoxidable de 8 mm; además de un empaque de lámina de caucho neopreno, utilizado en industrias alimenticias y muy resistentes a las altas temperaturas.

- **Soporte**

El material empleado para realizar el soporte del evaporador fue ángulos de hierro, los cuales fueron soldados con electrodos 6011, muy empleado para la formación de estructuras, utilizando una máquina de soldar de corriente continua.

Este soporte está empernado al suelo del Laboratorio por medio de pernos de expansión de acero inoxidable 304.

- **Tuberías y Accesorios**

Las tuberías para la alimentación son de polipropileno de ½" con accesorios del mismo material (uniones, codos, T, reductores tipo bush y nudos).

Las válvulas para la alimentación son esféricas o de bola de cuerpo de PVC y una válvula de aguja de cuerpo de bronce.

Las tuberías de vapor son de hierro negro con accesorios del mismo material de ½" para la entrada de vapor; y de acero inoxidable con accesorios de hierro negro de 1" para la salida de vapor.

Las válvulas para la entrada de vapor son esféricas de cuerpo de bronce con asientos de acero inoxidable.

Las tuberías para el condensado de vapor son de polipropileno de $\frac{1}{2}$ " y un accesorio de hierro negro (trampa de vapor).

Las tuberías para el concentrado o producto de la evaporación son de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " y una válvula esférica de acero inoxidable.

La tubería para la medición de la presión (manómetro) es de cobre con acoples de bronce de $\frac{1}{4}$ ".

El medidor de nivel está formado por un par de válvulas de globo de cuerpo de bronce con uniones de bronce de $\frac{1}{2}$ " y una manguera plástica de $\frac{1}{2}$ ". Este medidor está conectado al domo superior y al inferior por medio de uniones y neplos de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".

- **Tanques y bomba**

El tanque utilizado para la alimentación es de polietileno con una capacidad de 200 L.

Los tanques usados para las prácticas de laboratorio son de polipropileno con capacidad de 10L y 16 L.

La bomba usada para la alimentación es de 110 V; 2,5 A y 5,5 HP.

- **Condensador**

El condensador está construido en acero inoxidable 304, provisto de tubos de acero inoxidable. Las mangueras del intercambiador de calor son tubos negros de $\frac{3}{4}$ " , reforzadas con acero.

- **Sistema Eléctrico**

Consiste en un arrancador para la bomba y de un breque de protección para cortocircuito, el cual va conectado por un cable hacia el breque principal del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

5.6.2 Costos

Para este proyecto de graduación, se necesitó de la compra de ciertos materiales, además de la mano de obra para la construcción del equipo; cuyos costos se detallan, a continuación:

Tabla V: Costo Total de los Materiales Usados en la Construcción

Material	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Tubería de acero inox de 1 ¼" x 6 m	4	\$ 65,54	\$ 262,56
Plancha de acero inox 120 x 240 x 0,2 cm	1	\$ 131,91	\$ 131,91
Placa de acero inox de 40 x 40 x 0,4 cm	2	\$ 46,75	\$ 93,50
Neplo de acero inox de 1" x 3" c40	1	\$ 3,71	\$ 3,71
Neplo de acero inox de ½" x 4" c40	1	\$ 2,77	\$ 2,77
Neplo de acero inox de 3/8" x 3" c40	1	\$ 2,79	\$ 2,79
Neplo de acero inox de ½" x 3" c40	3	\$ 1,13	\$ 3,39
Perno de acero inox de 8 x 30 mm	60	\$ 0,46	\$ 27,60
Lámina de Caucho de 1 m ² de 3 mm espesor	1	\$ 14,48	\$ 14,48
Brida de acero 705 de 2,5 x 0,5 cm	2	\$ 90,00	\$ 180,00
Pernos de Expansión de acero inox de 3"	16	\$ 0,83	\$ 13,28
Ángulos de hierro de 2" x 1/8"	5	\$ 7,32	\$ 36,60
Adaptador para Tanque de ½"	1	\$ 1,86	\$ 1,86
Reductor Bush de PP de 1" x ½"	2	\$ 1,62	\$ 3,24
Nudo de PP de ½"	1	\$ 1,02	\$ 1,02
Neplo de H/N de ½" x 3" c40	3	\$ 0,29	\$ 0,87
Neplo de H/N de ½" x 6" c40	1	\$ 0,53	\$ 0,53
Neplo de H/N de ½" x 2" c80	2	\$ 0,92	\$ 1,84
Neplo de H/N de ½" x 2" c40	1	\$ 0,23	\$ 0,23
Neplo perdido de H/N de ½" c40	1	\$ 0,18	\$ 0,18
Tubería de H/N de ½" x 10,8 cm c40	-----	-----	\$ 19,00
Tapón macho de ½"	1	\$ 0,15	\$ 0,15
Cañería de Cu de ¼" x 2,5 m	-----	-----	\$ 7,00
T de H/N de ½"	3	\$ 0,47	\$ 1,41
Codo de H/N de ½" x 90°	7	\$ 0,39	\$ 2,73

Reductor Bush de H/N de 1/2" x 1/4"	2	\$ 0,21	\$ 0,42
Reductor 3000 de H/N de 1" x 1/2"	1	\$ 2,16	\$ 2,16
Nudo de H/N de 1/2"	2	\$ 1,86	\$ 3,72
Acoples de Cu de 1/4" x 1/4"	4	\$ 2,25	\$ 9,00
Válvula de bola de Cu de 1/2"	2	\$ 3,77	\$ 7,54
Neplo de acero inox de 1/2" x 10" c40	1	\$ 4,80	\$ 4,80
Tubería de plástico de 1/2" de 1 m	-----	-----	\$ 2,70
Unión de acero inox de 1/2"	2	\$ 1,13	\$ 2,26
Unión de Cu de 1/2"	2	\$ 25	\$ 50,00
Abrazaderas Metálicas	4	\$ 0,20	\$ 0,80
Neplo de acero inox de 1" x 12" c40	1	\$ 9,05	\$ 9,05
Neplo de acero inox de 1" x 4" c40	1	\$ 4,00	\$ 4,00
Neplo perdido de H/N de 3/4" c40	1	\$ 0,23	\$ 0,23
Neplo de acero inox de 1" x 5" c40	2	\$ 5,00	\$ 10,00
Neplo de acero inox de 1" x 18" c40	1	\$ 10,35	\$ 10,35
T de H/N de 1"	1	\$ 1,38	\$ 1,38
Codo de H/N de 1" x 90°	2	\$ 0,84	\$ 1,68
Reductor Bush de H/N de 1" x 1/2"	1	\$ 0,37	\$ 0,37
Unión de H/N de 1"	2	\$ 0,60	\$ 1,20
Nudo de H/N de 1"	2	\$ 1,82	\$ 3,64
Neplo de acero inox de 1" x 6" c40	1	\$ 5,40	\$ 5,40
Neplo perdido de H/N de 1" c40	1	\$ 0,35	\$ 0,35
Perno de acero inox de 8 x 50 mm	6	\$ 0,30	\$ 1,80
Tubería de plástico de 1/2" de 12 m	-----	-----	\$ 6,00
Acoples para manguera de plástico de 1/2"	2	\$ 0,45	\$ 0,90
Acoples para manguera de metal de 1/2"	2	\$ 0,50	\$ 1,00
Neplo de acero inox de 1/2" x 8" c40	1	\$ 3,86	\$ 3,86

T de acero inox de 1/2"	1	\$ 2,54	\$ 2,54
Neplo de PP de 1/2" x 3"	1	\$ 1,50	\$ 1,50
Juego de terrajas de 1/2" a 1"	-----	-----	\$ 31,48
Masilla Epóxica Rally 100 g	2	\$ 2,08	\$ 4,16
Cinta Teflón de 1/2" Germany	19	\$ 0,23	\$ 4,37
Broca de Carburo de 8 mm	4	\$ 6,80	\$ 27,20
Broca de 8 mm para Metal	2	\$ 1,80	\$ 3,60
Hojas de Sierra	4	\$ 1,50	\$ 6,00
Pintura en Spray	2	\$ 1,90	\$ 3,80
Discos de Corte de 4"	2	\$ 1,25	\$ 2,50
Discos de Pulido de 4"	2	\$ 2,10	\$ 4,20
Flexómetro de 3 m	1	\$ 3,50	\$ 3,50
Paquete de electrodos 6011 AGA	-----	-----	\$ 4,37
Paquete de electrodos para acero inox	-----	-----	\$ 2,80
Lata de Pintura Anticorrosiva (2L)	1	\$ 6,08	\$ 6,08
Lata de Pintura Esmalte Verde Esmeralda (2L)	1	\$ 5,00	\$ 5,00
Frasco de Diluyente (1 Gal)	1	\$ 16,00	\$ 16,00
Frasco de Desoxidante (2L)	1	\$ 3,56	\$ 3,56
Lija para Metal	2	\$ 0,80	\$ 1,60
Paquete de Tornillos de 8 mm	-----	-----	\$ 2,30
Paquete de Silicona Roja	-----	-----	\$ 2,95
Costo de Transporte	-----	-----	\$ 26,50
Combustible (Diesel)	-----	-----	\$ 24,00
Baldes Económicos de Plástico	3	\$ 2,77	\$ 8,31
Fundas de Azúcar de 2 Kg	10	\$ 1,72	\$ 17,20
Paquete de Pañitos Húmedos	-----	-----	\$ 1,12
Válvula de Compuerta de Acero de 1"	1	\$ 5,00	\$ 5,00

Válvula de Aguja de Cu de 1/2"	1	\$ 4,50	\$ 4,50
Válvula de Bola de PVC de 1/2"	3	\$ 0,80	\$ 2,40
Válvula de Globo de Cu de 1/2"	2	\$ 2,00	\$ 4,00
Trampa de Vapor roscada de 1/2"	-----	-----	\$ 100,00
Bomba de Agua de 5 HP	-----	-----	\$ 120,00
Tubería de PP de 1/2" de 4 m	-----	-----	\$ 2,00
Tanque de PE	-----	-----	\$ 50,00
Condensador	-----	-----	\$ 400,00
Manguera Negra de 200 psia de 2 m	-----	-----	\$ 6,00
Accesorios de PP de 1/2": codo, neplo, nudo y T	-----	-----	\$ 5,00
Manómetro de 0 a 100 psi	-----	-----	\$ 9,00
Soldadura	-----	-----	\$ 415,00
Rolado de plancha	-----	-----	\$ 89,00
Construcción del Soporte	-----	-----	\$ 100,00
Instalación Eléctrica	-----	-----	\$ 100,00
		Total	\$ 2585,80

Fuente: Dimulti S.A. Ferretería Industrial, Maquinarias Henriques C.A.

El costo total para la Construcción del Evaporador de simple efecto es de **\$ 2585,80**.

Estos valores expuestos hacen que sea factible la construcción de estos equipos para pruebas experimentales, con su posterior comercialización a costos razonables.

5.7 Mantenimiento del Evaporador Piloto de Tubos Cortos Verticales de Simple Efecto

Es de fundamental importancia, que luego de cada experimentación el evaporador sea limpiado y acondicionado adecuadamente para un nuevo experimento.

Por tal motivo, se hace necesario lavar el equipo con agua, ya que esta es una de las formas más factibles en las que se pueden ser removidos residuos grasos, melosos de la mezcla azucarada que difícilmente se remuevan de manera manual.

Otra parte a considerar en el mantenimiento, es el uso mismo del equipo, puesto que si no se procede a utilizar de manera frecuente, algunos elementos podrían resultar susceptibles al daño por corrosión o taponamiento.

Finalmente, es muy importante revisar la tubería y acoples, así como la trampa de vapor para verificar su perfecto estado y poder comenzar una nueva experimentación. No se debe descuidar la parte mecánica como eléctrica del equipo.

CAPÍTULO 6

MANUAL DE OPERACIÓN

6. MANUAL DE OPERACIÓN

6.1 Construcción de la Cámara de Calefacción

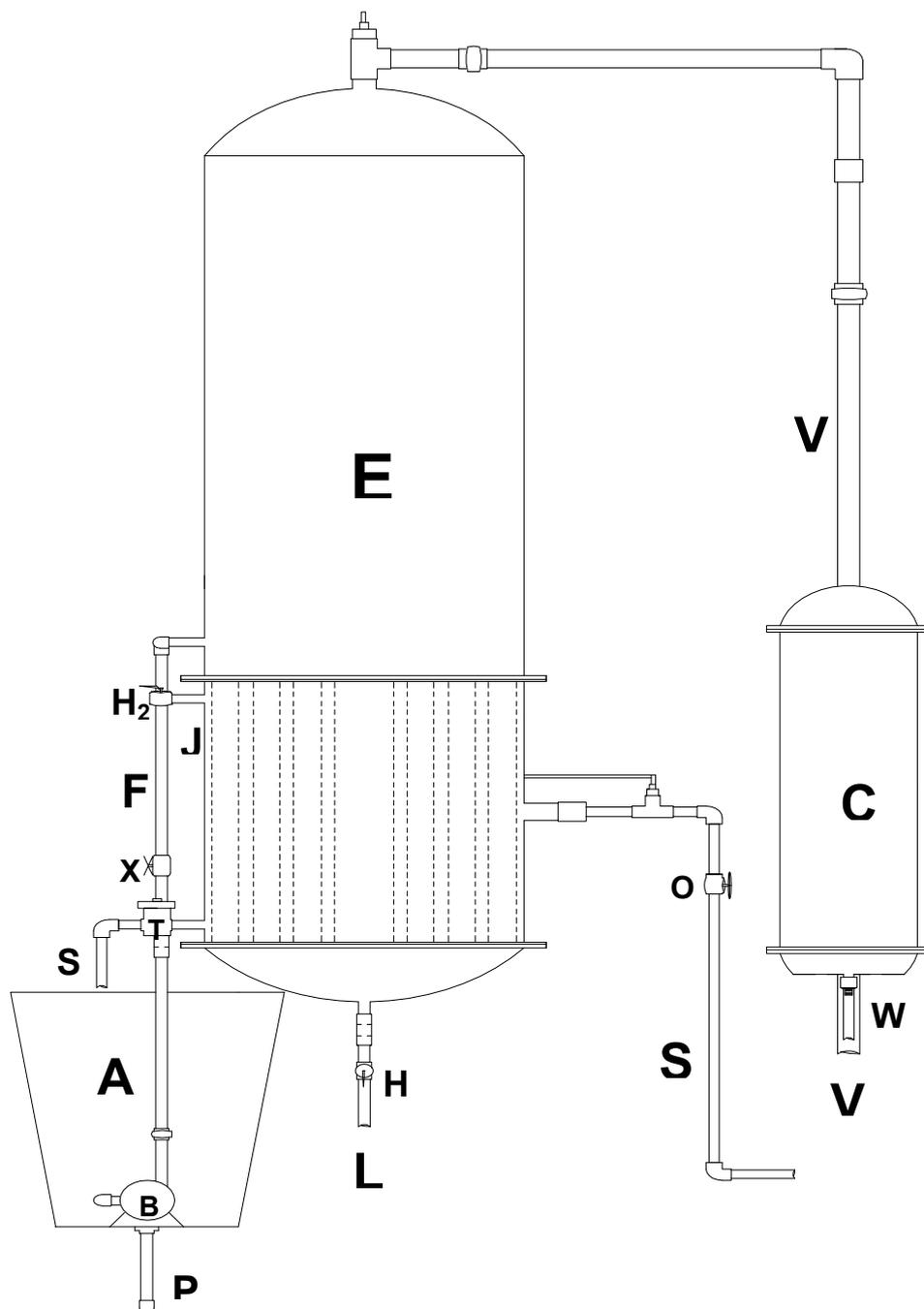


Figura 6.1 Vista Lateral del Equipo
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

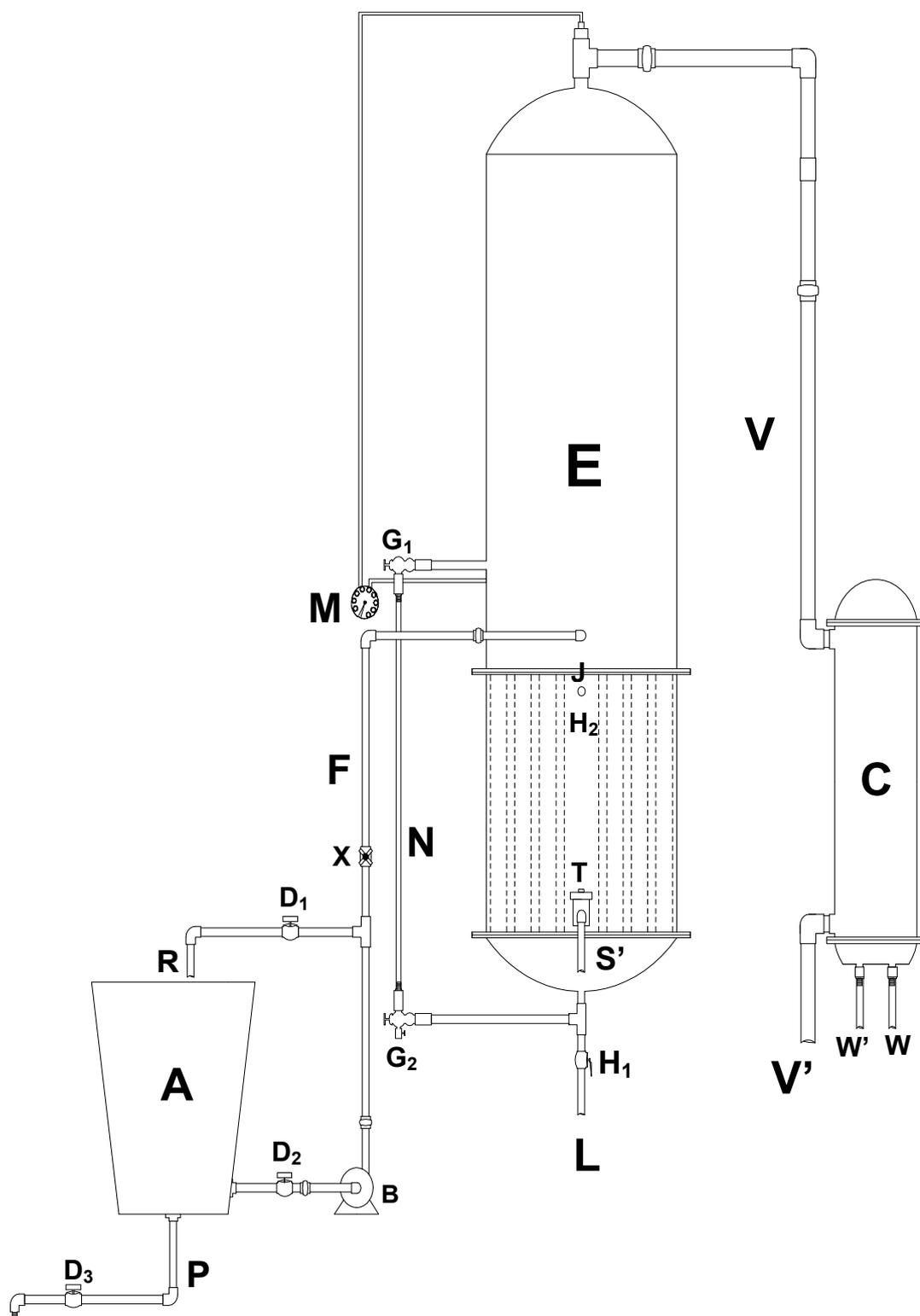


Figura 6.2 Vista Frontal del Equipo
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

Tabla VI: Simbología del Equipo

Simbología	Significado
A	Tanque de Alimentación
B	Bomba de Agua de 5 HP
C	Intercambiador de Calor
D₁	Válvula para el reflujo de la alimentación
D₂	Válvula para la entrada de alimentación
D₃	Válvula para la purga de la alimentación
E	Evaporador de Simple Efecto
F	Flujo de Alimentación
G₁	Válvula de nivel
G₂	Válvula de nivel
H₁	Válvula para la salida de concentración
H₂	Válvula para la salida de aire
J	Flujo de aire comprimido
L	Flujo de concentrado
M	Manómetro de 0 a 100 psi
N	Nivel de la alimentación
O	Válvula para la entrada de vapor de agua
P	Purga de la alimentación
R	Reflujo de la alimentación
S	Flujo de vapor de agua
S'	Flujo de condensado de vapor de agua
T	Trampa de Vapor
V	Flujo de vapor de la solución
V'	Flujo de condensado de vapor de solución
W	Flujo de agua de enfriamiento
W'	Flujo de agua calentada
X	Válvula para el control de nivel de alimentación

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

6.2 Preparación de la solución de trabajo

Se preparará una solución de agua azucarada a 14 °BRIX, que luego será vertida en el tanque de alimentación (**A**) y se tomará su respectiva temperatura.

6.3 Puesta en Marcha del Equipo

- 1) Verificar que todos los servicios generales (agua, vapor y corriente eléctrica) estén disponibles.
- 2) Cerciorarse que todas las válvulas estén cerradas, a excepción de las válvulas de nivel (**G₁**), (**G₂**).
- 3) Abrir las válvulas de alimentación (**D₂**) y de reflujo (**D₁**).
- 4) Colocar el switch del breque de protección en **on** y encender la bomba (**B**) para llenar el equipo sobre el haz de tubos de la cámara de calefacción.
- 5) Una vez que el nivel de la solución (**N**) esté sobre el haz de tubos de la cámara de calefacción, abrir la válvula para la entrada de vapor (**O**).
- 6) Registrar, cada 5 minutos, la temperatura del condensado de vapor de la solución (**V'**) que sale del intercambiador de calor (**C**), colocando un balde de plástico y un termómetro debajo de la tubería de salida de dicho equipo.

- 7) Registrar, cada 5 minutos, la presión de vapor, producto de la ebullición de la solución, por medio del manómetro (**M**) instalado para el evaporador (**E**).

6.4 Funcionamiento Continuo de la Unidad

Para el funcionamiento continuo del equipo, se procede a controlar el nivel de la solución antes establecido, mediante el proceso de abrir y cerrar lentamente la válvula de control de nivel (**X**).

6.5 Toma de muestras de la solución concentrada (producto)

Para la toma de muestra de la solución concentrada o producto (**L**), se debe abrir la válvula de concentrado (**H₁**) y, colocando bajo ésta, un vaso plástico para recoger 2 ml de solución concentrada; para luego, con un brixómetro, medir sus grados BRIX. Cabe recalcar, que a medida que continúa la evaporación, la temperatura de la solución concentrada aumenta, para ello, se debe colocar el vaso con la solución en un sistema de refrigeración para disminuir su temperatura hasta llegar a la temperatura ambiente y poder medir sus grados BRIX. Este procedimiento se realiza cada 5 minutos de operación del evaporador hasta alcanzar aproximadamente 20 °BRIX.

6.6 Toma de muestras del condensado

Para la toma de muestra de condensado, se debe colocar bajo la tubería roja, que conecta con la trampa de vapor (**T**), un balde plástico de 10 ml para recoger el condensado de vapor de agua.

Este procedimiento se realiza cada 5 minutos de operación del evaporador (**E**).

6.7 Parada de la Unidad de Evaporación

- 1) Abrir la llave de agua (**W**), del Laboratorio, conectada a una manguera plástica, para enfriar el condensador (**C**).
- 2) Apagar la bomba (**B**) y colocar el switch del breque de protección en **off**.
- 3) Cerrar las válvulas de alimentación (**D₂**), reflujo (**D₁**) y la de control de nivel (**X**).
- 4) Una vez que cesa la operación, abrir la válvula de concentrado (**H₁**) para recoger en un balde de plástico (16 ml), el producto final de la evaporación y medir su respectiva temperatura con un termómetro.
- 5) Abrir la válvula de purga (**D₃**) del tanque de alimentación (**A**), desechando el contenido de alimentación (**P**) que éste posea.
- 6) Abrir la válvula de salida de aire (**H₂**), liberando el vapor no condensado (**J**).

CAPÍTULO 7

EXPERIMENTACIÓN

7. EXPERIMENTACIÓN

A continuación detallaremos las pruebas experimentales que realizamos en nuestro evaporador, así como los cálculos matemáticos para determinar nuestro coeficiente global de transferencia de calor.

7.1 Pruebas experimentales de la Unidad Construida

Se realizaron 6 prácticas de una solución de agua azucarada en este evaporador de simple efecto de tubos verticales cortos.

TABLA VII: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA #1

PRUEBA #1						
Tiempo	P _v	F	x _F	x _L	S	T ₁
0	118,56 kPa	57 kg/h	14	14	24,4 kg/h	97 °C
5			14	14,2		
10			14	14,6		
15			14	16		
20			14	18,6		
25			14	20,2		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

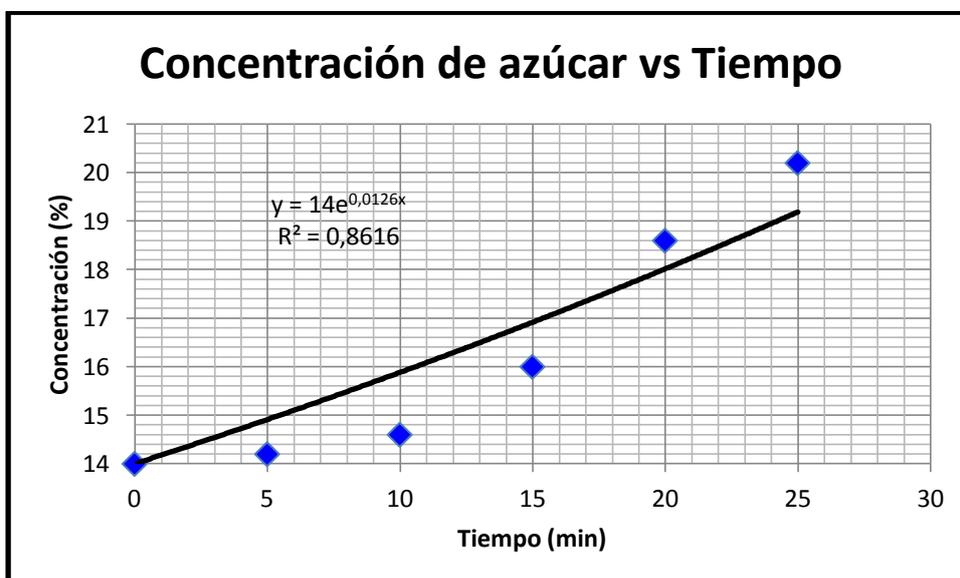


Gráfico 7.1 Concentración vs Tiempo de la Prueba #1

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

TABLA VIII: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA #2

PRUEBA #2						
Tiempo	P_v	F	x_F	x_L	S	T_1
0	127,18 kPa	57 kg/h	14	14	24 kg/h	98 °C
5			14	14,2		
10			14	15,2		
15			14	16		
20			14	17,6		
25			14	20		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

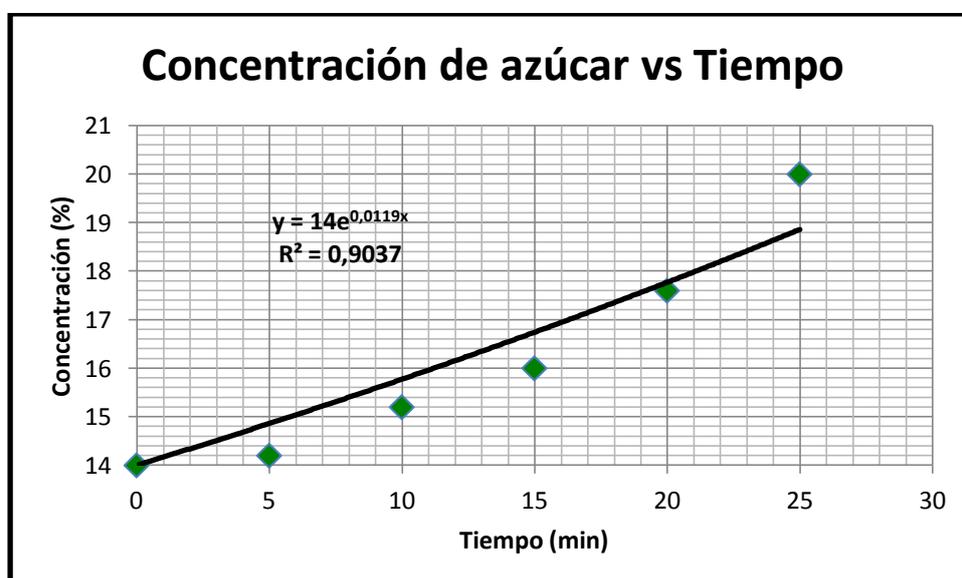


Gráfico 7.2 Concentración vs Tiempo de la Prueba #2

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

TABLA IX: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA #3

PRUEBA #3						
Tiempo	P_v	F	x_F	x_L	S	T_1
0	135,8 kPa	57 kg/h	14	14	25,1 kg/h	99 °C
5			14	14,4		
10			14	15		
15			14	15,6		
20			14	17,8		
25			14	20,4		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

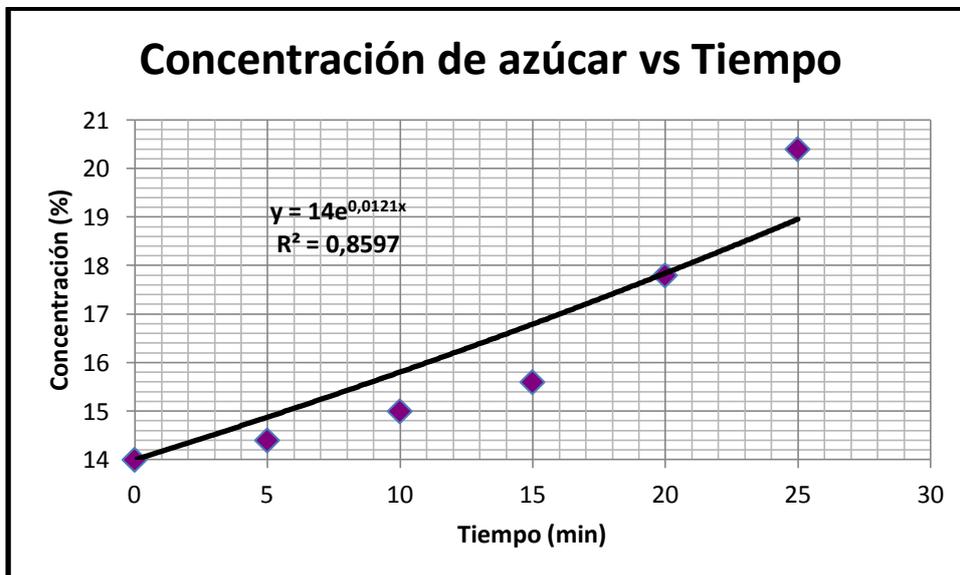


Gráfico 7.3 Concentración vs Tiempo de la Prueba #3

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

TABLA X: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA #4

PRUEBA #4						
Tiempo	P _v	F	x _F	x _L	S	T ₁
0	127,18 kPa	57 kg/h	14	14	23,5 kg/h	98 °C
5			14	14,1		
10			14	15,2		
15			14	16,4		
20			14	18,2		
25			14	19,8		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

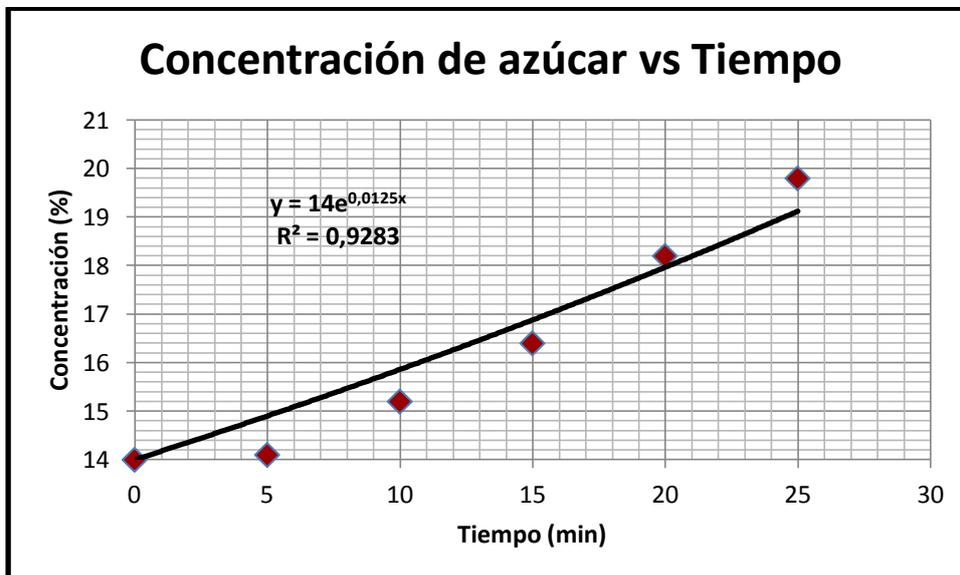


Gráfico 7.4 Concentración vs Tiempo de la Prueba #4

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

TABLA XI: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA #5

PRUEBA #5						
Tiempo	P _v	F	x _F	x _L	S	T ₁
0	135,8 kPa	57 kg/h	14	14	24,5 kg/h	99 °C
5			14	14,2		
10			14	15		
15			14	15,8		
20			14	17,8		
25			14	20,2		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

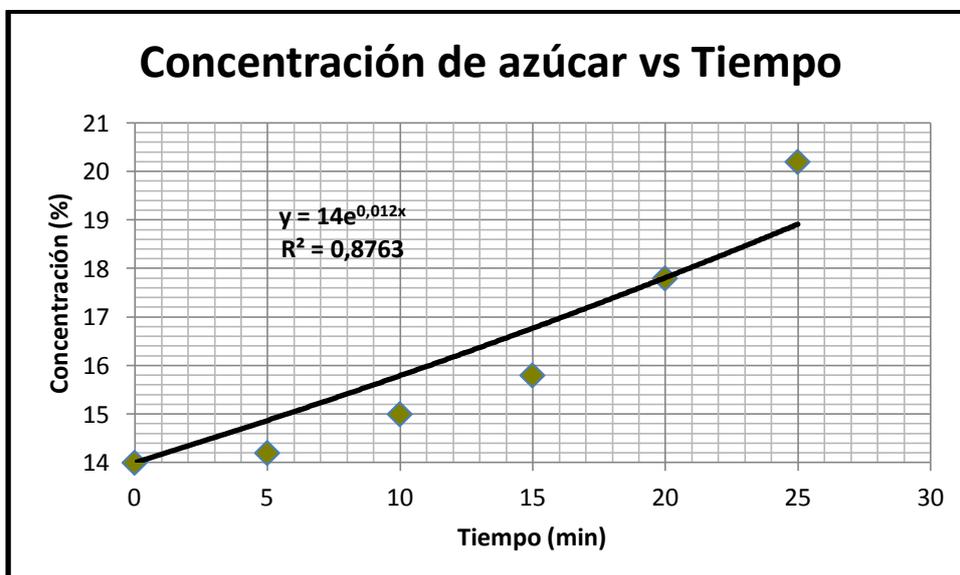


Gráfico 7.5 Concentración vs Tiempo de la Prueba #5

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

TABLA XII: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA #6

PRUEBA #6						
Tiempo	P_v	F	x_F	x_L	S	T_1
0	127,18 kPa	57 kg/h	14	14	24,5 kg/h	98 °C
5			14	14,2		
10			14	15,4		
15			14	16,4		
20			14	18,2		
25			14	20		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

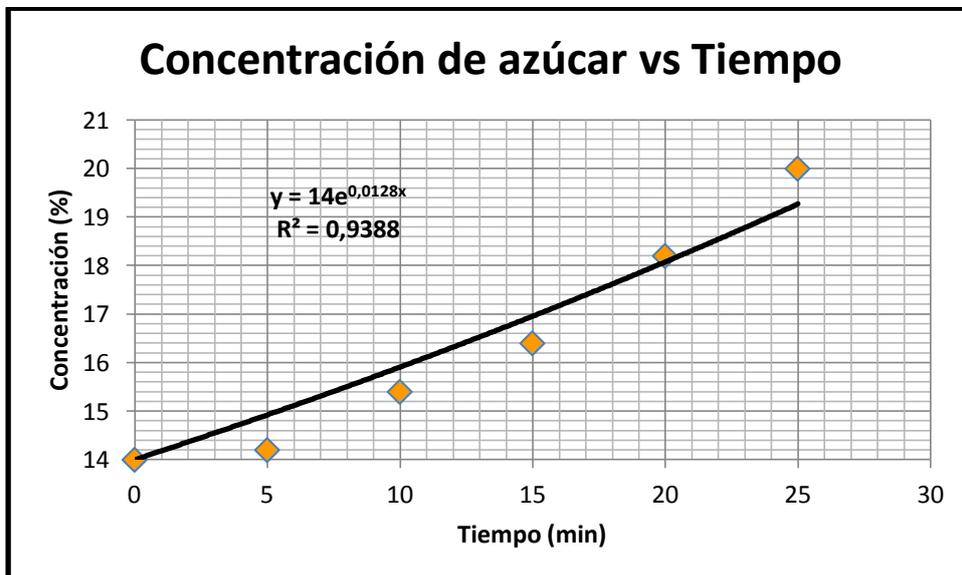


Gráfico 7.6 Concentración vs Tiempo de la Prueba #6

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

7.2 Tratamiento matemático y análisis de los datos experimentales

A continuación se procederá a calcular el coeficiente global de transferencia de calor y la eficiencia de cada una de las pruebas efectuadas:

Prueba #1

Datos:

$$F = 57 \text{ kg/h}$$

$$x_F = 0,14$$

$$x_L = 0,202$$

$$S = 24,4 \text{ kg/h}$$

$$P_V = 118,56 \text{ kPa}$$

$$\lambda_S = 2244,92 \text{ kJ/kg (Tabla de vapor; a 118,56 kPa)}$$

$$T_S = 104,34 \text{ °C (Tabla de vapor; a 118,56 kPa)}$$

$$T_1 = 97 \text{ °C}$$

$$A = 1,2 \text{ m}^2$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor utilizaremos la ecuación de diseño:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- **Cálculo de Q y ΔT**

$$Q = S \cdot \lambda_s \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Q = (24,4)(2244,92)$$

$$Q = 54776,05 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\Delta T = T_s - T_1 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$\Delta T = 104,34 - 97$$

$$\Delta T = 7,34$$

- **Cálculo de U**

$$U = \frac{54776,05}{(1,2)(7,34)}$$

$$U = 6218,9 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- **Cálculo de V**

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$Fx_F = Lx_L \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$57(0,14) = L(0,202)$$

$$L = 39,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$V = 57 - 39,5$$

$$V = 17,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Cálculo de la eficiencia del evaporador**

$$E = \frac{V}{S} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$E = \frac{17,5}{24,4}$$

$$E = 0,717$$

Prueba #2

Datos:

$$F = 57 \text{ kg/h}$$

$$x_F = 0,14$$

$$x_L = 0,20$$

$$S = 24 \text{ kg/h}$$

$$P_V = 127,18 \text{ kPa}$$

$$\lambda_S = 2239,33 \text{ kJ/kg (Tabla de vapor; a } 127,18 \text{ kPa)}$$

$$T_S = 106,44 \text{ }^\circ\text{C (Tabla de vapor; a } 127,18 \text{ kPa)}$$

$$T_1 = 98 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = 1,2 \text{ m}^2$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor utilizaremos la ecuación de diseño:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- Cálculo de Q y ΔT

$$Q = S \cdot \lambda_S \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Q = (24)(2239,33)$$

$$Q = 53743,92 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\Delta T = T_S - T_1 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$\Delta T = 106,44 - 98$$

$$\Delta T = 8,44$$

- **Cálculo de U**

$$U = \frac{53743,92}{(1,2)(8,44)}$$

$$U = 5306,47 \frac{kJ}{h m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- **Cálculo de V**

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$F x_F = L x_L \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$57(0,14) = L(0,20)$$

$$L = 39,9 \frac{kg}{h}$$

$$V = 57 - 39,9$$

$$V = 17,1 \frac{kg}{h}$$

- **Cálculo de la eficiencia del evaporador**

$$E = \frac{V}{S} \quad (Ec. 3.14)$$

$$E = \frac{17,1}{24}$$

$$E = 0,713$$

Prueba #3

Datos:

$$F = 57 \text{ kg/h}$$

$$x_F = 0,14$$

$$x_L = 0,204$$

$$S = 25,1 \text{ kg/h}$$

$$P_V = 135,8 \text{ kPa}$$

$$\lambda_S = 2234,29 \text{ kJ/kg (Tabla de vapor; a } 135,8 \text{ kPa)}$$

$$T_S = 108,29 \text{ }^\circ\text{C (Tabla de vapor; a } 135,8 \text{ kPa)}$$

$$T_1 = 99 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = 1,2 \text{ m}^2$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor utilizaremos la ecuación de diseño:

$$Q = U.A.\Delta T \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- Cálculo de Q y ΔT

$$Q = S.\lambda_s \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Q = (25,1)(2234,29)$$

$$Q = 56080,68 \frac{kJ}{h}$$

$$\Delta T = T_s - T_1 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$\Delta T = 108,29 - 99$$

$$\Delta T = 9,29$$

- Cálculo de U

$$U = \frac{56080,68}{(1,2)(9,29)}$$

$$U = 5030,56 \frac{kJ}{h m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- **Cálculo de V**

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$Fx_F = Lx_L \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$57(0,14) = L(0,204)$$

$$L = 39,12 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$V = 57 - 39,12$$

$$V = 17,88 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Cálculo de la eficiencia del evaporador**

$$E = \frac{V}{S} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$E = \frac{17,88}{25,1}$$

$$E = 0,712$$

TABLA XIII: RESULTADO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Prueba	Área	S	Q	ΔT	U	F	L	V	x_F	x_L	E
#	m ²	kg/h	kJ/h	°C	kJ/h m ² °C	kg/h	kg/h	kg/h	%	%	%
1	1,2	24,4	54776,05	7,34	6218,9	57	39,5	17,5	14	20,2	0,717
2	1,2	24	53743,92	8,44	5306,47	57	39,9	17,1	14	20	0,713
3	1,2	25,1	56080,68	9,29	5030,56	57	39,12	17,88	14	20,4	0,712
4	1,2	23,5	52624,26	8,44	5195,92	57	40,3	16,7	14	19,8	0,711
5	1,2	24,5	54740,11	9,29	4910,31	57	39,5	17,5	14	20,2	0,714
6	1,2	24,5	54863,59	8,44	5417,02	57	39,9	17,1	14	20	0,698

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. **Operación del equipo:** El tiempo empleado en alcanzar la temperatura de ebullición de la solución fue de 30 minutos; estas condiciones nos permiten establecer que los coeficientes de transferencia de calor son aceptables, para que el equipo sea empleado en una sesión didáctica que generalmente dura 2 horas.
2. Las concentraciones obtenidas en las diferentes prácticas están en el orden de 20 °BRIX, en el término de 30 - 45 minutos; esto se logró alimentando una solución de concentración inicial de 10 - 14 °BRIX.
3. La eficiencia del Evaporador en las diferentes prácticas, cuyos valores promedio fue de 70%; los mismos que son aceptables para evaporadores de tubos cortos verticales.
4. Considerando que se trabajó con una solución azucarada; la elevación del punto de ebullición fue mínima; valores que están en concordancia con los que determina la ecuación:

$$EPE = 0,025B \left(\frac{30 + B}{103,6 - B} \right) \left(1 - \frac{0,54 h}{229 - h} \right) \quad (Ec. 2.2)$$

5. **Datos experimentales:** Los valores obtenidos de U (coeficiente global de transferencia de calor), trabajando con vapor a 5 psia; y una diferencia de temperatura de (7 - 10) °C; están en el orden de (4500 - 6500) kJ/h m² °C, que corresponden a valores típicos encontrados en la bibliografía para esta clase de equipo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que después de cada práctica, se efectúe un mantenimiento, que radica en bombear agua por espacio de 6 minutos al evaporador, con la finalidad de eliminar rastros de solución usada.
2. El equipo está diseñado para realizar prácticas de laboratorio con otros tipos de soluciones como cloruro de sodio e hidróxido de sodio.
3. Cada 6 meses, realizar un mantenimiento adecuado al equipo, revisando el estado de las válvulas del mismo, los conductos de los manómetros y de la trampa de vapor que no se encuentren tapados para que el evaporador tenga un tiempo de vida útil más prolongado.
4. Mantener el nivel del líquido en el evaporador sobre el haz de tubos para obtener una concentración homogénea.
5. Colocar lana mineral para recubrir el evaporador y así evitar quemaduras en las personas que realicen prácticas en dicho equipo.
6. Tener cuidado al abrir la válvula de aire debido a que ésta expulsa el vapor no condensado que se encuentra dentro de la cámara de calefacción y podría ocasionar quemaduras por la alta temperatura a la que se encuentra dicho vapor, así que se recomienda abrir esta válvula a un costado de la misma.
7. Al momento de abrir la válvula de concentrado, procurar llevar pantalón largo y zapatos cerrados; de esta manera se evita quemaduras por la salpicadura que produce el evaporador al momento de la descarga.

APÉNDICES

APÉNDICE A

APÉNDICE A1

Tabla de datos del espesor recomendado para un material, de acuerdo a las diferentes presiones para carcazas

Tabla #1

Presiones para carcazas (psia)	Espesor Recomendado (mm)
30	1
60	1,92
120	4
300	9,52

Fuente: Diseño, Construcción y Montaje de una Unidad de Evaporación de Doble Efecto con fines didácticos; Cárdenas G., Chong-Qui E., Valdivieso M., Ecuador, 1984.

Tabla de datos de los coeficientes de resistencia de un material a diferentes temperaturas

Tabla #2

Coeficiente de Resistencia del Material "k" (kg/mm ²)			
Material	250 °C	300 °C	350 °C
St 35 – 8	17	15	13
St 45 – 8	19	17	15
15 Mo 3	25	24	22
13 Cr – Mo 44	27	26	24

Fuente: Diseño, Construcción y Montaje de una Unidad de Evaporación de Doble Efecto con fines didácticos; Cárdenas G., Chong-Qui E., Valdivieso M., Ecuador, 1984.

APÉNDICE A2

Tabla de datos de los coeficientes de seguridad de un material

Tabla #3

Coeficiente de Seguridad "S"	
Elemento	Coeficiente de Seguridad
Tubos de caldera y recalentadores	1,5 a 1,8
Placas de Centrado:	
Fondo embutido	1,5
Fondo plano	1,5

Fuente: Diseño, Construcción y Montaje de una Unidad de Evaporación de Doble Efecto con fines didácticos; Cárdenas G., Chong-Qui E., Valdivieso M., Ecuador, 1984.

Tabla de datos del espaciamiento

Tabla #4

Espaciamiento mínimo de centro a centro					
Diámetro exterior del tubo (in)	5/8	3/4	1	1 1/2	2
Espaciamiento triangular	1,1875	1,3125	1,25	1,75	2,25
Espaciamiento rectangular	0,875	1	1,25	1,75	2,25

Fuente: Diseño, Construcción y Montaje de una Unidad de Evaporación de Doble Efecto con fines didácticos; Cárdenas G., Chong-Qui E., Valdivieso M., Ecuador, 1984.

APÉNDICE A3

Tablas de Vapor de Agua, Tabla de temperaturas

914 PROPERTY TABLES AND CHARTS												
TABLE A-4 Saturated water—Temperature table												
Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Fuente: Thermodynamics An Engineering Approach; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Séptima Edición; 2011

Tablas de Vapor de Agua, Tabla de temperaturas

915

APPENDIX 1

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $kJ/kg \cdot K$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Source: Tables A-4 through A-8 are generated using the Engineering Equation Solver (EES) software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. The routine used in calculations is the highly accurate Steam_IAPWS, which incorporates the 1995 Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, issued by The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). This formulation replaces the 1984 formulation of Haar, Gallagher, and Keil (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), which is also available in EES as the routine STEAM. The new formulation is based on the correlations of Saul and Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) with modifications to adjust to the International Temperature Scale of 1990. The modifications are described by Wagner and Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). The properties of ice are based on Hyland and Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K," ASHRAE Trans., Part 2A, Paper 2793, 1983.

Fuente: Thermodynamics An Engineering Approach; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Séptima Edición; 2011

APÉNDICE A4

Tablas de Vapor de Agua, Tabla de presiones

916
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Fuente: Thermodynamics An Engineering Approach; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Séptima Edición; 2011

Tablas de Vapor de Agua, Tabla de Presiones

917

APPENDIX 1

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table (Concluded)

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Thermodynamics An Engineering Approach; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Séptima Edición; 2011

APÉNDICE A5

Factores de conversión

Conversion Factors

DIMENSION	METRIC	METRIC/ENGLISH
Acceleration	1 m/s ² = 100 cm/s ²	1 m/s ² = 3.2808 ft/s ² 1 ft/s ² = 0.3048* m/s ²
Area	1 m ² = 10 ⁴ cm ² = 10 ⁶ mm ² = 10 ⁻⁶ km ²	1 m ² = 1550 in ² = 10.764 ft ² 1 ft ² = 144 in ² = 0.09290304* m ²
Density	1 g/cm ³ = 1 kg/L = 1000 kg/m ³	1 g/cm ³ = 62.428 lbm/ft ³ = 0.036127 lbm/in ³ 1 lbm/in ³ = 1728 lbm/ft ³ 1 kg/m ³ = 0.062428 lbm/ft ³
Energy, heat, work, internal energy, enthalpy	1 kJ = 1000 J = 1000 N · m = 1 kPa · m ³ 1 kJ/kg = 1000 m ² /s ² 1 kWh = 3600 kJ 1 cal [†] = 4.184 J 1 IT cal [†] = 4.1868 J 1 Cal [†] = 4.1868 kJ	1 kJ = 0.94782 Btu 1 Btu = 1.055056 kJ = 5.40395 psia · ft ³ = 778.169 lbf · ft 1 Btu/lbm = 25,037 ft ² /s ² = 2.326* kJ/kg 1 kJ/kg = 0.430 Btu/lbm 1 kWh = 3412.14 Btu 1 therm = 10 ⁵ Btu = 1.055 × 10 ⁵ kJ (natural gas)
Force	1 N = 1 kg · m/s ² = 10 ⁵ dyne 1 kgf = 9.80665 N	1 N = 0.22481 lbf 1 lbf = 32.174 lbm · ft/s ² = 4.44822 N
Heat flux	1 W/cm ² = 10 ⁴ W/m ²	1 W/m ² = 0.3171 Btu/h · ft ²
Heat transfer coefficient	1 W/m ² · °C = 1 W/m ² · K	1 W/m ² · °C = 0.17612 Btu/h · ft ² · °F
Length	1 m = 100 cm = 1000 mm = 10 ⁶ μm 1 km = 1000 m	1 m = 39.370 in = 3.2808 ft = 1.0926 yd 1 ft = 12 in = 0.3048* m 1 mile = 5280 ft = 1.6093 km 1 in = 2.54* cm
Mass	1 kg = 1000 g 1 metric ton = 1000 kg	1 kg = 2.2046226 lbm 1 lbm = 0.45359237* kg 1 ounce = 28.3495 g 1 slug = 32.174 lbm = 14.5939 kg 1 short ton = 2000 lbm = 907.1847 kg
Power, heat transfer rate	1 W = 1 J/s 1 kW = 1000 W = 1.341 hp 1 hp [‡] = 745.7 W	1 kW = 3412.14 Btu/h = 737.56 lbf · ft/s 1 hp = 550 lbf · ft/s = 0.7068 Btu/s = 42.41 Btu/min = 2544.5 Btu/h = 0.74570 kW 1 boiler hp = 33,475 Btu/h 1 Btu/h = 1.055056 kJ/h 1 ton of refrigeration = 200 Btu/min
Pressure	1 Pa = 1 N/m ² 1 kPa = 10 ³ Pa = 10 ⁻³ MPa 1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bars = 760 mm Hg at 0°C = 1.03323 kgf/cm ² 1 mm Hg = 0.1333 kPa	1 Pa = 1.4504 × 10 ⁻⁴ psia = 0.020886 lbf/ft ² 1 psi = 144 lbf/ft ² = 6.894757 kPa 1 atm = 14.696 psia = 29.92 in Hg at 30°F 1 in Hg = 3.387 kPa
Specific heat	1 kJ/kg · °C = 1 kJ/kg · K = 1 J/g · °C	1 Btu/lbm · °F = 4.1868 kJ/kg · °C 1 Btu/lbmol · R = 4.1868 kJ/kmol · K 1 kJ/kg · °C = 0.23885 Btu/lbm · °F = 0.23885 Btu/lbm · R

*Exact conversion factor between métric and English units.

†Calorie is originally defined as the amount of heat needed to raise the temperature of 1 g of water by 1°C, but it varies with temperature. The international steam table (IT) calorie (generally preferred by engineers) is exactly 4.1868 J by definition and corresponds to the specific heat of water at 15°C. The thermochemical calorie (generally preferred by physicists) is exactly 4.184 J by definition and corresponds to the specific heat of water at room temperature. The difference between the two is about 0.05 percent, which is negligible. The capitalized Calorie used by nutritionists is actually a kilocalorie (1000 IT calories).

Fuente: Thermodynamics An Engineering Approach; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Séptima Edición; 2011

Factores de conversión

DIMENSION	METRIC	METRIC/ENGLISH
Specific volume	$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 1000 \text{ L}/\text{kg} = 1000 \text{ cm}^3/\text{g}$	$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 16.02 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ $1 \text{ ft}^3/\text{lbm} = 0.062428 \text{ m}^3/\text{kg}$
Temperature	$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$ $\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67 = 1.8T(\text{K})$ $T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 T(^{\circ}\text{C}) + 32$ $\Delta T(^{\circ}\text{F}) = \Delta T(\text{R}) = 1.8 \Delta T(\text{K})$
Thermal conductivity	$1 \text{ W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C} = 1 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$1 \text{ W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C} = 0.57782 \text{ Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{F}$
Velocity	$1 \text{ m}/\text{s} = 3.60 \text{ km}/\text{h}$	$1 \text{ m}/\text{s} = 3.2808 \text{ ft}/\text{s} = 2.237 \text{ mi}/\text{h}$ $1 \text{ mi}/\text{h} = 1.46667 \text{ ft}/\text{s}$ $1 \text{ mi}/\text{h} = 1.6093 \text{ km}/\text{h}$
Volume	$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = 10^6 \text{ cm}^3 \text{ (cc)}$	$1 \text{ m}^3 = 6.1024 \times 10^4 \text{ in}^3 = 35.315 \text{ ft}^3$ $= 264.17 \text{ gal (U.S.)}$ $1 \text{ U.S. gallon} = 231 \text{ in}^3 = 3.7854 \text{ L}$ $1 \text{ fl ounce} = 29.5735 \text{ cm}^3 = 0.0295735 \text{ L}$ $1 \text{ U.S. gallon} = 128 \text{ fl ounces}$
Volume flow rate	$1 \text{ m}^3/\text{s} = 60,000 \text{ L}/\text{min} = 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$	$1 \text{ m}^3/\text{s} = 15,850 \text{ gal}/\text{min (gpm)} = 35.315 \text{ ft}^3/\text{s}$ $= 2118.9 \text{ ft}^3/\text{min (cfm)}$

[†]Mechanical horsepower. The electrical horsepower is taken to be exactly 746 W.

Fuente: Thermodynamics An Engineering Approach; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Séptima Edición; 2011

APÉNDICE A6

Calor específico del agua

Calor específico del agua entre 0 °C y 100 °C

Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico	
	$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$		$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$		$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$
0 (hielo)	1,960	0,468	34	4,178	0,999	68	4,189	1,001
0	4,217	1,008	35	4,178	0,999	69	4,189	1,001
1	4,213	1,007	36	4,178	0,999	70	4,190	1,001
2	4,210	1,006	37	4,178	0,999	71	4,190	1,001
3	4,207	1,005	38	4,178	0,999	72	4,191	1,002
4	4,205	1,005	39	4,179	0,999	73	4,192	1,002
5	4,202	1,004	40	4,179	0,999	74	4,192	1,002
6	4,200	1,004	41	4,179	0,999	75	4,193	1,002
7	4,198	1,003	42	4,179	0,999	76	4,194	1,002
8	4,196	1,003	43	4,179	0,999	77	4,194	1,002
9	4,194	1,002	44	4,179	0,999	78	4,195	1,003
10	4,192	1,002	45	4,180	0,999	79	4,196	1,003
11	4,191	1,002	46	4,180	0,999	80	4,196	1,003
12	4,189	1,001	47	4,180	0,999	81	4,197	1,003
13	4,188	1,001	48	4,180	0,999	82	4,198	1,003
14	4,187	1,001	49	4,181	0,999	83	4,199	1,004
15	4,186	1,000	50	4,181	0,999	84	4,200	1,004
16	4,185	1,000	51	4,181	0,999	85	4,200	1,004
17	4,184	1,000	52	4,182	1,000	86	4,201	1,004
18	4,183	1,000	53	4,182	1,000	87	4,202	1,004
19	4,182	1,000	54	4,182	1,000	88	4,203	1,005
20	4,182	1,000	55	4,183	1,000	89	4,204	1,005
21	4,181	0,999	56	4,183	1,000	90	4,205	1,005
22	4,181	0,999	57	4,183	1,000	91	4,206	1,005
23	4,180	0,999	58	4,184	1,000	92	4,207	1,005
24	4,180	0,999	59	4,184	1,000	93	4,208	1,006
25	4,180	0,999	60	4,185	1,000	94	4,209	1,006
26	4,179	0,999	61	4,185	1,000	95	4,210	1,006
27	4,179	0,999	62	4,186	1,000	96	4,211	1,006
28	4,179	0,999	63	4,186	1,000	97	4,212	1,007
29	4,179	0,999	64	4,187	1,001	98	4,213	1,007
30	4,178	0,999	65	4,187	1,001	99	4,214	1,007
31	4,178	0,999	66	4,188	1,001	100	4,216	1,008
32	4,178	0,999	67	4,188	1,001	100 (gas)	2,080	0,497
33	4,178	0,999						

Para efecto de cálculo, $1\text{kJ/kg } ^\circ\text{K} = 1\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$, según el Apéndice A5

Fuente: www.vaxasoftware.com

APÉNDICE B

APÉNDICE B1

ESPECIFICACIONES DEL ACERO COMERCIAL 304 Y 304L

1) Descripción

Estos aceros austeníticos forman parte de la serie 300, según las normas AISI, que cubre un amplio grupo de aleaciones de austenítico de cromo-níquel. También son conocidos como 18/8 debido a su composición química, que incluye aproximadamente 18% de cromo y 8% de níquel en peso. [18]

El 304L es una variación del 304 con un menor contenido de carbono, mejorando su facilidad de soldadura y reduce el riesgo de corrosión, además de ser un poco menos fuerte. [18]

2) Propiedades físico-químicas

Las propiedades físico-químicas del acero comercial 304 son: [19]

- Densidad 7,8 g/cm³ (0,28 lb/in³)
- 0,08 % C máx.
- 2,00 % Mn máx.
- 0,04 % P máx.
- 0,03 % S máx.
- 1,00 % Si máx.

- 18,00 % / 20,00 % Cr
- 8,00 % / 10,50 % Ni

Las propiedades físico-químicas del acero comercial 304L son: [19]

- Densidad 7,8 g/cm³ (0,28 lb/in³)
- 0,03 % C máx.
- 2,00 % Mn máx.
- 0,04 % P máx.
- 0,03 % S máx.
- 1,00 % Si máx.
- 18,00 % / 20,00 % Cr
- 8,00 % / 12,00 % Ni

3) Ventajas

Las ventajas que presentan estos aceros austeníticos es su excelente formabilidad, alta resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y de limpieza, buena soldabilidad y apariencia, alta resistencia con bajo peso [20] y se pueden utilizar tanto a bajas como a altas temperaturas. La ventaja en el tipo 304L, es que se minimiza el problema de la precipitación de carburos durante el proceso de soldadura [19].

4) Aplicaciones

Sus usos son muy variados, se destacan los equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego.

[21]

Se usó para la confección de los espejos y bridas y las diferentes partes que compone el evaporador.

Los sectores industriales que utilizan este tipo de acero inoxidable son: [18]

- Procesamiento de Alimentos y Bebidas
- Industria Química
- Productos Farmacéuticos
- Petroquímica

APÉNDICE B2

ESPECIFICACIONES DEL ACERO 705

5) Descripción

El acero 705 es un acero al molibdeno, material que tiene una solubilidad limitada y es un buen formador de carburos. Al combinarse con níquel y cromo soporta altas exigencias de resistencia y tenacidad en secciones grandes. [22]

6) Propiedades físico-químicas

Las propiedades físico-químicas del acero 705 son: [23]

- 0,38 - 0,43 % C
- 0,7 - 0,9 % Cr
- 1,65 - 2,00 % Ni
- 0,6 - 0,8 % Mn
- 0,2 - 0,3 % Mo
- 0,15 - 0,35 % Si
- 0,009 % P
- 0,002 % S
- 0,093 % Cu

7) Ventajas

Las ventajas que presenta este acero martensítico es que conserva su dureza y resistencia a altas temperaturas, alta templabilidad, altamente resistente a la tracción, torsión y a cambios de flexión y menos susceptibles al fragilizado. [23]

8) Aplicaciones

Se los usa en partes de maquinarias y repuestos de mayores dimensiones sometidos a altos esfuerzos dinámicos como pernos y tuercas de alta tensión, tornillos sin fin, etc. [22]

Se usó para la confección de las bridas del evaporador.

APÉNDICE B3

ESPECIFICACIONES DE LA SOLDADURA CON ARCO ELÉCTRICO

9) Descripción

El electrodo 6011 posee un revestimiento con un alto contenido de materia orgánica (celulosa), diseñado para ser usado con corriente alterna, pero también puede ser utilizado con corriente continua. [24]

Es un electrodo positivo de alta penetración y buena tenacidad a temperaturas bajo cero; además, es apto para ser utilizado en todas las aplicaciones de soldadura en acero dulce. [24]

10) Propiedades físico-químicas

Las propiedades físico-químicas del electrodo 6011 son: [24]

- 0,11 % C
- 0,41 % Mn
- 0,23 % Si
- 0,010 % P
- 0,017 % S

11) Aplicaciones

Se lo utiliza para soldar cañerías de oleoductos, estructuras, planchas galvanizadas. [24]

Este electrodo fue utilizado para soldar la estructura de soporte del evaporador.

APÉNDICE B4

ESPECIFICACIONES DE LA SOLDADURA TIG

12) Descripción

Este sistema utiliza electrodos TIG, que son de tungsteno puro (99,55%). Su capacidad conductiva es menor que en otros electrodos. Proveen buena estabilidad al utilizarlos con corriente alterna de alta frecuencia.

Se utiliza un gas de protección para desplazar el aire; y así, eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera. Se puede emplear argón o helio como gas de protección. [24]

13) Propiedades físico-químicas

Las propiedades físico-químicas del electrodo TIG, para acero inoxidable 304 y 304L, son: [24]

- 0,025 % C
- 20,5 % Cr
- 10 % Ni
- 1,80 % Mn
- 0,40 % Si

- 0,015 % P
- 0,015 % S

14) Aplicaciones

Se lo utiliza para soldar cañerías, unión de espesores delgados y mayores, aplicaciones de recubrimientos. [24]

Este electrodo fue utilizado para soldar todas las partes del evaporador que fueron construidas con acero inoxidable 304 y 304L.

APÉNDICE C

APÉNDICE C1

Figuras de la Construcción del Evaporador

I)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

II)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

III)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

V)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VIII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IX)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

X)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XIII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XIV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XVI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

APÉNDICE C2

Figuras de la Construcción del Soporte del Evaporador

I)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

II)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

III)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

V)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VIII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IX)



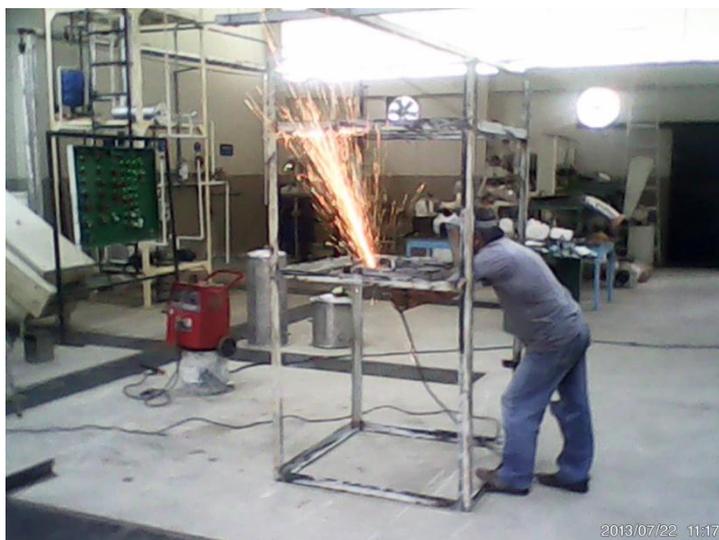
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

X)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XIII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

XIV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

APÉNDICE C3

Figuras de las Tuberías y Accesorios para el Evaporador

I)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

II)



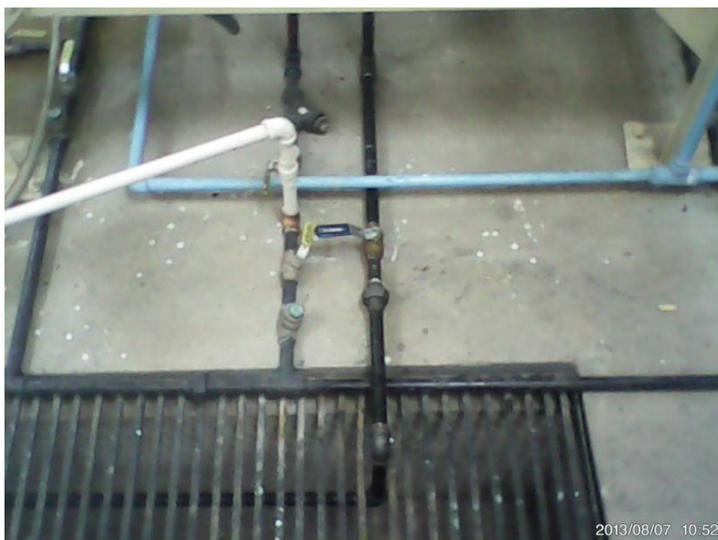
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

III)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

V)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

APÉNDICE C4

Figuras de la Instalación del Sistema Eléctrico

I)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

II)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

III)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IV)



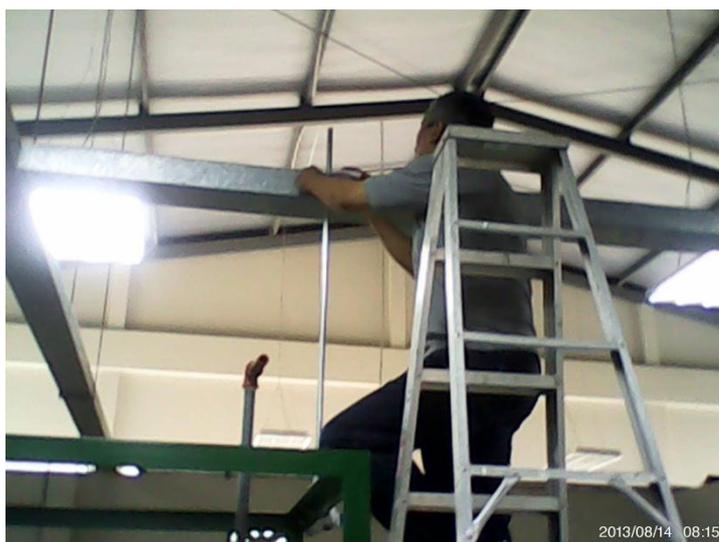
Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

V)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VI)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VIII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

APÉNDICE C5

Figuras de Puesta en Marcha del Evaporador

I)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

II)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

III)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

IV)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

v)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

vi)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

VIII)



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

APÉNDICE D

APÉNDICE D1

GUÍA DE PRÁCTICAS PARA LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

1) **Objetivos**

- Comprender el funcionamiento de un Evaporador de Tubos Verticales Cortos a nivel planta piloto para llevar a cabo su operación.
- Determinar los coeficientes globales de transferencia de calor.
- Calcular la eficiencia de evaporación del equipo construido

2) **Fundamentos Teóricos**

En la evaporación se elimina el vapor formado por ebullición de una solución líquida de la que se obtiene de una solución concentrada. La velocidad media (o promedio) de las moléculas sólo depende de la temperatura, pero puede haber moléculas individuales que se muevan a una velocidad mucho mayor o mucho menor que la media. A temperaturas por debajo del punto de ebullición, es posible que moléculas individuales que se aproximen a la superficie con una velocidad superior a la media tengan suficiente energía para escapar de la superficie y pasar al espacio situado por encima como moléculas de gas.

Como sólo se escapan las moléculas más rápidas, la velocidad media de las demás moléculas disminuye; dado que la temperatura, a su vez, sólo depende de la velocidad media de las moléculas, la temperatura del líquido que queda también disminuye. Es decir, la evaporación es un proceso que enfría; si se pone una gota de agua sobre la piel, se siente frío cuando se evapora. En el caso de una gota de alcohol, que se evapora con más rapidez que el agua, la sensación de frío es todavía mayor.

Si un líquido se evapora en un recipiente cerrado, el espacio situado sobre el líquido se llena rápidamente de vapor, y la evaporación se ve pronto compensada por el proceso opuesto, la condensación. Para que la evaporación continúe produciéndose con rapidez hay que eliminar el vapor tan rápido como se forma. Por este motivo, un líquido se evapora con la máxima rapidez cuando se crea una corriente de aire sobre su superficie o cuando se extrae el vapor con una bomba de vacío.

Un evaporador es un intercambiador de calor entre fluidos, de modo que mientras uno de ellos se enfría, disminuyendo su temperatura, el otro se calienta aumentando su temperatura, pasando de su estado líquido original a estado vapor (cabiendo la posibilidad de un

calentamiento ulterior, con lo que se dice que alcanza el estado de vapor sobrecalentado).

3) Materiales y Equipos

- Evaporador de Tubos Cortos Verticales
- Intercambiador de calor
- Refractómetro
- Vaso de plástico
- Azúcar
- Agua
- Cronómetro
- Termómetro
- Baldes de plástico (aproximadamente de 10 L)

4) Características del Equipo

Este equipo tiene las siguientes especificaciones:

- Material: Acero Inoxidable
- Área de la cámara de calefacción: $1,2 \text{ m}^2$
- Número de tubos: 30
- Diámetro externo de los tubos: 0,0318 m

- Longitud de los tubos: 0,40 m
- Arreglo de los tubos: triangular
- Diámetro del tubo central: 0,0762 m
- Diámetro del evaporador: 0,35 cm
- Diámetro de las bridas: 0,025 m
- Espesor de las bridas: 0,004 m
- Altura de la cámara de evaporación: 0,80 m
- Altura del tapón capa de concentrado: 0,08 m
- Altura del tapón capa de vapor: 0,10 m

5) Procedimiento experimental

- 1) Poner en operación el caldero, con las recomendaciones de seguridad impartidas, fijar la presión de operación en 20 psig.
- 2) Cerciorar que todas las válvulas del evaporador estén cerradas, a excepción de las válvulas de nivel.
- 3) Colocar los baldes plásticos bajo las válvulas y tuberías de salida del equipo y del intercambiador de calor.
- 4) Preparar una solución de agua azucarada, agitando vigorosamente y cuidando obtener una solución lo más homogénea posible.

- 5) Utilizar el refractómetro para determinar la concentración de la solución preparada.
- 6) Utilizar el termómetro para medir la temperatura de dicha solución.
- 7) Colocar la solución en el tanque de alimentación del equipo.
- 8) Abrir las válvulas de alimentación y de reflujo.
- 9) Colocar el switch del breque de protección en **on** y encender la bomba para llenar el equipo a 1/3 de la cámara de evaporación.
- 10) Una vez que solución esté en el nivel indicado, abrir la válvula para la entrada de vapor. Procurar controlar el nivel de la solución, mediante el proceso de abrir y cerrar lentamente la válvula de control de nivel.
- 11) Registrar cada 5 minutos, la temperatura del condensado de vapor de la solución, la presión de vapor; además, recoger la muestra de condensado y pesarla en la balanza. En ese mismo tiempo, tomar una muestra de solución concentrada.
- 12) Utilizar el refractómetro para determinar el porcentaje de sacarosa (grados BRIX) de la solución concentrada.
- 13) Una vez terminada la práctica, apagar la bomba, colocar el switch del breque en **off**, cerrar las válvulas de alimentación, reflujo, de nivel y abrir la válvula de purga, la válvula de salida de aire y la llave de agua del laboratorio para enfriar el intercambiador de calor.

- 14) Una vez que cesa la operación, abrir la válvula de concentrado para recoger el producto final de la evaporación y medir su respectiva temperatura.
- 15) Registrar los datos tomados en una tabla y realizar los cálculos respectivos.

6) Toma de Datos

Las mediciones a tomar son las siguientes:

- Tiempo (min): T
- Flujo de alimentación que entra al evaporador (kg/h): F
- Concentración inicial de la solución (%): x_F
- Concentración final de la solución (%): x_L
- Cantidad de vapor de agua que entra a la cámara de calefacción (kg/h): S
- Presión de vapor de agua (psia): P_V
- Calor latente del vapor de agua (kJ/kg): λ_S
- Temperatura del vapor de agua ($^{\circ}\text{C}$): T_S
- Temperatura del vapor de la solución ($^{\circ}\text{C}$): T_1

7) Cálculos

Los cálculos a efectuarse son los siguientes:

- Cantidad de calor transferido al evaporador (Q)

$$Q = S \cdot \lambda_S$$

- Cambio de temperatura (ΔT)

$$\Delta T = T_S - T_1$$

- Coeficiente global de transferencia de calor (U)

$$U = \frac{Q}{A \cdot T}$$

- Cantidad de vapor de la solución que sale del evaporador (V)

$$F = L + V$$

$$F x_F = L x_L$$

- Eficiencia del evaporador (E)

$$E = \frac{V}{S}$$

8) Gráficos

Los gráficos a realizar son los siguientes:

- Variación de la concentración (x_L) en función del tiempo
- El coeficiente global **U** en función de la presión de vapor.

9) Resultados

Los resultados experimentales a reportar son los siguientes:

- Cantidad de calor transferido al evaporador (Q)
- Cambio de temperatura (ΔT)
- Coeficiente global de transferencia de calor (U)
- Cantidad de vapor de la solución que sale del evaporador (V)
- Eficiencia del evaporador (E)

10) Conclusiones y Recomendaciones

11) Bibliografía

- <http://evaporacion21.blogspot.com/>
- [http://www.ecured.cu/index.php/Evaporaci%C3%B3n_\(operaci%C3%B3n_unitaria\)](http://www.ecured.cu/index.php/Evaporaci%C3%B3n_(operaci%C3%B3n_unitaria))

12) Anexos

APÉNDICE E

APÉNDICE E1

Tabla Densidad-Concentración de NaCl: 20/4°C

Tabla #5

%P	Densidad
1	1.0053
2	1.0125
4	1.0268
6	1.0413
8	1.0559
10	1.0707
12	1.0857
14	1.1008
16	1.1162
18	1.1319
20	1.1478
22	1.1640
24	1.1804
26	1.1972

Fuente:

<http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/quimica1/PracticosBioingeniera/TablaDensidad.doc>.

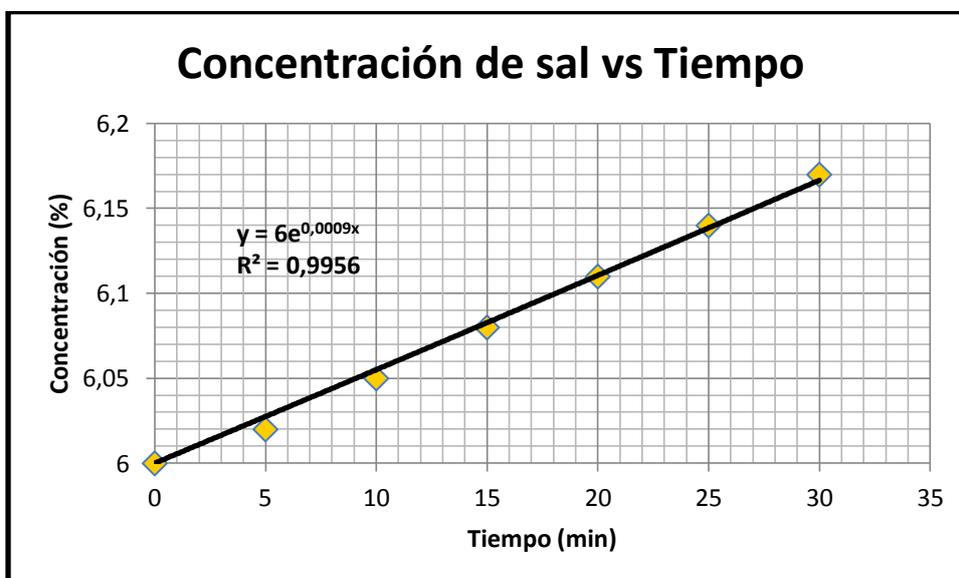
APÉNDICE E2

Tabla de la prueba de una solución salina en el evaporador. Gráfico de Concentración vs Tiempo

TABLA #5

PRUEBA #1							
Tiempo	P _v	F	ρ	x _F	x _L	S	T ₁
0	106,49 kPa	57 kg/h	1,040	6	6	5 kg/h	95 °C
5			1,045	6	6,02		
10			1,050	6	6,05		
15			1,055	6	6,08		
20			1,060	6	6,11		
25			1,065	6	6,14		
30			1,070	6	6,17		

Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.



Fuente: Basantes F., Montesdeoca N., Santos M.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Escobar S., Santillán O. *Diseño y Construcción de un Evaporador de Simple Efecto con Serpentin Horizontal para la Obtención de Arequipe*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1670>.

[2] Brown G. *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*. Editorial Marin, S.A. Barcelona, (1955), pág. 499.

[3] Gavilánez N., Hernández A. *Diseño y Construcción de un Evaporador de Simple Efecto para Concentrar Vinaza en la Empresa Soderal S.A.* <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2519/1/96T00201.pdf>.

[4] McCabe W., Smith J., Harriott P. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Editorial McGraw Hill/Interamericana de España, S.A. Madrid, Cuarta Edición, (1991), págs. 483 y 494 - 496.

[5] Espaqfe Ingeniería. [Homepage]. Word Widw Web. [Consultado el día 30 de mayo de 2013]. <http://www.espaqfe.com.ar/evaporacion/evaporacion1.htm>

[6] Mc. Adams, W., Gilliland, E. A. *Principios de Ingeniería Química*. Editorial McGraw-Hill. México D.F. Año 1985.

[7] Davinda, M.K., Brown & Root., *Selecting of Evaporators*. *Chemical Engineering*. February 1986.

[8] Cárdenas J., Chong-Qui E., Valdivieso M. *Diseño, Construcción y Montaje de una Unidad de Evaporación de Doble Efecto con fines didácticos*. Ecuador, (1984).

[9] Vodopivec, A., *Proyecto de Graduación "Diseño Integral a escala piloto, de una unidad didáctica de evaporación de doble efecto de tubos verticales cortos, para el laboratorio de Operaciones Unitarias del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales"*. ESPOL. Guayaquil. (2011). Págs. 22 y 23.

[10] Hugot E. *Handbook of Cane Sugar Engineering*. Editorial Elsevier, Third edition. (1986), págs. 508 - 509.

[11] Kern, D.Q., *Procesos de Transferencia de Calor*. Editorial Continental. México D.F. (1999). Págs.: 466.

[12] Weston C. *Fundamentos de Operaciones Unitarias: Serie de clases en Ingeniería Química*. Depto. de Ingeniería Química y Bioprocesos. Pontificia Universidad Católica de Chile. (2006).

[13] Cesca M. *Modelo Dinámico de la Evaporación Múltiple*. Argentina.

[14] Byrne R. *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (TEMA).
http://www.mediafire.com/view/j3c8ia4vb4yyzp7/TEMA_9TH_EDITION_2007.pdf.

[15] Márquez A., Limón G. *Diseño y Construcción de un Evaporador Tipo Calandria*.

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Fisicoquimica/32045233.html>.

[16] Enright C. *Normas sobre metales. Relevantes y Útiles*.

http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/enright_spjf09.html.

[17] Estupiñán R., Galarraga Y., Torres F., Antolinez F. *Aceros Inoxidables*.

<http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/26/7-aceros-inoxidables/>.

[18] Brown McFarlane. *Acero Inoxidable - Tipos 304 y 304L*.

<http://www.brownmac.com/products/stainless-steel-plate/304-and-304I-spanish.aspx>.

[19] IIRSACERO. *AISI 304 y 304L*.

http://iirsacero.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=56&Itemid=71.

[20] ThyssenKrupp Mexinox. *Acero Inoxidable 304 / 304L ficha técnica*.

http://www.mexinox.com.mx/documents/304_304L_Ficha_Tecnica.pdf.

[21] Suministros Técnicos S.A. *Acero Inoxidable AISI 304*.

<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>.

[22] Aceros Industriales H.G.B. *Acero 705*.

<http://acerosindustrialeshgb.blogspot.com/2010/11/acero-705.html>.

[23] Flores L. *Características acero SAE 4340, SAE 1020*.
<http://es.scribd.com/doc/63240812/Caracteristicas-acero-SAE-4340-SAE-1020>.

[24] INDURA S.A. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. Págs.
36 y 121.
http://www.indura.com.ec/_file/file_2182_manual%20de%20soldadura%20indura%202007.pdf.