



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN SIMULADOR POR COMPUTADORA
DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN EN UNA LÍNEA DE
EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO**

JOSÉ ALBERTO FRANCO FERNÁNDEZ

ASESORADO POR EL: ING. QCO. FEDERICO GUILLERMO SALAZAR

Guatemala, marzo de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SIMULADOR POR COMPUTADORA
DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN EN UNA LÍNEA DE
EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ ALBERTO FRANCO FERNÁNDEZ

ASESORADO POR ING. QCO. FEDERICO GUILLERMO SALAZAR
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SIMULADOR POR COMPUTADORA DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN EN UNA LÍNEA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química con fecha de 4 de agosto de 2005.

José Alberto Franco Fernández

DEDICATORIA A:

- Mi hermana Rebe, quien habría gustado estar en este acto, razón por la cual se lo dedico con mucho cariño.
- Mi hermana Gabriela, quien al partir a los Estados Unidos, jamás habría creído verme en este momento, y por quien he seleccionado esta fecha especial.
- Mis padres, que con su ejemplo y apoyo me han motivado para llegar a este punto en mi vida. Desde ya, sepan que es solo el inicio de un largo camino que recorreré, día a día con jornadas de esfuerzo, sufrimiento, dolor y sacrificio, para obtener el éxito en esta efímera vida, en la que tomamos prestado tiempo, para dar lo mejor de nosotros mismos y alcanzar cada momento un peldaño más alto en el escalafón de los sueños.

AGRADECIMIENTOS A:

Jesús, mi Dios y Señor, quien viviendo en este mundo de manera radical, me ha enseñado a vivir cada momento como si fuese el último y quien con su muerte ha dado sentido a mi vida, salvándome de mis pecados, le agradeceré siempre por tal muestra de amor.

Mis amigos, quienes me han apoyado hasta en el más excéntrico de mis sueños y proyectos, quienes han hecho de muchos sueños realidades y con quienes me gusta compartir cada momento de mi vida.

Mis abuelitos, con quienes pasamos bastantes tardes platicando de muchas anécdotas y situaciones, quienes me han dado consejo en momentos difíciles y quienes han estado allí siempre para apoyarme.

Mi familia de Costa Rica, por su cariño incondicional, a pesar de los años en que no he podido ir a visitarlos.

La familia Flores Muñoz por apoyarme siempre y reírse de mis locuras.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XVII
LISTADO DE SÍMBOLOS	XIX
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXVI
JUSTIFICACIÓN	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO TEÓRICO	1
Evaporación	1
1.1. Tipos de evaporadores	2
1.1.1. Evaporadores de marmita abierta	3
1.1.2. Evaporadores de tubos horizontales	4
1.1.3. Evaporadores vertical con circulación natural	5
1.1.4. Evaporador vertical de tubos largos	7
1.1.5. Evaporadores de caída de película	10
1.1.6. Evaporadores de película agitada	11
1.2. Factores que afectan la evaporación	11
1.2.1. Concentración	12
1.2.2. Solubilidad	13
1.2.3. Presión y temperatura	13
1.2.4. Sensibilidad térmica	14

1.2.5.	Formación de espumas	14
1.2.6.	Capacidad calorífica	15
1.2.7.	Presión de vapor	18
1.3.	Tipos de procesos de evaporación	20
1.3.1.	Evaporación de efecto simple	20
1.3.2.	Evaporación de efecto múltiple con alimentación hacia delante	21
1.3.3.	Evaporación de efecto múltiple con alimentación en retroceso	22
1.3.4.	Evaporación de efecto múltiple con alimentación en paralelo	22
1.4.	Simulación	23
1.5.	Modelación	24
1.5.1.	Variables del proceso	24
1.5.1.2.	Presión y puntos de ebullición	24
1.5.1.2.	Presión y puntos de ebullición	24
1.5.1.3.	Capacidades caloríficas	25
1.5.1.4.	Coefficientes totales de transferencia de calor	25
1.5.2.	Regresión de mínimos cuadrados	27
1.5.3.	Validación de modelos	28
1.6.	Algoritmos	29
1.6.1.	Partes de un algoritmo	30
1.6.2.	Encabezado de un algoritmo	30
1.6.3.	Declaración de variables	30
1.7.	Cuerpo del algoritmo	31
1.7.1.	Estructuras de bucle	31
1.7.1.1.	Estructura para	31
1.7.1.2.	Estructura repetir	32

1.7.1.3.	Estructura repetir	32
1.7.1.4.	Estructura mientras	32
1.7.2.	Estructuras condicionales	33
1.8.	Lenguajes de programación	34
1.8.1.	Lenguaje de máquina	34
1.8.2.	Lenguaje de bajo nivel	34
1.8.2.	Lenguaje de bajo nivel	34
1.8.3.	Lenguaje de alto nivel	34
1.9.	Compilación de programas	35
1.9.1.	Archivos ejecutables	35
1.10.	Artículo 12. Condiciones de protección	36
1.11.	Capítulo iv, sección segunda. Programas de ordenador y bases de datos	36
2.	METODOLOGÍA	39
3.	RESULTADOS	43
3.1.	Modelos matemáticos	43
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	REFERENCIAS	65

BIBLIOGRAFÍA	67
APÉNDICES	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Evaporador de marmita abierta	3
2. Evaporador de tubos horizontales	4
3. Evaporador vertical de tubos cortos	6
4. Evaporador de tubos largos	8
5. Pantalla de ingreso de datos al simulador	53
6. Resultados de la simulación	54
7. Datos termodinámicos para el primer efecto	54

TABLAS

I. Modelos matemáticos para la capacidad calorífica en $J/K \cdot Kg$ como función de la concentración de sólidos en grados brix	40
II. Modelos matemáticos para la elevación del punto de ebullición en $^{\circ}C$ como función de la concentración de sólidos en grados brix.	41
III. Correlación de la temperatura ($^{\circ}C$) contra la presión de vapor (Pa), para condición de saturación.	42
IV. Correlación de la presión de vapor (Pa) contra la temperatura ($^{\circ}C$) para condición de saturación.	43
V. Entalpía de agua (KJ/Kg) como líquido en función de la temperatura ($^{\circ}C$)	43
VI. Entalpía de agua (KJ/Kg) como vapor en función de la temperatura ($^{\circ}C$)	44
VII. Análisis de errores porcentuales para los modelos de ajuste para las tablas termodinámicas de vapor.	48
VIII. Análisis de las razones "Datos simulado / Dato tabulado"	49
IX. Resultados del problema	55
X. Tablas de vapor saturado	69

XI. Datos para la correlación de las soluciones de NaOH	71
XII. Datos para la correlación de las soluciones de NaCl	71
XIII. Datos para la correlación de las soluciones de Leche	72
XIV. Datos para la correlación de las soluciones de Azúcar	72

LISTADO DE SÍMBOLOS

°C	Grado Centígrado, unidad en el sistema internacional de cambio de temperatura.
Atm	Unidad arbitraria para medir la presión, equivale a 101,325Pa.
Cal	Caloría, cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de un gramo de agua un grado centígrado.
Cp	Capacidad calorífica.
J	Joule, unidad del sistema internacional para medir la energía.
K	Grado Kelvin, unidad del sistema internacional para medir la temperatura absoluta de un cuerpo.
Kg	Kilogramo, unidad del sistema internacional para medir la masa.
N	Newton, es la medida de fuerza del sistema internacional de medidas, equivale a la fuerza ejercida por la acción de la gravedad por un kilogramo de masa.
Nu	Número adimensional de Nusselt.

Pa	Pascales, unidad de medida de la presión en el sistema internacional de medidas, equivale a un newton aplicado sobre un metro cuadrado. (N/m ²).
Pr	Número adimensional de Prandaldt.
Q	Calor
U	Coefficiente global de transferencia de calor.

RESUMEN

La operación unitaria de evaporación, es una operación que consiste en la eliminación de un porcentaje del agua de una solución líquida para llevar la concentración de sólidos de un porcentaje a uno más alto. En la industria guatemalteca, es un proceso utilizado en ingenios azucareros y procesos de evaporación de leche, para producir leche en polvo, entre otros.

En este trabajo, se hace una descripción monográfica del proceso de evaporación y los equipos para el mismo. Seguidamente, se hace la descripción de los procesos termodinámicos que intervienen en el proceso, para esclarecer el marco conceptual, sobre el cual se establecen las bases del proceso de simulación de la operación.

Asimismo, en este trabajo, se realizaron correlaciones para las tablas termodinámicas de vapor saturado, esto con el fin, de tener una función para determinar las condiciones termodinámicas del proceso, dada una sola propiedad.

Para la determinación de aumentos de temperatura de vapor y energías de sobre calentamiento, se realizaron correlaciones para las elevaciones de puntos de ebullición y las capacidades caloríficas para soluciones de agua con azúcar, leche, sal, ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.

Una vez establecidas las condiciones del proceso, se procedió a realizar un algoritmo general, para resolver el sistema de evaporación para múltiples efectos, en general se hizo para n efectos, siendo n cualquier

número entero positivo mayor que uno. Es decir, el algoritmo, desarrollado permite resolver un sistema de evaporación de múltiple efecto para cualquier número de efectos en el sistema de evaporación.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un simulador por computadora de los procesos de evaporación más comunes en la industria química.

Específicos

1. Establecer modelos matemáticos para el comportamiento de las variables de proceso, para los procesos más comunes en la industria química.
2. Simular los procesos de evaporación para la industria azucarera.
3. Ofrecer el simulador como herramienta didáctica a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

JUSTIFICACIÓN

En el proceso químico industrial de mayor importancia en el país, es decir, en la producción de azúcar, a partir del jugo de caña, se utiliza el proceso de evaporación con líneas de evaporación de efecto múltiple, generalmente, se utilizan cinco efectos, utilizando el primero como precalentador.

Ante la necesidad de obtener los flujos de vapor teóricamente necesarios para alcanzar la concentración deseada, es necesario, realizar un proceso de cálculo extenso e iterativo, de modo que resulta conveniente la utilización de un computador para asistir los cálculos. No obstante, los paquetes de software disponibles en el mercado, dependen del tipo de industria para el cual se desee la aplicación, por lo tanto, poseen correlaciones específicas para el proceso que se realizará.

De esta cuenta, se notó la necesidad de un simulador, con las capacidades de calcular todas las condiciones del proceso, para distintos tipos de industria. Asimismo, el simulador tendrá la capacidad de aceptar correlaciones específicas y creará librerías históricas para dichas correlaciones, de modo que, brinde mayor versatilidad al usuario.

A pesar del avance tecnológico que se ha vivido durante los últimos años, en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, aún no se utiliza ésta como una herramienta, para el apoyo didáctico de los estudiantes, de modo que se halla la necesidad de realizar un proyecto, como iniciador de un conjunto de proyectos que integren las ventajas de la tecnología moderna en la ingeniería química.

Asimismo, en el entorno nacional, no existe un amplio uso, de *software* de cálculo y simulación de procesos industriales, ya que, el *software* que se utiliza es, únicamente, para la automatización y control computarizado de procesos, pero no existen paquetes de *software* para el diseño y cálculo de equipos, por lo que se halla como una necesidad, la creación de este tipo de programas.

Finalmente, como herramienta didáctica, se requiere un software que permita, ahorrar tiempo en cálculos engorrosos para evaporadores y que permita la utilización de estos tiempos, para analizar la variación de las variables del proceso, a medida que cambia una variable en la alimentación o en el producto final deseado, así como el cambio de las variables de proceso, a medida que cambia el número de efectos en los conjuntos de evaporadores.

En la creación del *software*, se analiza la necesidad, de la creación de una patente acerca del mismo, debido a las facilidades que permiten las leyes actuales del Registro de la Propiedad Intelectual, para evitar el plagio del mismo programa y que sea utilizado, únicamente, con los fines adecuados.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de evaporación son utilizados en industrias, en las cuales se desea concentrar un fluido determinado a una concentración mayor a la original. Estos procesos resultan complicados de calcular, sobre todo, cuando se introduce un sistema de evaporadores de efecto múltiple, es decir, varios evaporadores conectados en serie. Por lo tanto, se propone el diseño de un simulador de procesos de evaporación con las correlaciones, para algunas de las industrias de procesos químicos industriales más comunes en el medio nacional. Este simulador se hará para líneas de evaporadores de tres, cuatro, cinco y seis efectos, debido a que son los arreglos utilizados con mayor frecuencia en la industria.

Para el diseño de dicho simulador, se utilizará Visual Basic, como lenguaje de programación. Con este ambiente gráfico, se creará una interfase amigable para el usuario, para que un operador, con los mínimos de conocimiento del proceso que se desee simular y con los conocimientos de computación adecuados, pueda utilizarlo sin dificultad alguna.

Entre los fluidos que se correlacionarán, se encuentra el jarabe de azúcar, utilizado en ingenios azucareros en todo el país, licor de hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, sal de mesa y leche de vaca, por ser estos los más comunes en la industria nacional.

El simulador que se diseñará, tendrá las capacidades de cálculo de un sistema múltiple efecto, en el cual, se calcularán todas las variables del proceso, por cada evaporador y por el proceso como un todo. Además, el simulador tendrá la capacidad de imprimir reportes detallados acerca del proceso, guardar los cálculos realizados en una hoja de Microsoft Excel,

para su fácil manejo en esta hoja de cálculo. Otra característica que se agregará a dicho simulador, es la capacidad de activar y desactivar evaporadores, para un mismo proceso, de modo que se pueda encontrar, fácilmente, el costo óptimo de operación, para el número de efectos fijados.

1. MARCO TEÓRICO

Evaporación

Se comprende por evaporación, a la operación unitaria, en la cual se lleva a cabo el aumento de concentración de una solución de un líquido, que se denomina solvente, y uno o varios solutos sólidos disueltos en dicho solvente, los cuales son prácticamente no volátiles a la temperatura de operación, la cual es la temperatura de ebullición del solvente, a la presión de operación.

Esta separación se realiza por medio de la adición de calor a la solución, para llevarla a la temperatura de ebullición, de modo que el solvente se volatilice y los solutos permanezcan en la solución, de modo que aumente la concentración de los mismos.

La forma más usual, en la cual se adiciona calor a un sistema de evaporación, es la condensación de vapor de agua de un lado de alguna superficie de contacto, de modo que el calor de la condensación o latente, que es mucho mayor que el calor requerido para el aumento de temperatura de la solución, o calor sensible, se transfiera por medio de la conducción a través de la pared y la convección en el seno del líquido.

La forma en que se transfiera la energía depende en gran parte en la disposición física del equipo a utilizar, de esta cuenta, existen diversos tipos de evaporadores.

1.1. Tipos de evaporadores

El tipo de evaporador a utilizar en un determinado proceso, depende de la cantidad de energía que sea requerida para la operación, puesto que algunos evaporadores son más eficientes de otros, como se discutirá a continuación.

Además de los requerimientos energéticos, existen otro tipo de condiciones inherentes al fluido que se desea evaporar, los cuales afectan directamente en la selección del evaporador.

Entre los factores para elegir, se encuentra la formación de espumas del fluido a evaporar, la salinidad de los solutos, la corrosividad de la solución, la cristalización, entre otras.

Por ejemplo, la salinización de un fluido, también influye en la selección de el evaporador ideal, pues si el soluto es muy poco soluble, se dará la cristalización en las paredes del evaporador, disminuyendo drásticamente el coeficiente de transferencia de calor, lo cual implica, elevaciones de temperatura, lo cual puede ser fatal para un fluido termolábil.

Otro factor importante a considerar, en estos casos, es la calidad del producto de salida, puesto, que existen fluidos que se ven alterados por la temperatura, es decir, termolábiles, los cuales deben considerarse con mucho cuidado, pues abundan en la industria bioquímica y alimenticia. De esta cuenta, que se debe considerar la presión de operación, puesto que en la mayoría de estos casos debe utilizarse un equipo de vacío. Así mismo, la calidad del producto de salida, influye en la selección de los metales a

utilizar para la construcción de los evaporadores, pues si los metales son fáciles de corroer, estos pueden soltar escamas en el producto, lo cual lo puede arruinar.

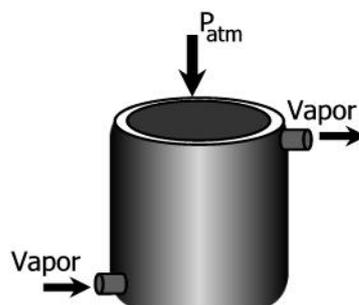
El tiempo de permanencia, es otra variable importante, pues esto deja fuera a varios tipos de evaporadores, pues estos, no ofrecen un tiempo adecuado de contacto, lo cual, dejaría sin posibilidad de evaporar fluidos con tiempos con capacidades caloríficas muy altas.

Entre los evaporadores más comunes se tienen los que se mencionan a continuación.

1.1.1. Evaporadores de marmita abierta

Estos evaporadores son, los más sencillos que existen, aparte de la evaporación en salinas, que corresponde a una cristalización. Estos evaporadores consisten en un recipiente abierto, a presión atmosférica local, con una chaqueta rodeándolo por medio de la cual se hace transferir la energía de vapor que condensa sobre la superficie de la marmita.

Figura 1. Evaporador de marmita abierta.

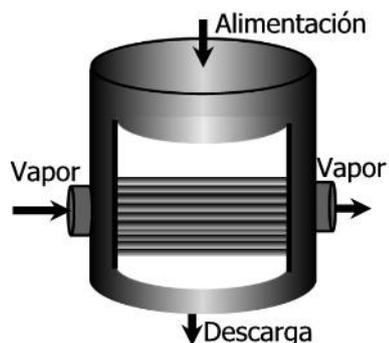


A menudo, para este tipo de evaporadores, se utilizan serpentines sumergidos en el líquido para calentar por contacto casi directo, este tipo de evaporador, puede ser utilizado cuando el proceso requiere agitación, o cuando las cantidades a evaporar no son muy grandes, puesto que al realizarse la evaporación a presión atmosférica, es necesaria mucha más energía para llegar al punto de ebullición de la solución, así como también hay muchas pérdidas de energía por radiación hacia el medio.

1.1.2. Evaporadores de tubos horizontales

Este es el evaporador continuo, más sencillo que hay, funciona de la misma manera que un intercambiador de calor de coraza y tubos. La forma física del evaporador, es un recipiente, que posee tubos horizontales que entran por un extremo y salen por el otro, por un lado entra el vapor y por el otro sale el condensado. En la parte exterior de los tubos e interior al recipiente, está el líquido que se desea evaporar.

Figura 2. Evaporador de tubos horizontales



Este tipo de evaporador, es útil, cuando se están trabajando líquidos poco viscosos y con un alto coeficiente de transferencia de calor, esto por dos motivos, uno es que el flujo dentro de los tubos no es muy bueno, y puede darse lugar a incrustaciones que disminuyen el coeficiente global de

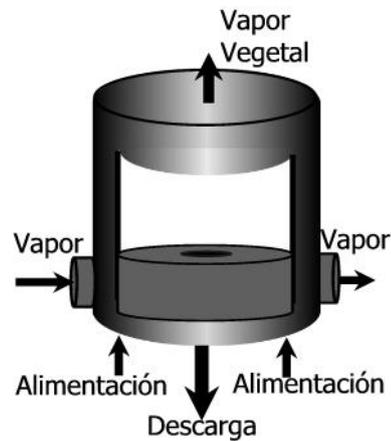
transferencia de calor, así mismo, se requiere que el coeficiente de transferencia del líquido a evaporar sea alto, puesto que el área de transferencia de calor, no es tan alta, como en otros tipos de evaporadores, que se analizarán a continuación.

La mayor ventaja de este tipo de evaporadores, es que son sumamente sencillos de construir y de precio muy bajo, no obstante, el costo de operación, puede subir mucho, en el caso en que se trabaje un gran caudal o con fluidos con bajo coeficiente de transferencia de calor.

1.1.3. Evaporadores vertical con circulación natural

También llamado evaporador de tubos cortos, consiste en una serie de tubos dispuestos verticalmente, en cuyo interior se alimenta el fluido a evaporar y este fluye hacia arriba, con circulación natural, por la ebullición, y por la parte exterior circula el vapor que condensa, para ceder calor. Esto, a diferencia de los evaporadores de tubos horizontales, aumenta considerablemente el área de transferencia de calor, por lo que resultan más económicos de operar, pero debido a las mismas razones que para los evaporadores de tubos verticales, no se pueden operar con líquidos muy viscosos.

Figura 3. Evaporador de tubos cortos



Un tipo particular de estos evaporadores, son los evaporadores de canasta, la diferencia en este tipo, es que el elemento de calentamiento se utiliza suspendido entre el cuerpo del evaporador, lo cual, permite una sección de flujo, a diferencia del anterior, en la cual el flujo era por una sección anular.

La forma en que funcionan estos evaporadores, es con una alimentación en la parte inferior, el cual fluye naturalmente, por la misma succión realizada por la diferencia de presión en cada efecto del evaporador. Así mismo, el calor que se suministra permite que el fluido suba por la misma ebullición, en el centro de todos los tubos que conforman el evaporador, hay un rebosadero, que tiene un diámetro de aproximadamente la mitad de la suma de los diámetros de todos los tubos, por este rebosadero, desciende el líquido concentrado, hacia el siguiente efecto, o un cristizador, dependiendo del tipo de proceso y el número de efecto en el que se encuentre el evaporador.

Uno de los inconvenientes de este tipo de evaporadores es que la eficiencia de transferencia de calor, depende de la altura a la cual se encuentra el líquido, pues si este está por debajo de la mitad de la altura de los tubos, el intercambio de calor es relativamente pobre, lo cual resulta, en energía de vapor desperdiciada.

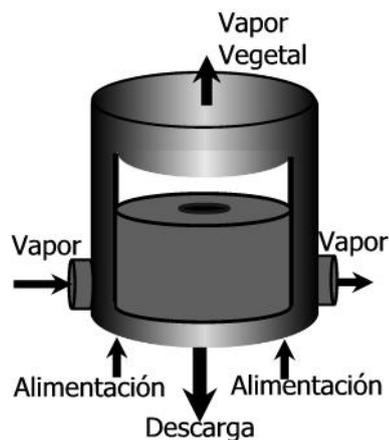
Como en estos evaporadores el flujo es natural, es muy raro que se utilicen como cristalizadores, pues en estos, se debe formar un sólido, y en el caso en que se detenga la evaporación, no habrá energía para que el líquido suba, por lo que se produce un tapón en los tubos, lo cual se traduce en un paro en la producción, lo cual, no resulta funcional, por lo tanto, para evaporadores de cristalización, se utilizan evaporadores con flujo forzado.

1.1.4. Evaporador vertical de tubos largos

Como, en la mayoría de los casos, la cantidad de calor cedida por el vapor de calentamiento es muy alta, comparada con la capacidad calorífica del fluido que se desea evaporar, entonces, para aprovechar mejor la energía proveniente del vapor de calentamiento, es conveniente tener tiempos de contacto cortos, es decir, caudales de fluido altos. Este es el principio de los evaporadores de tubos cortos, con tubos más largos y áreas de transferencia mayores, puede el líquido fluir más rápido a través de los tubos del evaporador, con lo que se consiguen caudales mayores. En general, en los evaporadores de tubos largos, hay flujo natural y un solo paso, no obstante, es posible realizar una recirculación en los casos en que los coeficientes de transferencia de calor sean muy bajos. Este tipo de evaporador es muy común en industrias, como la del azúcar.

El concepto que gobierna este tipo de evaporadores, es sencillo, pues consiste en un intercambiador de coraza y tubos dispuesto de manera vertical, con un rebozadero, generalmente más angosto que para un intercambiador de tubos cortos.

Figura 4. Evaporador de tubos largos



Debido al espacio que ocupan los tubos, se tiene un cuerpo para el vapor, mucho más pequeño que para un intercambiador de tubos cortos. Así mismo, los fluidos alcanzan mayores velocidades en este tipo de evaporador, que en el evaporador de tubos cortos, lo cual aumenta la tasa de transferencia de calor, puesto que el efecto de formación de película en el interior de los tubos es mucho menor, debido al efecto mecánico que ejerce el mismo fluido sobre dicha película. Esto supone un tiempo de permanencia mucho menor, algunos segundos únicamente, lo cual supone la capacidad de manejar caudales mayores, para unidades de menor tamaño.

Las razones expuestas anteriormente, hacen de este tipo de evaporador, el tipo más económico por libra de vapor, esto refiriéndose a los costos de operación, pues debido a sus más altos coeficientes de

transferencia de calor, se requiere menos vapor vivo en la alimentación, para obtener los mismos resultados que en los otros evaporadores.

La recirculación en este tipo de evaporadores, es muy poco utilizada, no obstante, es posible hacerlo, para fluidos con capacidades caloríficas bajas o muy viscosos. Así mismo, la utilización de baffles en el cuerpo, es muy utilizado para evaporadores, utilizados con fluidos que forman muchas espumas, caso típico de la leche. No obstante, por las propiedades de cristalización de la leche, el evaporador más usual es el tipo de evaporadores con aspersion.

En este tipo de evaporadores, es muy difícil predecir la temperatura del fluido dentro de los tubos, puesto que en la zona inferior, debido a que la velocidad en esta zona es menor que en la parte superior, no hay mayor transferencia como calor sensible, sino como calor latente, lo cual hace que la temperatura no varíe mucho. No obstante, en la zona de ebullición, es decir, en la parte superior de los tubos, se tienen coeficientes de transferencias sumamente altos, lo cual hace este equipo tan eficiente.

La forma real en que se da la succión, es que debido a la velocidad del fluido en la parte de ebullición, se da una mezcla del vapor formado y el líquido, lo que obliga al líquido a fluir casi a la misma velocidad del vapor, lo cual genera un efecto de succión, que hace que el fluido se mueva.

1.1.5. Evaporadores de caída de película

Esta es una variante del tipo anterior de evaporadores, el sistema es similar, salvo que la alimentación se aloja en la parte superior y la circulación es natural, fluyendo sobre las paredes del evaporador, formando una película delgada. De esta cuenta, se da que la evaporación se da en el pie del evaporador, siendo este tipo de evaporadores, útiles cuando las sustancias son sensibles al calor, como en las industrias alimenticias. Este tipo de evaporador tiene tiempos de residencia muy bajos, generalmente menores a los diez segundos, esto debido a que su coeficiente de transferencia de calor es muy alto. El vapor producido en el pie del evaporador, fluye a contracorriente por los mismos tubos por donde bajó el fluido, aunque se pudiera pensar que esto produce una alta caída de presión, lo último, no es cierto, debido a que el líquido no moja todo el tubo, sino solo la pared, en forma de película.

El problema básico de este tipo de evaporador, es la alimentación del fluido. Esto, debido a que, la pared de cada tubo, debe permanecer mojada todo el tiempo y no se debe inundar el tubo, pues si no se moja toda la pared, hay una buena cantidad de energía perdida en el evaporador, pero si se inundan los tubos, el vapor no puede subir, de modo que se detiene la evaporación y el fluido saldría igual que como entró.

Este problema se evita utilizando platos en la parte superior de cada tubo, para que, estos distribuyan uniformemente el fluido, una solución muy utilizada, especialmente en la industria lechera, es colocar un aspersor sobre cada tubo, para que la película descienda en forma de goteo, lo cual,

disminuye el tiempo de permanencia, la temperatura de operación y aumenta la transferencia de calor.

Este tipo de evaporador, es utilizado, cuando el fluido, no forma sales, ni forma escamas, pues en estos casos, se formaría sobre la cara de los tubos, depósitos, que disminuirían la transferencia de calor.

1.1.6. Evaporadores de película agitada

Este tipo de evaporadores, se diseñaron para aumentar, por medio de la convección forzada, el coeficiente de transferencia de calor por parte del líquido, puesto que el vapor no representa el factor limitante en este tipo de procesos. Entonces, se diseñó este tipo de evaporadores, que consisten en un evaporador con una marmita que lo rodea y un agitador. De esta forma, se extrae el líquido concentrado por el fondo del evaporador y el vapor sale por la parte superior del cuerpo del mismo.

La diferencia entre este y un evaporador de marmita abierta agitado, es que este evaporador, puede ser conectado a sistemas de vacío de presiones menores a la presión atmosférica local. La aplicación más importante de este tipo de evaporadores, es para materiales muy viscosos, por ejemplo, látex de caucho, gelatina, antibióticos y jugos de frutas.

1.2. Factores que afectan la evaporación

Entre los factores más importantes que afectan el proceso de evaporación, se encuentran, los factores fisicoquímicos del líquido y factores de proceso, según se analizarán a continuación.

1.2.1. Concentración

La concentración, de la solución es un factor fisicoquímico muy importante en el proceso de evaporación, porque es la que determina otros dos elementos fundamentales de la transferencia de calor, como lo son la capacidad calorífica de la solución, la otra, que no es tan obvia, es la elevación del punto de ebullición de la solución, puesto que, según se definió el soluto es no volátil, entonces el punto de ebullición aumenta, con lo cual se requiere una energía adicional, que la necesaria para evaporar agua.

1.2.1.1. Elevación del punto de ebullición

Cuando se disuelve un soluto no volátil, en un solvente, la presión de vapor de el solvente, decrece. Como consecuencia, el punto de ebullición aumenta, pues se requiere más energía para que la solución, alcance una presión de vapor igual a la presión del sistema. Este aumento, puede correlacionarse con una forma lineal, para las soluciones diluidas. No obstante, en los evaporadores, se utilizan soluciones, a concentraciones muy cercanas a la condición de saturación, por lo tanto, se requiere una correlación específica para cada fluido, pues el caso no resulta, cercano al ideal, que se describe como una recta.

El método que se utiliza para la determinación de estos aumentos, puede ser el método de Contrell, el método isoteniscópico, o bien por medio de un condensador a reflujo, el cual va conectado a un manómetro, lo que indica, cuando la solución alcanza la presión atmosférica.

1.2.2. Solubilidad

Todo sólido, posee una solubilidad máxima en agua, para esto, se debe tener en cuenta que existe una región, denominada la región de saturación, para la solución que se está evaporando. Si se pasa de esta zona, se llega a la región de sobresaturación, donde la precipitación o cristalización es casi inevitable, por lo que se debe considerar, en el proceso si es factible alcanzar una determinada concentración, de lo contrario, se tendría la cristalización dentro del evaporador, y dependiendo del tipo, esto, podría interrumpir su operación.

1.2.3. Presión y temperatura

Estas dos características van estrechamente ligadas, puesto que, la presión de operación, determinará el punto de ebullición a trabajar, por ende la temperatura. De esta cuenta, que, de acuerdo con el modelo experimental de Classius y Clapeyron, si se disminuye la presión del sistema, la temperatura de ebullición disminuirá, esto de acuerdo a un modelo exponencial negativo, de la misma forma, si aumenta la presión del sistema, así aumentará la temperatura de ebullición y por ende la energía requerida por el sistema, de esta cuenta, que se debe trabajar, para minimizar costos, con equipos de vacío, que permitan el mayor aprovechamiento del vapor vivo que se alimenta al evaporador.

Además de los requerimientos de costos, en algunos casos, es obligado operar a presiones muy bajas, por la sensibilidad térmica del fluido

a evaporar, debido a que en algunas ocasiones, típicas de las industrias alimenticias y bioquímicas, si la temperatura excede un cierto límite, la molécula activa se invierte o se descompone, por lo tanto, la presión y la temperatura, son quizás las dos variables más importantes en el proceso.

1.2.4. Sensibilidad térmica

Según se expresó anteriormente, es indispensable, tomar en cuenta la sensibilidad térmica del fluido a evaporar, pues esta determinará la temperatura máxima a operar, y de acuerdo con la regla de fases, en este caso tenemos dos grados de libertad, de modo que al fijar la temperatura y la concentración, se ha definido ya la presión de operación, por lo tanto, la sensibilidad térmica, juega un papel indispensable en los procesos de evaporación.

1.2.5. Formación de espumas

En algunos de los casos, que se simularán en este trabajo, como lo son las soluciones caústicas, la leche de vaca y algunas soluciones de ácidos grasos (las cuales no se simularán), se da la formación de espumas durante la ebullición. Esta, por su baja densidad, es arrastrada por el vapor que se está produciendo y se escapa por la parte superior del evaporador, en el caso en que sea el último efecto o que sea un sistema monoefecto, pero en un sistema múltiple efecto, esto puede ser muy perjudicial para el equipo, específicamente, para el siguiente evaporador en la línea, pues al darse la condensación, se dará la deposición de sólidos en la parte del vapor. Además del problema expuesto anteriormente, se tiene el problema, de que se pierde material, que se escapa en forma de espuma.

1.2.6. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica de una masa determinada es la cantidad de energía en Joules (o BTU) que esta requiere para aumentar un grado centígrado (o Fahrenheit) por unidad de masa, es decir por kilogramo o libra, dependiendo del sistema de unidades que se utilice.

La capacidad calorífica del agua, a 25°C es de 4.184J/kg°C, esto quiere decir, que para elevar la temperatura de un kilogramo de agua desde 25 a 26°C, es de 4.184J. De esta forma, se define también las unidades arbitrarias denominadas calorías, las cuales cumplen con la equivalencia de 1cal = 4.184J, esto nace de la obvia razón que con 1cal se eleva la temperatura de 1Kg de agua de 25 a 26°C.

Este concepto, es de suma utilidad, pues permite definir una ecuación diferencial de balance de calor, sumamente sencilla.

$$dQ = mCpdT \qquad \text{Ec. No. 1.1}$$

Aunque esta ecuación es sumamente sencilla, esto establece una interrogante, el diferencial de calor depende del diferencial de temperatura. Puede haber una de las propiedades que no son constantes con respecto de la temperatura, y obviamente la masa puede variar con el tiempo, mas no con la temperatura. Así que, esto sienta la idea de que la capacidad calorífica de una sustancia puede variar con la temperatura.

Efectivamente la capacidad calorífica varía con respecto de la temperatura. Esto, desde el punto de vista molecular, significa que al

aumentar la temperatura, la actividad de las moléculas aumenta, de modo que requieren menos energía para llegar de un punto de menor a un punto de mayor excitación. Por lo tanto, la cantidad de calor necesaria para la misma cantidad de masa para subir un grado centígrado, cuando esta se encuentra a una temperatura baja, no es la misma que cuando esta se encuentra a una temperatura alta.

De aquí, que surge la necesidad de calcular las capacidades caloríficas a distintas temperaturas, de modo que se pueda fijar una función para describir este modelo y de esta forma resolver la ecuación diferencial (Ec. No. 1.1) por medio del método de separación de variables.

Este razonamiento, es un razonamiento válido e ideado para sustancias puras, pero es válido considerar el caso de las soluciones, puesto que este estudio comprende el efecto de la capacidad calorífica en los procesos de evaporación, donde deben incurrir más de una sustancia, necesariamente.

Por lo tanto, así como la capacidad calorífica varía con la temperatura, se tiene que a medida que varía la concentración de una sustancia, varía también su capacidad calorífica. Esto es sencillo de analizar, pues el agua como sustancia pura tiene una capacidad calorífica, la cual es distinta a la capacidad calorífica del soluto como sustancia pura, por lo tanto, es obvio que al variar la concentración, uno de los dos, soluto o solvente influirá más o menos en el valor de la capacidad calorífica.

Entonces, no queda más remedio, que establecer la relación de la capacidad calorífica con la concentración para cada caso particular. Para realizar esta relación, se deben tener datos de la capacidad calorífica a

distintas concentraciones, de modo que se pueda correlacionar una función para predecir este comportamiento.

Para determinar de manera experimental las capacidades caloríficas, la forma más sencilla, es por medio de un calorímetro adiabático, es decir, que el calor cedido al medio no sea significativo con respecto de la cantidad de calor suministrada en su interior. Para tener un mejor control de la cantidad de calor cedida, se puede introducir una resistencia eléctrica que funcione a una corriente constante, de modo que se obtenga durante un tiempo un influjo de calor conocido, cambiándose con una masa conocida y al conocer el aumento de temperatura se puede conocer la capacidad calorífica.

Otra forma no tan sencilla de hacer esta determinación, es por medio de la elevación de temperatura entre dos puntos conocidos y medir el consumo de la resistencia eléctrica para ese intervalo de tiempo, pero este proceso requiere equipo más sofisticado.

Así mismo, existen, en la literatura correlaciones, ya existentes para sustancias puras, a distintas temperaturas, donde se correlacionan por medio de un polinomio de grado cúbico y con un término a la -2 , de esta cuenta, se pueden determinar las capacidades caloríficas de sustancia pura para una temperatura determinada. No obstante, las correlaciones con respecto a la concentración, deben obtenerse de modo experimental.

1.2.7. Presión de vapor

La presión de vapor, es una propiedad de los líquidos, que determina la presión que formará, en un sistema cerrado, el vapor del líquido a una temperatura establecida.

Es de común conocimiento que el agua bulle a 100°C a 1 atm. No obstante, es muy poco conocido el hecho, de que el agua se evapora a partir del punto triple, que se encuentra ligeramente arriba de los 0°C . Pero, esto, es por el errado concepto que lleva a la confusión entre ebullición y evaporación, puesto que la ebullición se da cuando la presión de vapor iguala la presión del sistema, para recipientes abiertos, la atmosférica local.

Entonces, cabe notar, que la presión de vapor es una propiedad de los líquidos y no del vapor como tal. Por lo tanto, la presión de vapor de un líquido es la presión que formará en un recipiente cerrado a una temperatura determinada.

Ahora, para la condición de saturación de un líquido, la presión del vapor saturado, será precisamente la presión de vapor del líquido a dicha temperatura.

De esta cuenta, cuando se trabaja a condición de saturación, que es el caso típico de los sistemas de evaporación, se puede determinar la temperatura de una masa de vapor, si se conoce la presión de el mismo, y viceversa, si se conoce la presión, se conocerá la temperatura. Esto, debido a que se trabaja en condición de saturación. Donde la regla de fases de Gibbs-Duhem, garantiza la existencia de un solo grado de libertad para

sustancias puras y dos para mezcla de dos sustancias. De esta cuenta, solo hay una variable que puede ser fijada, pues en el segundo caso, la concentración queda fija, consumiendo uno de los dos grados de libertad. Por lo tanto, al fijar la temperatura la presión queda determinada y viceversa al fijar la presión, la temperatura queda determinada.

La presión de vapor de un líquido, es una propiedad netamente experimental, por lo tanto, es sujeto de estudio su variación con respecto a la variación de la temperatura.

Entre los trabajos más importantes para la predicción de las presiones de vapor a distintas temperaturas, para temperaturas establecidas, se encuentran las correlaciones de Antoine, que definen una función que correlaciona la presión de vapor con respecto a la temperatura de la siguiente manera:

$$\log_{10} P_{vap} = \mathbf{A} - [\mathbf{B} / (\mathbf{T} + \mathbf{C})] \quad \text{Ec. No. 1.2}$$

Esta ecuación , determina la presión en bares para una temperatura en grados centígrados, y las constantes **A**, **B** y **C**, se conocen como constantes de Antoine, para la sustancia pura para la cual se está trabajando, de importancia, para este trabajo son las constantes para el agua, las cuales definen la siguiente ecuación:

$$\log_{10} P_{vap} (\text{Bar}) = 5.11564 - \frac{1687.537}{T(^{\circ}\text{C}) + 230.17} \quad \text{Ec No. 1.3}$$

Esto es para sustancias puras, no obstante, para mezclas de solventes con sustancias no volátiles (relativamente menos volátiles que el solvente), como es el caso de los sistemas de evaporación, la presión de vapor se ve afectada por la presencia del soluto abatiéndola, de acuerdo con las propiedades coligativas.

No obstante, el caso en que se agrega un soluto más volátil, o por lo menos con una volatilidad no despreciable respecto de la del solvente, la presión de vapor varía de maneras muy distintas. Esto ha sido tema de estudio de Lee-Kesler, Margulles, Van Laar, entre otros. Sin embargo, este caso no es de interés para los sistemas de evaporación, sino los sistemas de destilación.

1.3. Tipos de procesos de evaporación

1.3.1. Evaporación de efecto simple

Este tipo de evaporadores, consiste en un solo evaporador, en el cual se alimenta vapor vivo, proveniente de una caldera de vapor, y se alimenta el líquido frío, que en algunas ocasiones pudo haber pasado por un precalentador, pero, en este caso, se tiene que al adicionar un kilogramo de vapor, se obtendrá aproximadamente un kilogramo de vapor de la solución.

Para mejorar el aprovechamiento de calor, se puede utilizar un sistema de termocompresión, la cual consiste en un dispositivo, que permite reutilizar el vapor vegetal que se extrae del evaporador, al mezclarlo con el vapor vivo proveniente de la caldera, el cual, pierde un poco de su presión, pero gana en flujo másico, obteniendo así mejores rendimientos o alguna economía de vapor, no obstante, la economía de vapor aumenta, si se utiliza un sistema de efecto múltiple, según se expone a continuación.

1.3.2. Evaporación de efecto múltiple con alimentación hacia delante

Este es el tipo más usual de evaporadores de efecto múltiple, consiste en un número de evaporadores, que se colocan en serie, uno tras otro, y en el primer efecto, que puede consistir de uno o más evaporadores, ingresa vapor vivo, el cual es suministrado directamente por una caldera.

En el primer efecto, se produce aproximadamente un kilogramo de vapor por cada kilogramo de vapor proveniente de la caldera. En el siguiente efecto, se inyecta el vapor vegetal proveniente de la evaporación del efecto anterior y así sucesivamente, hasta que el vapor que se produce en el último efecto, es utilizado, ya sea para precalentar los fluidos que ingresarán a los evaporadores, o se dirige a un equipo de vacío, el cual puede ser un condensador o una bomba de vacío.

Por la condensación del vapor de un efecto en el siguiente, se produce un cambio de presión, es decir, la presión disminuye por la diferencia de volúmenes específicos del vapor y del líquido, respectivamente. De esta cuenta, que la presión en el primer efecto es la mayor en todo el sistema. Así mismo, resulta, que la energía del vapor producido en el primer efecto, es suficiente para evaporar un equivalente en peso en el siguiente efecto, puesto que la energía que posee es la energía de vaporización a una presión mayor. Por lo tanto, se deduce, que por cada efecto en una línea de evaporadores, se tendrá un kilogramo por kilogramo de vapor vivo proveniente de la caldera. De modo, que por cada kilogramo de vapor vivo de la caldera, se obtiene aproximadamente n kilogramos de vapor vegetal, donde n es el número de efectos, esto se define como

economía de vapor, no obstante hay que considerar que el costo de instalación es mayor, no obstante el costo de operación es mucho menor.

Un aspecto interesante de este arreglo, es que el flujo es natural, puesto que al condensarse el vapor en el efecto siguiente, produce un cambio de presión, lo que induce la succión del vapor producido en el efecto anterior.

1.3.3. Evaporación de efecto múltiple con alimentación en retroceso

Este arreglo de evaporadores, corresponde a un arreglo similar al recién mencionado, salvo, que en este, la alimentación de vapor vivo, proveniente de la caldera, ingresa en el último efecto, de modo que la presión mayor se encuentra en el último efecto. Por lo que se nota, inmediatamente, que el flujo no puede ser inducido por el cambio de presión, sino debe ser inducido por equipo de bombeo, lo que aumenta el costo y lo que lo hace menos utilizado en la industria. No obstante, encuentra su campo de aplicación, en procesos en los cuales los fluidos son demasiado viscosos, para que el poder de calentamiento mayor se encuentre en el último efecto, donde la concentración y por ende la viscosidad, es mayor, de modo que la temperatura sea mayor en el último efecto y la viscosidad sea la menor posible, para la concentración de operación.

1.3.4. Evaporación de efecto múltiple con alimentación en paralelo

Este arreglo, consiste en una serie de evaporadores, de los cuales se extrae el líquido concentrado como producto y se inyecta el vapor producido en el siguiente efecto. Este sistema es muy bueno, cuando se desea concentrar a diferentes concentraciones un mismo líquido, puesto que en el

primer evaporador se alcanza la concentración máxima, así como en el último se alcanza la mínima.

Este tipo es generalmente utilizado en procesos en los cuales la alimentación está casi saturada y se desea un cambio de concentración pequeño o se desea producir la formación de cristales, como en es el caso típico de la evaporación de salmueras para la producción de sal.

Simulación y modelación de procesos

1.4. Simulación

Por simulación, se comprenderá toda acción, que lleve a la comprensión y al análisis de un suceso, sin que este tenga que suceder en la realidad. Para fines prácticos, se usará el término simulación por computadora, al *software*, que permita obtener los resultados, de carácter teórico, que se darían en un determinado proceso, sin necesidad de correr una práctica de laboratorio o similar.

El proceso de evaporación, es un proceso que depende de muchas variables, y de acuerdo con la bibliografía, no existe, aún, un software que simule dicho proceso. No obstante, en los proyectos de automatización y control de varias industrias químicas, ya se tienen estos procesos automatizados. Aún así, es necesario, para poder proyectar a futuro, tener un software que permita realizar un estimado de los cambios que sufriría el proceso, si en determinado momento se cambian algunas de las condiciones de proceso.

La idea de simular un proceso, es para permitir, realizar estimados de rentabilidad, o factibilidad de un determinado cambio al proceso químico industrial que se realice.

La simulación se puede lleva a cabo mediante diversos lenguajes de programación, entre estos se encuentra el utilizado para este proyecto, es decir, Visual Basic.

1.5. Modelación

1.5.1. Variables del proceso

Ya se han mencionado estas en el apartado 1.2, no obstante, ahora se dará el enfoque, en el cual serán útiles en la modelación.

1.2.1.2. Presión y puntos de ebullición

La modelación, que se requiere, para la simulación de un proceso de evaporación, necesita ciertos modelos básicos, entre estos está el comportamiento de los puntos de ebullición con respecto a la presión de operación y viceversa. Debido a que las presiones, generalmente son fáciles de conocer, tanto en la alimentación de vapor, como en el condensador o el equipo de vacío en el último efecto de un sistema múltiple efecto, entonces, se requiere un modelo que ajuste la temperatura de saturación del agua, con la presión.

Además de la relación de temperatura y presión, se debe considerar, que existe entre la temperatura del punto de ebullición y la concentración. Puesto que, por las propiedades coligativas de los líquidos, el punto de

ebullición se eleva, conforme se eleva la concentración de solutos no volátiles, por lo tanto, esta elevación del punto de ebullición, es otra de las condiciones que se ven sujetas a la modelación, aún cuando este modelo es demasiado sencillo, pues se ajusta a un modelo lineal, para soluciones diluidas, con respecto a la concentración y cuya pendiente es la constante ebulloscópica del agua.

1.2.1.3. Capacidades caloríficas

Aún cuando las soluciones son diluidas, su capacidad calorífica se ve afectada por la concentración de un soluto, debido a que la distribución de calor, no es igual, que en el líquido puro. Por lo tanto, también se requiere un polinomio de ajuste para la capacidad calorífica, para cada uno de los fluidos que se utilizarán.

1.2.1.4. Coeficientes totales de transferencia de calor

Esta es una variable que determina las temperaturas teóricas que se tendrán en cada uno de los fluidos, no obstante, este cálculo resulta en extremo complicado, por lo que es mejor, una modelación al respecto, en este caso particular, se introduce una considerable fuente de error, pero reducirla es casi tan complicado como calcular todo el sistema una vez más.

El coeficiente global de transferencia de calor de un equipo representa, la cantidad de calor que este equipo puede cambiar por área de transferencia de calor y por cada grado de gradiente térmico. Es decir, si un coeficiente de transferencia de calor es muy grande, esto significa que la eficiencia del equipo es grande, pues por un área relativamente pequeña de transferencia de calor, este equipo, será capaz de intercambiar grandes cantidades de calor.

Para comprender mejor el concepto del coeficiente de transferencia de calor, vale la pena hacer un análisis dimensional. En el sistema internacional de medidas, las unidades del mismo son $J/m^2\text{°C}$.

Esto corresponde perfectamente a la ecuación:

$$Q = UA\Delta T \qquad \text{Ec No. 1.4}$$

Esta ecuación, significa que si permanece constante el área de transferencia y el diferencial térmico, para dos equipos con diferente coeficiente de transferencia de calor, el más eficiente será el que tenga mayor coeficiente.

Para el cálculo de este coeficiente, se tiene que apelar a modelos experimentales, que dependen de las propiedades termodinámicas de los fluidos que están cambiando calor, y de los regímenes de flujo en los dos lados de las paredes de contacto. Entre estos modelos se encuentran los modelos que involucran los números adimensionales de Nusselt y Prandaldt.

Esto, debido a que la velocidad y turbulencia de los fluidos disminuye el efecto de película estática, que es un impedimento para el cambio de calor, pero disminuye el tiempo de contacto entre el fluido y la pared de contacto y cambio de calor. Así mismo, la turbulencia del fluido mejora la convección de calor, pues induce una convección forzada. Por otra parte, la conductividad térmica del fluido afecta en la velocidad de transferencia de calor, pues a medida que la conductividad térmica aumenta, así aumenta la velocidad de transferencia de calor.

Por otra parte, al capacidad calorífica influye en el cambio de calor, pues para fluidos con alta capacidad calorífica (p.e. agua), se requiere mayor cantidad de calor, aún cuando la conductividad térmica sea grande.

No obstante, para el cálculo de evaporadores, generalmente se utilizan coeficientes recomendados por la bibliografía, o coeficientes típicos de los equipos a utilizar.

Sin embargo, para fines del simulador, se aplica un modelo sencillo que correlaciona para unidades del sistema inglés el coeficiente de transferencia según sigue:

$$U = \frac{(130 - T)(B)(\lambda)}{20,000} \quad \text{Ec No. 1.5}$$

1.5.2. Regresión de mínimos cuadrados

Existen diversas técnicas para ajustar una serie de datos, a un modelo matemático, que describa el comportamiento de estos, uno de los tantos métodos, y quizás uno de los más conocidos en todos los campos de la ingeniería, es el método de mínimos cuadrados para la regresión de una serie de datos.

Este método se basa en el la técnica de los multiplicadores de Lagrange, para minimizar los errores cuadráticos de una serie de datos, con respecto a los valores de las constantes de un determinado modelo. El más común es la regresión de mínimos cuadrados para rectas. Donde, se propone un modelo lineal con una pendiente a y un intercepto b , luego se determina la forma de los errores cuadráticos, y se deriva parcialmente este error con respecto de a y de b , para hallar un mínimo en este error, de aquí

se desprende el método, que en la actualidad, existe una serie de paquetes de software que son capaces de realizar esta regresión de mínimos cuadrados sin mayor dificultad.

1.5.3. Validación de modelos

La validación de modelos, es una técnica utilizada para comparar los datos obtenidos de un determinado modelo con los datos experimentalmente obtenidos, para determinar el error del mismo.

En la validación de modelos, es conveniente fijar un máximo de tolerancia, que será expresado, preferentemente como un porcentaje de error máximo permitido. Si para un modelo, la desviación es menor que dicha tolerancia, se dirá que el modelo es validado, en el caso contrario, no será validado y deberá proponerse otro modelo que ajuste con mayor exactitud los datos experimentales.

Otra forma de validar un modelo, es mediante una prueba de bondad de ajuste, que se hace de acuerdo con la distribución Ji cuadrada.

1.2.1.5. Prueba de bondad de ajuste

Estas estimaciones, se realizan para comparar los valores que podrá tomar la varianza en una población en función de una varianza calculada para una muestra en particular. El ajuste de este parámetro se realiza por medio de la distribución de χ^2 (chi-cuadrada). Esta distribución es asimétrica, y es la distribución gama con valores fijos de alfa y beta. Para calcular los intervalos de confianza se determina alfa medios y uno menos alfa medios,

de donde se obtienen los valores en la gráfica de chi cuadrada, con n-1 grados de libertad, siendo n el número de datos en la muestra. Con estos dos valores críticos para chi cuadrada, se calcula el intervalo de la siguiente manera.

$$\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{\alpha/2}} < \sigma^2 < \frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}}$$

De donde se calcula la variación estimada de la varianza para la población en general.

Conceptos de programación e informática

1.6. Algoritmos

Un algoritmo es una sucesión de pasos ordenados, para la resolución de un problema. Aunque esta es la definición más sencilla de un algoritmo, se tiene que hacer mucho más específica cuando se trabaja en lenguajes de programación, debido a que existen los algoritmos de tipo secuencial y los de tipo estructurado.

Los algoritmos secuenciales, eran utilizados en la programación de tipo espagueti. Estos consisten en pasos numerados que pueden ser llamados desde cualquier punto del algoritmo, formando secuencias enredosas y difíciles de comprender.

Los algoritmos de tipo estructurado, que son los más comunes en la programación actual. Aunque se dice que la programación actual es orientada a objetos, no se pierde la estructura de los algoritmos.

1.6.1. Partes de un algoritmo

Un algoritmo se compone de varias partes, pero en general, posee un encabezado, una sección de declaración de variables y el cuerpo del algoritmo en general.

1.6.2. Encabezado de un algoritmo

El encabezado del algoritmo, consiste de la palabra algoritmo y un identificador para el algoritmo en particular. En general, el nombre debe tener ciertas restricciones, las cuales son:

- No puede contener palabras reservadas,
- No puede contener caracteres especiales, solo letras y números,
- No puede sobrepasar los 256 caracteres.

1.6.3. Declaración de variables

En esta parte del algoritmo se declara el nombre y tipos de variables que se utilizarán en el algoritmo, de momento nos reservaremos a los tipos más generales, aunque al final de este texto, analizaremos el tipo registro. Los tipos de variables más usuales son:

- Carácter: Este tipo maneja todos los caracteres en forma de palabra, aunque la variable se llene con un valor numérico no es posible operarlo.

- Entero: Maneja números enteros y dependiendo del lenguaje de programación tiene una cota superior y otra inferior para el valor que puede tomar.
- Real: Como su nombre lo indica, maneja números reales.
- Lógico: A veces se le suele llamar memo, toma valores de 0 y 1 o bien True y False.

1.7. Cuerpo del algoritmo

Es la secuencia de pasos que permite llegar al objetivo del algoritmo, para esta sección debemos extendernos en las diversas estructuras de los algoritmos.

1.7.1. Estructuras de bucle

En los algoritmos es muy usual la necesidad de repetir en reiteradas ocasiones la misma operación, o por lo menos la misma estructura. Por lo que es necesario establecer estructuras para repetición o bucles.

1.7.1.1. Estructura para

Esta es utilizada cuando se tiene un contador definido, ya sea por el usuario o el programador, pero el número de bucles es conocido y su estructura o sintaxis es:

Para i=1 hasta n hacer
 :
operaciones requeridas
 :
Fin Para

Entonces, se puede asignar n por medio de un valor numérico definido, o bien un valor asignado por el usuario. En el caso que el usuario lo ingrese será requerido realizar una cierta validación antes del ciclo, para esto se usarán estructuras de decisión, las cuales se analizarán más adelante.

1.7.1.2. Estructura repetir

Esta estructura mantiene un ciclo hasta que una cierta condición es cumplida, por lo que en este tipo de estructura, hay que tener cuidado de no crear un bucle infinito, es decir, que la condición nunca pueda ser satisfecha, para esto, se puede establecer una forma alternativa de salida del bucle, o bien una salida de bucle, la cual se analizará más adelante.

La sintaxis de esta estructura es la siguiente:

Repetir
:
operaciones requeridas
:
hasta que [condición]

Este tipo de estructura, tiene una diferencia básica con la anterior, puesto que esta no tiene un número definido de bucles, sino que depende del usuario.

1.7.1.3. Estructura mientras

Esta estructura, es muy similar a la anterior, en el sentido de que el número de bucles depende de una determinada condición, pero es distinta, en el sentido de que, si la condición de paro se cumple a la primera vez, el ciclo no se realiza, a diferencia que en la estructura repetir, que lo hace una

vez aunque la condición se cumpla a la primera, puesto que la comprobación se encuentra al final.

Sintaxis:

Mientras [Condición]
:
operaciones requeridas
:
Siguiente

Estas serían las estructuras de bucle, que utilizaremos en este tutorial, ahora es necesario establecer las estructuras de decisión.

1.7.2. Estructuras condicionales

Estas estructuras, son Si, y, o, y no, o no. En general, se utilizan todos los operadores lógico y matemáticos de comparación. Es sencillo, analizar este tipo de estructuras, como condiciones basadas en la lógica básica. Comencemos por la sintaxis básica.

Sintaxis:

Si [condición] entonces
:
operaciones requeridas
:
De lo contrario
:
operaciones requeridas
:
Fin Si

Pero también es posible, hacer árboles de decisión y hacer condiciones múltiples, así como condiciones anidadas.

1.8. Lenguajes de programación

Los lenguajes de programación son lenguajes especiales que ayudan al usuario a comunicarse con la computadora. Establecen una comunicación entre el humano que prefiere usar palabras, el sistema decimal y la computadora, que trabaja solo con números binarios.

1.8.1. Lenguaje de máquina

El lenguaje de máquina está orientado hacia la máquina que está constituida por varios arreglos de "bits". Es el lenguaje original de la computadora el cual es generado por el "software", y no por el programador.

1.8.2. Lenguaje de bajo nivel

Es un lenguaje de programación bien cercano al lenguaje de máquina. Es difícil de entender por las personas y requiere que los programadores codifiquen las instrucciones con muchos detalles.

1.8.3. Lenguaje de alto nivel

Es un lenguaje que se asemeja más al lenguaje humano que a un lenguaje de máquina o ensamblador. Es más fácil escribir programas en este lenguaje, pero luego deben ser traducidos por compiladores o intérpretes para que la computadora los entienda.

1.8.4. Visual Basic

Visual Basic es un lenguaje de Programación Visual, que si bien no cumple con todos los requisitos de un lenguaje propiamente dicho: Encapsulado, Herencia y Polimorfismo. Hace la programación más sencilla ya que la mayoría de sus funciones y procedimientos están automatizados. Y sus controles traen una cierta cantidad de propiedades, fáciles de modificar. Además su entorno de desarrollo totalmente visual, facilita la creación de aplicaciones, sumado a esto la compatibilidad que tiene con Windows.

1.9. Compilación de programas

Compilación, se refiere al proceso de generación de código que sigue al preprocesado; proceso en el que el compilador recorre la estructura de tokens generada por el analizador sintáctico traduciéndolos en código de la máquina para la que se compila.

El trabajo del "compilador" se efectúa sobre un fichero denominado unidad de compilación ("*Translation unit*") o módulo. Se refiere a un fichero de código fuente al que se añaden los ficheros `#include` y al que se suprimen las líneas correspondientes a las directivas de preprocesado; es decir, lo que resulta de pasar el fuente por el preprocesador.

1.9.1. Archivos ejecutables

Los archivos ejecutables, son los resultantes de un proceso de compilación y traducción del algoritmo. Esto, da como resultado archivos encriptados, que no pueden ser modificados, pero se pueden ejecutar desde la plataforma o sistema operativo para el cual fue creado. Este tipo de

archivos, forman la parte central de un programa de ordenador. En general, poseen extensión .EXE que denota *executable* en inglés. Estos archivos, tienen la ventaja que no requieren un programa adicional para cargarse, más que el sistema operativo.

Ley de derechos de autor

La ley de derechos de autor, en la República de Guatemala, a la fecha, está regida por el Decreto 33-98, con las modificaciones establecidas en los Acuerdos Gubernativos 56-2000 y 233-2003. Donde se establece, en el Artículo primero, que el registro de las obras procede de acuerdo al reglamento del Registro de la Propiedad Intelectual.

1.10. Artículo 12. Condiciones de protección

Las obras protegidas por la Ley son aquellas creaciones originales, susceptibles de ser divulgadas o reproducidas por cualquier medio.

La protección que otorga la Ley se concede a las obras desde el momento de su creación, independientemente del mérito, destino o modo de expresión, pero para que proceda su inscripción y depósito se requiere que hayan sido fijadas en un soporte material.

1.11. Capítulo iv, sección segunda. Programas de ordenador y bases de datos

1.11.1. Artículo 30

Los programas de ordenador se protegen en los mismos términos que las obras literarias. Dicha protección se extiende tanto a los programas

operativos como a los programas aplicativos, ya sea en forma de código fuente o código objeto y cualquiera que sea su forma o modo de expresión. La documentación técnica y los manuales de uso de un programa gozan de la misma protección prevista para los programas de ordenador.

1.11.2. Artículo 32

La reproducción de un programa de ordenador, incluso, para uso personal, exigirá la autorización del titular de los derechos, con excepción de la copia que se haga con el fin exclusivo de sustituir la copia legítimamente adquirida, cuando ésta ya no pueda utilizarse por daño o pérdida. Sin embargo, ambas copias no podrán utilizarse simultáneamente.

1.11.3. Artículo 33

Es lícita la introducción de un programa en la memoria interna del ordenador que sirva únicamente para efectos de la utilización del programa por parte del usuario. No es lícito el aprovechamiento del programa por varias personas, mediante la instalación de redes, estaciones de trabajo u otro procedimiento análogo, sin el consentimiento del titular de los derechos.

2. METODOLOGÍA

Las herramientas tecnológicas utilizadas en este trabajo de investigación, representan los recursos materiales fundamentales de la misma. Se utilizó un ordenador personal, equipado con el lenguaje de programación Visual Basic, mediante el cual se realizó la programación del simulador, el cual se compiló en un archivo ejecutable y se grabó en discos para su instalación.

Además, se utilizó equipo de laboratorio, que consiste en balones de destilación, condensadores, planchas de calentamiento, soportes, entre otros. Estos equipos se utilizaron para la determinación de las elevaciones del punto de ebullición.

En el recurso humano utilizado, se realizaron pruebas con distintos usuarios para buscar las posibles mejoras en el programa, estos fueron estudiantes de ingeniería química de la Universidad de San Carlos.

Para la realización del proyecto, se realizó una definición conceptual y teórica del proceso, esto conlleva la fijación del problema y las variables que se dejaron al usuario para su fijación y cuáles se fijan por el programa. En este encuadre, se buscó la realización del programa, para que se ajuste a las necesidades de cálculo más usuales, pues no es posible tener toda la variabilidad en el mismo.

Luego de la definición del proceso, se procedió a buscar algoritmos de cálculo, disponibles en la bibliografía. Estos algoritmos fueron de carácter

general, que permitieron el cálculo de las variables fijadas en el proceso de definición conceptual del problema.

Con las variables fijadas, y con el algoritmo seleccionado, se debieron realizar las correlaciones y la modelación del proceso. En esta parte se hicieron las pruebas de laboratorio, para la determinación de las variables necesarias y su relación entre sí. Luego, se realizó el proceso de modelación matemática de los procesos. No obstante, para algunas variables se utilizaron los datos tabulados en la bibliografía, y estos solamente fueron correlacionados.

Una vez hallado el algoritmo de cálculo generalizado, se hizo la traducción del mismo a pseudocódigo, y posteriormente a una plataforma de programación, que permitió el trabajo a nivel gráfico, de modo que el programa funcione de manera sencilla para los usuarios. Esto realizando las respectivas subrutinas, para fragmentar el programa en pequeños programas, que puedan ser validados y probados con facilidad.

Con el programa general ya realizado, se probaron y validaron los resultados obtenidos por cada una de las subrutinas, para evitar problemas en el algoritmo general y para verificar que los resultados son los correctos de acuerdo con los problemas referidos en la bibliografía.

Con el software, ya funcionando y validado, se realizaron las pruebas con los estudiantes de Ingeniería Química, para darle mayor funcionalidad al programa, así mismo se buscó que este fuera lo más amigable posible con el usuario, de modo que, no se requiera mayor preparación en informática para utilizar el programa, de esta misma cuenta, se realizó un programa de ayuda, para el mismo, de modo, que el usuario, pueda tener acceso a una

fuente de consulta, en el momento en que no sepa cómo continuar, el uso del programa.

3. RESULTADOS

3.1. MODELOS MATEMÁTICOS

Con valores experimentales de las capacidades caloríficas tabuladas en la bibliografía, se aplicó el método de mínimos cuadrados, para obtener el mejor ajuste de los datos, obteniendo las siguientes relaciones.

Tabla I. Modelos matemáticos para la capacidad calorífica en J/K·Kg como función de la concentración de sólidos en grados brix.

Fluido	Capacidad calorífica (J/K·Kg)	Coefficiente de correlación
Salmuera de NaCl	$4.182 - 2.63x$	1.00
Ácido sulfúrico	$4.182 - 2.779x$	1.00
Leche	$-24.457x^2 + 0.4011x + 4.182$	1.00
Jarabe de azúcar	$4.182 - 2.35x$	1.00
Hidróxido de sodio	$4.182 - 2.97x$	1.00

Con valores experimentales de las elevaciones del punto de ebullición obtenidas en el laboratorio, por medio del método de Dhüring, se aplicó el método de mínimos cuadrados, para obtener el mejor ajuste de los datos, obteniendo las siguientes relaciones

Tabla II. Modelos matemáticos para la elevación del punto de ebullición en °C como función de la concentración de sólidos en grados brix.

Fluido	Elevación del punto (°C)	Coefficiente de correlación
Salmuera de NaCl	$32.857x^2 + 7.2143x + 0.0786$	0.9919
Ácido sulfúrico	$-423.42x^2 + 629.49x + 22.941$	0.9470
Leche	$3.5714x^2 + 1.9643x + 0.0393$	0.9646
Jarabe de azúcar	$6.4286x^2 + 1.65x - 0.0036$	0.9974
Hidróxido de sodio	$183.93x^2 - 8.5357x + 1.6071$	0.9861

Con valores experimentales de las tablas termodinámicas del vapor de agua, se aplicó el método de mínimos cuadrados para obtener una relación logarítmica para ajustar la temperatura con la presión de saturación, no obstante, esta ecuación no ajustó de modo satisfactorio, pues la desviación aumentaba así como aumentaba la temperatura. Por lo tanto se calculó el error total, y este se correlacionó con un polinomio del grado que arrojara el mejor ajuste, de esa cuenta se obtuvieron las funciones.

Tabla III. Correlación de la temperatura (°C) contra la presión de vapor (Pa), para condición de saturación.

Intervalo de presión (Pa)	Temperatura de saturación (°C)
0 – 4,250	$15.458 \ln P - 99.662 + 6 \cdot 10^{-14} P^4 - 7 \cdot 10^{-10} P^3 + 3 \cdot 10^{-6} P^2 - 0.0053 P + 2.7633$
4,250 – 28,000	$25.349 \ln P - 189.07 + 1 \cdot 10^{-17} P^4 - 2 \cdot 10^{-12} P^3 + 9 \cdot 10^{-8} P^2 - 0.0019 P + 2.7633$
28,000 - 361,300	$25.349 \ln P - 189.07 + 3 \cdot 10^{-5} P - 5.9655$
Más de 361,300	$41.877 \ln P - 398.06$

Con valores experimentales de las tablas termodinámicas del vapor de agua, se aplicó el método de mínimos cuadrados para obtener una relación exponencial para ajustar la presión con la temperatura de saturación, no obstante, esta ecuación no ajustó de modo satisfactorio, pues la desviación aumentaba así como aumentaba la temperatura. Por lo tanto se calculó el error total, y este se correlacionó con un polinomio del grado que arrojará el mejor ajuste, de esa cuenta se obtuvieron las funciones.

Tabla IV. Correlación de la presión de vapor (Pa) contra la temperatura (°C) para condición de saturación.

Intervalo temperatura (°C)	Presión (Pa)
0 – 45	$802.33e^{0.0518T} - 0.0002T^4 + 0.019T^3 + 0.1424T^2 + 4.4796T - 195.42$
45 - 75	$802.33e^{0.0518T} - 7.1208T^2 + 807.12T - 20765$
75 - 174	$4348.1e^{0.0311T} + 0.0077T^4 - 3.1986T^3 + 485.79T^2 - 32658T + 828506$
Más de 174	$42263e^{0.0179T}$

Debido a que la entalpía de líquido, está referida a una temperatura de 0°C, entonces, se hace una recta de ajuste que tiene por pendiente un valor muy cercano a la capacidad calorífica del agua.

Tabla V. Entalpía de agua (KJ/Kg) como líquido en función de la temperatura (°C)

Intervalo temperatura (°C)	Entalpía de líquido (KJ/Kg)
0 – 100	$4.3516 T - 10.48$

Con valores experimentales de las tablas termodinámicas del vapor de agua, se aplicó el método de mínimos cuadrados para obtener una relación, que compare la entalpía del vapor con la temperatura de saturación.

Tabla VI. Entalpía de agua (KJ/Kg) como vapor en función de la temperatura (°C)

Intervalo temperatura (°C)	Entalpía de vapor (KJ/Kg)
0 – 131	$1.6954T + 2505$
Más de 131	$-7 \cdot 10^{-8}T^4 + 3 \cdot 10^{-5}T^3 - 0.0091T^2 + 2.849T + 2457.8$

Algoritmo en pseudocódigo y desarrollo conceptual del simulador

- Con la presión en el condensador, se obtiene la temperatura de saturación del vapor en el mismo. Esto por medio de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice I), las cuales se encuentran correlacionadas en el simulador. De acuerdo a la Tabla III.
- Con la presión de alimentación del vapor de calentamiento proveniente de la caldera o las líneas de vapor, se calcula a través de las correlaciones de la Tabla III, o por tablas de vapor, la temperatura de saturación en los tubos de calentamiento del primer efecto.
- Con el flujo másico inicial (L_0) y las concentraciones de alimentación y final, x_0 y x_n respectivamente, con n siendo el número de efectos del conjunto de evaporadores. Se calcula el flujo de licor a la salida de acuerdo a la ecuación:

$$L_n = L_0 x_0 / x_n$$

Ec. No. 1

- Con el flujo de licor saliente, se calcula el flujo total de vapor vegetal producido en todos los efectos como conjunto, esto haciendo el balance global de vapor:

$$V=L_0-L_n \quad \text{Ec. No. 2}$$

- Luego, se hace una primera aproximación considerando un flujo de vapor constante en cada uno de los efectos.

$$V_i=V/n_i=1,2,\dots,n \quad \text{Ec. No. 3}$$

- Con estos valores de los flujos másicos de vapor en cada efecto, se puede calcular el flujo másico de licor saliente de cada uno, de acuerdo a:

$$L_i=L_{i-1}-V_i \quad i=1,2,\dots,n \quad \text{Ec. No. 4}$$

- Una vez calculados los flujos de líquido se puede hacer una primera aproximación a los valores de la concentración en cada efecto del evaporador, de acuerdo con:

$$x_i = L_{i-1} * x_{i-1} / L_i \quad \text{Ec. No. 5}$$

- Se calcula el cambio de temperatura global en el conjunto de evaporadores de acuerdo a la ecuación:

$$\Delta T = T_s - T_n - \sum E.P.E_i \quad \text{Ec. No. 6}$$

- Con este cambio de temperatura, se estima la temperatura en cada uno de los efectos del evaporador, según sigue:

$$T_i = T_{i-1} + EPE_{i-1} - \frac{\Delta T / U_i}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{U_j}} \quad \text{Ec. No. 7}$$

- Una vez se han calculado las temperaturas, para cada efecto, se pueden calcular las temperaturas de saturación en la calandria de cada efecto, de la siguiente manera:

$$T_{s_i}=T_i-EPE_{i-1} \quad \text{Ec. No. 8}$$

- Con estos datos, se deben calcular las propiedades termodinámicas de los flujos de vapor, tanto en la calandria como en el cuerpo del

evaporador, de acuerdo a las correlaciones presentadas en las tablas I, III, IV, V y VI.

- Con todos los datos termodinámicos calculados, se deben calcular los factores de balances energéticos, que serán denominados:

$$\lambda_i = H_i - h_i \quad \text{Ec. No. 9}$$

$$HA_i = H_{i+1} + C_{p_i} E P E_i \quad \text{Ec.No. 10}$$

$$A_i = C_{p_i} T_i - \lambda_{i+1} - HA_{i+1} \quad \text{Ec.No. 11}$$

$$B_i = HA_i - C_{p_i} T_i \quad \text{Ec.No. 12}$$

- Paso seguido, se llena una matriz de n+1 filas por n+1 columnas, de la siguiente manera, en la diagonal principal, se llena con los A_i , donde i es el número de columna y de fila. Ahora, si se denota con "i" el número de fila y con "j" el número de la columna, entonces para las posiciones para las cuales $i=j+1$, se llena con λ_{i+1} , para las cuales $j=i+1$ se llena con B_j , y en el resto de posiciones se aplica cero. Este sistema matricial homogéneo, con respecto a los flujos salientes de jarabe del evaporador denotados, por L_1, L_2, \dots, L_{n-1} se resuelve mediante el método de Kramer, para obtener dichos flujos.
- L_n se calcula directamente del balance de masa.
- Con los flujos de líquido ya calculados, se calculan los flujos de vapor de acuerdo con el balance másico por vapor en cada efecto.
- Luego se calcula el flujo total de vapor vivo alimentado mediante la ecuación:

$$S = \frac{L_1 \cdot C_{p_1} T_1 + V_1 H_1 - L_0 C_{p_0} T_0}{\lambda_1} \quad \text{Ec.No.13}$$

- De este modo, se realiza el balance energético en cada efecto y se calcula el área de cada evaporador.
- En caso que estos no difieran entre sí en más de un 10%, se toma el resultado como válido (generalmente, el método converge en una iteración), en caso contrario, se inicia una segunda iteración, volviendo

con los flujos de vapor y de líquido ya calculados, a estimar todas las temperaturas y con estas, las propiedades termodinámicas, de modo que se vuelva a obtener S.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la validación de los modelos de las propiedades termodinámicas del agua, se realizó, de principio un análisis de los errores relativos porcentuales de los datos arrojados por los modelos con respecto de los datos estándares tabulados en la bibliografía.

Tabla VII. Análisis de errores porcentuales para los modelos de ajuste para las tablas termodinámicas de vapor.

Propiedad termodinámica	Error porcentual
Temperatura	0.69%
Entalpía de líquido	0.80%
Entalpía de vapor	0.06%

Luego de esto se dividieron todos los datos ofrecidos por los modelos entre su correspondiente valor tabulado en los datos estándares en la bibliografía. Mientras más cercano es este valor a la unidad, más perfecto es el ajuste, de modo, que si se calcula la probabilidad con que la media de la serie de datos tiende a la unidad, se calcula la probabilidad con que el modelo ajusta correctamente a los datos tabulados. Esto se realiza por medio de una prueba de ajuste a la distribución normal.

Tabla VIII. Análisis de las razones “Datos simulado / Dato tabulado”

	Datos simulado / Dato tabulado		
	TEMPERATURA	ENTALPÍA DE LÍQUIDO	ENTALPÍA DE VAPOR
PROMEDIO	0.9945	1.0070	0.9998
DESVIACIÓN	0.0092	0.0076	0.0007
Z MUESTRA	3.93	6.02	1.81
CONFIANZA	100.00%	100.00%	96.51%

Para validar el algoritmo, se evalúa la solución, por medio del programa desarrollado, de un problema de evaporación en Ingeniería Química.

4.1. PROBLEMA 1

Se usa un evaporador triple efecto y de alimentación hacia delante para evaporar una solución de azúcar que contiene una 10% de sólidos en peso, hasta una concentración de 50% en peso. Se usa vapor de agua saturado a 205.5kPa para el calentamiento. La presión en el espacio de vapor del tercer efecto es de 13.4kPa. La velocidad de alimentación es de 22680 kg/h a 26.7°C. Calcule los flujos de licor en cada evaporador, la cantidad de vapor utilizada.

En la sección de resultados se desarrolló un algoritmo para la simulación del proceso de evaporación, aún cuando este es un proceso largo y tedioso de cálculo, para fines educativos de Ingeniería Química, resulta necesario desarrollar este algoritmo al menos una vez, para comprender el marco conceptual del mismo

Paso 1:

Con la presión en el condensador, se obtiene la temperatura de saturación del vapor en el mismo. Utilizando el polinomio de ajuste que se detalla en la Tabla III de la sección de resultados. Se obtiene una temperatura de condensación de 51.3°C

Paso 2:

Con la presión de alimentación del vapor de calentamiento proveniente de la caldera o las líneas de vapor (205.5Kpa), se calcula la temperatura de saturación en los tubos de calentamiento del primer efecto, dando 121.2°C como resultado.

Paso 3:

Se calcula el flujo de licor a la salida de acuerdo a la ecuación, haciendo un balance de masa global sobre todo el sistema de evaporación:

$$L_n = L_0 x_0 / x_n = 22,680 * 0.1 / 0.5 = 4,536 \text{ Kg/h}$$

Paso 4:

Con el flujo de licor saliente, se calcula el flujo total de vapor vegetal producido en todos los efectos como conjunto, esto haciendo el balance global de vapor:

$$V = L_0 - L_n = 22,680 - 4,536 = 18,144 \text{ Kg/h}$$

Paso 5:

Luego, se hace una primera aproximación considerando un flujo de vapor constante en cada uno de los efectos.

$$V_i = V/n = 18,144/3 = 6,048 \text{ Kg/h}$$

Paso 6:

Con estos valores de los flujos másicos de vapor en cada efecto, se puede calcular el flujo másico de licor saliente de cada uno, de acuerdo a:

$$L_i = L_{i-1} - V_i$$

$$L_1 = 22,680 - 6,048 = 16,632 \text{ Kg/h}$$

$$L_2 = 16,632 - 6,048 = 10,584 \text{ Kg/h}$$

$$L_3 = 10,584 - 6,048 = 4,536 \text{ Kg/h}$$

Esta es una primera aproximación muy burda, pero sirve como base de cálculo.

Paso 7:

Una vez calculados los flujos de líquido se puede hacer una primera aproximación a los valores de la concentración en cada efecto del evaporador, de acuerdo con:

$$x_i = L_{i-1} * x_{i-1} / L_i$$

$$x_1 = 22,680 * 0.10 / 16,632 = 0.136$$

$$x_2 = 16,632 * 0.14 / 10,584 = 0.214$$

$$x_3 = 10,584 * 0.22 / 4,536 = 0.500$$

Paso 8:

Se calcula el cambio de temperatura global en el conjunto de evaporadores de acuerdo a la ecuación:

$$\Delta T = T_s - T_n - \Sigma E.P.E_i$$

$$\Sigma E.P.E_i = EPE_1 + EPE_2 + EPE_3 = 0.36 + 0.66 + 2.44 = 3.46$$

$$\Delta T = 121.2 - 51.3 - 3.46 = 66.44$$

Paso 9:

Con este cambio de temperatura, se estima la temperatura en cada uno de los efectos del evaporador, según sigue:

$$T_i = T_{i-1} + EPE_{i-1} - \frac{\Delta T / U_i}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{U_j}}$$

$$T_1 = 121.2 + 0.36 - (66.44/2500)/0.0019 = 107.3^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 107.3 + 0.66 - (66.44/1800)/0.0019 = 88.17^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 88.17 + 2.44 - (66.44/1100)/0.0019 = 58.22^\circ\text{C}$$

Los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor de los evaporadores se consideraron de manera decreciente lineal, entre los intervalos usuales, recomendados en la bibliografía, para los evaporadores.

Paso 10:

Una vez se han calculado las temperaturas, para cada efecto, se pueden calcular las temperaturas de saturación en la calandria de cada efecto, de la siguiente manera:

$$T_{s_i} = T_i - EPE_{i-1}$$

$$T_{s_1} = 107.3 - 0.36 = 106.94^\circ\text{C}$$

$$T_{s_2} = 88.17 - 0.66 = 87.51^\circ\text{C}$$

$$T_{s_3} = 58.22 - 2.44 = 55.78^\circ\text{C}$$

Paso 11:

Con todos los datos termodinámicos calculados para estas temperaturas, se deben calcular los factores de balances energéticos, que serán denominados:

$$\lambda_i = H_i - h_i$$

$$HA_i = H_{i+1} + C_{p_i} EPE_i$$

$$A_i = C_{p_i} T_i - \lambda_{i+1} - HA_{i+1}$$

$$B_i = HA_i - C_{p_i} T_i$$

Paso seguido, se llena una matriz de n+1 filas por n+1 columnas, de la siguiente manera, en la diagonal principal, se llena con los A_i , donde i es el número de columna y de fila. Ahora, si se denota con "i" el número de fila

y con “j” el número de la columna, entonces para las posiciones para las cuales $i=j+1$, se llena con λ_{i+1} , para las cuales $j=i+1$ se llena con B_j , y en el resto de posiciones se aplica cero. Este sistema matricial homogéneo, con respecto a los flujos salientes de jarabe del evaporador denotados, por L_1, L_2, \dots, L_{n-1} se resuelve mediante el método de Kramer, para obtener dichos flujos.

Esto se iguala el vector columna compuesto por $-L_0 \cdot \lambda_2$ en la primera fila y $-B_3 \cdot L_3$ en la última, el resto de filas se llena con ceros. Esto proviene de los balances energéticos.

L_1	L_2	=
$A_1 = -4,469$	$B_2 = 2,330$	$-L_0 \cdot \lambda_2 = -50,597,256$
$\lambda_3 = 2,283$	$A_2 = -4,555$	$-B_3 \cdot L_3 = -11,009,851$

De este proceso se obtienen los mismos resultados del simulador, pues este algoritmo, para este problema en particular converge a la primera iteración.

Figura 5. Pantalla de ingreso de datos de simulador.



Fig. No. 6: Resultados de la simulación.

Figura 6. Datos termodinámicos para el primer efecto.

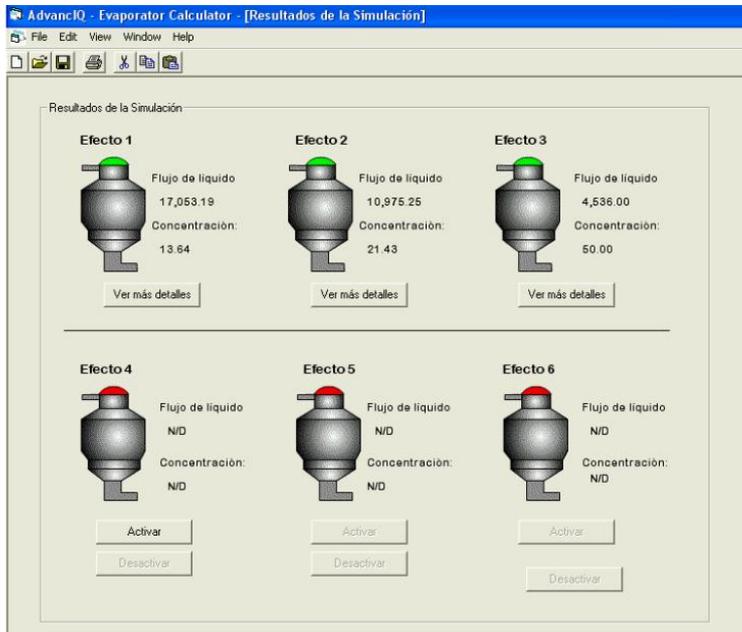


Figura 7. Datos termodinámicos para el primer efecto.



Tabla XI. Resultados del problema

Resultados	Simulador	Bibliografía	Error porcentual
Flujo de vapor (kg/h)	8996	8936	0.67%
Licor primer efecto (kg/h)	17,053	17,078	0.15%
Licor segundo efecto (kg/h)	10,975	11,068	0.84%
Licor tercer efecto (kg/h)	4,536	4,536	0.00%

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los procesos de evaporación, son típicos en las industrias, donde una materia prima o producto semiterminado, requiere pasar de un estado de concentración menor a uno mayor, ya sea para la preservación del mismo, o para la cristalización posterior, por medio de la eliminación del solvente en el cual se encuentran disueltos.

En este tipo de procesos se requiere el conocimiento de los valores de las propiedades físicas y en ocasiones químicas, de los fluidos a trabajar

Se puede observar en la sección de resultados que se calcularon las capacidades caloríficas de los distintos fluidos que se han propuesto simular. Se puede observar que para las soluciones de un soluto no volátil en un solvente, la capacidad calorífica se ve afectada de modo lineal con respecto de la concentración del mismo. No obstante, para la leche, que es un caso particular, pues es una emulsión de más de un compuesto orgánico, se observa una dependencia del tipo cuadrática. Esto, es comprensible, si se analiza desde el punto de vista microscópico y no macroscópico, es decir, si se comprende que en las emulsiones de compuestos orgánicos, liposolubles, en agua, hay fuerzas intermoleculares y tensiones superficiales, inexistentes en las soluciones de sustancias polares o hidrolizables en agua.

Por lo tanto, se podría esperar este comportamiento polinómico en emulsiones orgánicas como cremas para manos, emulsiones de siliconas liposolubles, emulsiones poliméricas, entre otras.

Por otra parte, se puede observar que se han calculado las elevaciones del punto de ebullición con respecto al punto del agua, para la presión

atmosférica local, con relación a la concentración del soluto. En este caso, se puede observar que la elevación del punto de ebullición responde, a un polinomio de segundo grado. Esto, se puede contraponer con la aproximación que ofrecen los postulados de las propiedades coligativas, que dice que la elevación del punto de ebullición depende directamente a la concentración molal del soluto, con una constante de proporcionalidad, denominada constante ebulloscópica.

No obstante, cabe hacer notar, que para los compuestos electrolíticos, el término que afecta cuadráticamente el aumento de temperatura, es mucho mayor, en valor absoluto, que para los no electrolíticos, esto, dando una pauta, para el ajuste que realizó Van't Hoff, para los compuestos electrolíticos, para los cuales determinó una constante de actividad, que afecta directamente esta elevación del punto de ebullición.

Por lo tanto, para una concentración baja de solutos, o bien, antes de entrar a la zona de saturación de la solución, la ecuación de proporcionalidad, que ofrecen las propiedades coligativas, es válida, no obstante, una vez pasada la región de saturación y luego de llegar a la región de sobresaturación, el término cuadrático afecta de manera significativa. Por lo tanto, los resultados obtenidos, no contradicen los modelos establecidos, sino los refuerzan y complementan.

Para las funciones calculadas para predecir las propiedades termodinámicas del vapor de agua, se puede observar, en el análisis estadístico de estos datos, que el ajuste de estas funciones tiene una confianza del 100% y del 97%, para cada propiedad. Lo que significa, que, desde el punto de vista estadístico, las correlaciones, arrojan datos, confiables, de acuerdo con la distribución normal gaussiana.

CONCLUSIONES

1. La relación de la capacidad calorífica contra la concentración en las soluciones de un solo compuesto es de tipo lineal, en las emulsiones orgánicas es de tipo polinómica.
2. Las elevaciones de los puntos de ebullición se relacionan con una función cuadrática que se aproxima en un intervalo pequeño a lo establecido por las propiedades coligativas.
3. Las soluciones electrolíticas presentan un factor mayor, en valor absoluto, para el término cuadrático en la elevación del punto de ebullición, corroborando el ajuste de Van't Hoff para la actividad electrolítica en las soluciones acuosas.
4. El algoritmo desarrollado, presentó la capacidad de resolver sistema de evaporación de múltiple efecto, para n efectos, siendo n cualquier entero positivo mayor que uno.
5. El algoritmo utilizado con las correlaciones determinadas experimentalmente, presentan un intervalo de confianza entre el 97 y el 100% con respecto de la distribución normal.

RECOMENDACIONES

1. Se propone que en este trabajo de graduación se continúe haciendo una contraposición del algoritmo con un caso real en un ingenio azucarero, para determinar el ajuste a la realidad y la posibilidad para utilizarlo como medio de evaluación de la eficiencia térmica de los equipos en el mismo.
2. Se sugiere que este trabajo sea utilizado como herramienta didáctica en los cursos de Transferencia de calor y de Diseño de equipo, en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos.
3. Se aconseja que se continúe el estudio los comportamientos de las funciones de ajuste a las propiedades termodinámicas y encontrar una explicación fisicoquímica a los mismos.

REFERENCIAS

1. Ecuación de Antoine, 1p. Consultada el 11 de octubre de 2005.
Disponible en: http://fsalazar.bizland.com/FQ_ANTOINE.htm

BIBLIOGRAFÍA

1. FARRINGTON, Daniels, "*Experimental Physical Chemistry*", 7ma Edición en inglés, McGraw-Hill, Estados Unidos, 1970.
2. GEANKOPLIS, Christie, "*Procesos de transporte y operaciones unitarias*", 3ra. Edición, Editorial Continental, México 1998.
3. PERRY, Robert, "Chemical Engineers' Handbook", 7ma. Edición, McGraw-Hill, Estados Unidos, 1997.
4. SHOEMAKER, David, "*Experiments in Physical Chemistry*", Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos 1962.

APÉNDICES

A. TABLAS DE VAPOR SATURADO

Tabla X. Tablas de vapor saturado.

P [Pa]	T (°C)	H_{líquido} (KJ/Kg)	λ (KJ/Kg)	H_{vapor} (KJ/Kg)
611	0.10	0.00	2501.40	2501.4
758	3.00	12.57	2494.33	2,506.90
935	6.00	25.20	2487.20	2,512.40
1148	9.00	37.80	2480.10	2,517.90
1402	12.00	50.41	2472.99	2,523.40
1705	15.00	62.99	2465.91	2,528.90
2064	18.00	75.58	2458.82	2,534.40
2487	21.00	88.14	2451.76	2,539.90
2985	24.00	100.70	2444.70	2,545.40
3169	25.00	104.89	2442.31	2,547.20
3567	27.00	113.25	2437.55	2,550.80
4246	30.00	125.79	2430.51	2,556.30
5034	33.00	138.33	2423.37	2,561.70
5947	36.00	150.86	2416.24	2,567.10
7384	40.00	167.57	2406.73	2,574.30
9593	45.00	188.45	2394.75	2,583.20
12349	50.00	209.33	2382.77	2,592.10
15758	55.00	230.23	2370.67	2,600.90
19940	60.00	251.13	2358.47	2,609.60
25030	65.00	272.06	2346.24	2,618.30
47390	80.00	334.91	2308.79	2,643.70

P [Pa]	T (°C)	H_{líquido} (KJ/Kg)	λ (KJ/Kg)	H_{vapor} (KJ/Kg)
57830	85.00	355.90	2296.00	2,651.90
70140	90.00	376.92	2283.18	2,660.10
84550	95.00	397.96	2270.14	2668.1
101350	100.00	419.04	2256.96	2676
120820	105.00	440.15	2243.65	2683.8
143270	110.00	461.30	2230.20	2691.5
169060	115.00	482.48	2216.52	2699
198530	120.00	503.71	2202.59	2706.3
232100	125.00	524.99	2188.51	2713.5
270100	130.00	546.31	2174.19	2720.5
313000	135.00	567.69	2159.61	2727.3
415400	145.00	610.63	2129.67	2740.3
475800	150.00	632.20	2114.30	2746.5
543100	155.00	653.84	2098.56	2752.4
617800	160.00	675.50	2082.60	2758.1
700500	165.00	697.34	2066.16	2763.5
791700	170.00	719.21	2049.49	2768.7
892000	175.00	741.17	2032.43	2773.6
1002100	180.00	763.22	2014.98	2778.2
1254400	190.00	807.62	1978.78	2786.4
1553800	200.00	852.45	1940.75	2793.2
2548000	225.00	966.78	1836.52	2803.3
3973000	250.00	1085.36	1716.14	2801.5
5942000	275.00	1210.07	1574.93	2785
8581000	300.00	1344.00	1405.00	2749

B. DATOS PARA EL CÁLCULO DE LAS CORRELACIONES DE LAS ELEVACIONES DE PUNTO DE EBULLICIÓN

Tabla XI. Datos para la correlación de las soluciones de NaOH

Concentración (P/P)	T (°C)	EPE (°C)
0.25	100.0	4.0
0.20	98.7	2.7
0.15	98.0	2.0
0.10	97.0	1.0
0.05	96.7	0.7
0.00	96.0	0.0

Tabla XII. Datos para la correlación de las soluciones de NaCl

Concentración (P/P)	T (°C)	EPE (°C)
0.5	145	45
0.4	125	25
0.3	115	15
0.2	108	8
0.1	105	5
0.0	100	0

Tabla XIII. Datos para la correlación de las soluciones de Leche

Concentración (P/P)	T (°C)	EPE (°C)
0.25	96.8	0.8
0.20	96.5	0.5
0.15	96.4	0.4
0.10	96.3	0.3
0.05	96.2	0.2
0.00	96.0	0.0

Tabla XIV. Datos para la correlación de las soluciones de Azúcar

Concentración (P/P)	T (°C)	EPE (°C)
0.25	96.8	0.8
0.20	96.6	0.6
0.15	96.4	0.4
0.10	96.2	0.2
0.05	96.1	0.1
0.00	96.0	0.0