

300618

7₂₉

UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA
INCORPORADA A LA U.N. A.M.



"DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA SIMULACION DINAMICA
DE EVAPORADORES DE MULTIPLE EFECTO"

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
LUIS ENRIQUE GUITRON JIMENEZ

MEXICO, D. F.

1988

FALLA DE CRIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C ECAPITULO IIntroducción

1.1	Introducción.	1
1.2	Objetivo.	1
1.3	Alcances y limitaciones.	2
1.4	Equipo usado.	2

CAPITULO IIBases Teóricas de la Evaporación

2.1	Introducción.	3
2.2	Generalidades sobre la evaporación.	3
2.3	Punto de ebullición.	3
2.4	Elevación del punto de ebullición en las soluciones.	4
2.5	Mecanismos de la ebullición. Ebullición por nucleación y ebullición por película.	4 7
2.6	Coefficientes globales de transferencia de calor.	10
2.7	Clasificación del equipo para evaporación.	11
2.8	Clasificación y descripción de los evaporadores químicos.	12
2.8.1	Evaporadores de convección natural.	12
2.8.1.1	Evaporadores de tubos horizontales.	13
2.8.1.2	Evaporadores de tubos verticales tipo calandria.	13
2.8.1.3	Evaporadores de tubos verticales tipo canasta.	15
2.8.1.4	Evaporadores de tubos verticales largos.	15

	página
2.8.1.5 Evaporadores de película.	15
2.8.2 Evaporadores de convección forzada.	19
2.8.3 Selección del evaporador óptimo.	19
2.8.2 Operación de los evaporadores químicos. Evaporación a simple efecto y evaporación a múltiple efecto.	21
2.9.1 Tipos de flujo en los evaporadores de múltiple efecto. Flujo en paralelo y flujo en contracorriente.	24
2.9.2 Ventajas y desventajas del flujo en paralelo.	24
2.9.3 Ventajas y desventajas del flujo en contracorriente.	25
2.9.4 Elección del tipo de flujo óptimo.	25
2.10 Procesos a régimen no permanente.	26
2.11 Análisis y optimización de los evaporadores de múltiple efecto.	27
2.12 Aplicaciones de los evaporadores químicos en la industria.	27

CAPITULO III

Descripción del Modelo Matemático

3.1 Introducción.	28
3.2 Comportamiento dinámico de un evaporador de simple efecto.	28
3.3 Modelo dinámico para un evaporador de simple efecto.	31
3.4 Métodos numéricos para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales.	32
3.4.1 Errores por truncamiento.	33
3.4.2 Método implícito de los dos puntos.	34
3.4.3 Solución del modelo dinámico para evaporadores de simple efecto mediante el método implícito de los dos	

puntos.	35
3.4.4 Características de estabilidad del método implícito de los dos puntos en problemas de evaporación.	36
3.5 Solución de sistemas de ecuaciones no lineales (método de Newton-Raphson).	37
3.6 Derivación numérica de funciones.	39
3.7 Procedimientos de escalamiento.	40
Escalamiento de variables y renglones.	40
3.8 Modelo dinámico para sistemas de evaporadores de múltiple efecto.	43
3.9 Descripción del algoritmo usado en el simulador.	45

Capítulo IV

Descripción del Simulador

4.1 Introducción.	47
4.2 Características del programa.	47
4.3 Programa principal.	48
4.4 Subrutinas.	50
4.5 Subrutinas especiales.	53
4.6 Funciones.	53
4.7 Variables.	55
4.8 Listados.	59

CAPITULO V

Manual del Usuario

5.1 Introducción.	88
5.2 Funcionamiento general del programa.	88

	página
5.3 Inicio del programa.	88
5.4 Selección del tipo de solución que se va a evaporar.	88
5.5 Número de efectos del sistema de evaporadores.	89
5.6 Tipo de flujo.	89
5.7 Sistema de unidades.	89
5.8 Grado de precisión en los cálculos.	90
5.9 Condiciones de operación de los fluidos.	90
5.10 Datos mecánicos de los evaporadores.	91
5.11 Simulación del comportamiento del sistema de evaporadores en régimen permanente.	91
5.12 Opciones para continuar la ejecución del programa.	93
5.13 Simulación del comportamiento del sistema de evaporadores en régimen no permanente.	93
5.14 Final del programa.	94
5.15 Ejemplo de uso del programa.	96

CAPITULO VI

Conclusiones

6.1 Conclusiones.	103
-------------------	-----

CAPITULO VII

Apéndices

Apéndice A.- Asignación de valores aproximados a las condiciones del sistema de evaporadores. para usarlas como punto de partida en el método de Newton Raphson.	105
Apéndice B.- Evaluación del Jacobiano.	107
Apéndice C.- Inversión de Matrices.	109
Apéndice D.- Propiedades termodinámicas del vapor de agua.	110

Apéndice E.- Propiedades termodinámicas de las soluciones acuosas.	111
APENDICE F.- Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.	113

CAPITULO VIII

Bibliografía

B.1 Bibliografía.	114
-------------------	-----

CAPITULO I

Introducción

1.1 Introduccion .-Debido al gran desarrollo que han tenido las computadoras digitales en nuestros días, y a la gran influencia que han ejercido las mismas en la mayoría de las actividades humanas, se le ha empezado a denominar a esta época "La era de las computadoras". Durante los últimos años las computadoras han sido herramientas indispensables en la gran mayoría de las ciencias, siendo notable por ejemplo, la gran ayuda que las computadoras le han dado a las ciencias de la ingeniería.

Dentro de la Ingeniería Química una de las áreas que mas desarrollo ha tenido durante "La era de las computadoras" ha sido la simulación de procesos, ya que las computadoras facilitaron la realización de la gran cantidad de cálculos matemáticos que se requieren en esta área.

Esto les ha permitido a los Ingenieros Químicos experimentar e incluso aprender sobre procesos industriales que aún no existen físicamente, pero que ya fueron creados en la memoria de una computadora.

Para efectuar este estudio se seleccionó una de las operaciones industriales mas importantes para concentrar soluciones: "La Evaporación a Múltiple Efecto". La selección de este tipo de procesos se debió en gran medida a la complejidad que presentan para su entendimiento, ya que se ven afectados por un gran número de variables. Esto hace que sea necesaria la simulación de estos procesos en una computadora para poder entenderlos mejor.

1.2 Objetivo .-El objetivo de este estudio consiste en desa-

rrollar e implementar un simulador que ayude a que los alumnos de Ingeniería Química se familiaricen con el manejo de las condiciones de operación de los sistemas de evaporadores de múltiple efecto y también que les ayude a entender el comportamiento que tienen los procesos cuando se encuentran operando en régimen no permanente.

1.3 Alcances y Limitaciones .-Debido a los objetivos didácticos que tiene el simulador, al desarrollar el modelo matemático sólo se tomaron en cuenta las principales variables que intervienen en el proceso de evaporación. Esto hace que la precisión de la simulación se vea reducida, pero ayuda a que el alumno entienda fácilmente la estructura y el manejo del simulador.

El simulador también le permite al alumno modificar libremente cualquiera de los parámetros del proceso, ayudándolo a comprender el efecto que tiene cada uno de ellos en el comportamiento global del sistema de evaporadores de múltiple efecto.

1.4 Equipo Usado .-El simulador se desarrollo en el computador HEWLETT PACKARD 1000 Modelo 19, del Centro de Cómputo Educativo de la Universidad La Salle.

El lenguaje usado fue Fortran 77-HP-1000, el cual es básicamente el Fortran 77 ANSI, mas algunas extensiones de HEWLETT PACKARD.

CAPITULO II

Bases Teóricas de la Evaporación

2.1 Introducción .-En este capítulo se presentan y describen las bases teóricas sobre evaporación, evaporadores de efecto simple y efecto múltiple, así como los conceptos sobre régimen permanente y régimen no permanente.

2.2 Generalidades sobre la evaporación .-La evaporación es una de las operaciones unitarias más antiguas, siendo comúnmente usada para separar un soluto no volátil de un solvente volátil. La evaporación se efectúa por medio de un suministro de calor a la fase líquida, la subsecuente evaporación de una parte del líquido y el rompimiento continuo del equilibrio dinámico entre la presión de vapor del líquido y la presión parcial del vapor en el espacio que rodea al líquido.

Si la superficie del líquido está expuesta, las moléculas calientes del líquido son arrastradas por la corriente de aire. Si el recipiente está cerrado, estas moléculas fluyen a una región de menor presión. Dicha región puede crearse al eliminar continuamente las moléculas de vapor en ese lugar por medio de un descenso de temperatura, disminuyendo así el número y la velocidad de las moléculas gaseosas y por lo tanto la presión resultante. Esto se logra por ejemplo mediante un condensador.

2.3 Punto de ebullición .-Las moléculas que tienen mayor velocidad (energía cinética) son las que salen primero del líquido durante la evaporación. Debido a que la velocidad molecular es función de la temperatura, al aumentar la temperatura del líquido, se aumenta el número de moléculas con veloci-

dad suficiente para escapar de la superficie del líquido. La temperatura en la cual las moléculas que escapan producen una presión igual a la presión de trabajo, recibe el nombre de temperatura de ebullición y es la temperatura a la cual se produce un escape mayor de moléculas líquidas a una presión dada.

2.4 Elevación del punto de ebullición en las soluciones .-Cuando evaporamos una solución formada por un solvente volátil y un soluto no volátil, la temperatura de ebullición de la solución a una presión dada es mayor a la temperatura de ebullición del solvente puro a la misma presión. A esta diferencia de temperaturas se le llama elevación del punto de ebullición de la solución. Este fenómeno se representa mediante la siguiente ecuación:

$$T = m(x)t + b(x) \quad (2.1)$$

en donde: T=Temperatura de ebullición de la solución.

t=Temperatura de ebullición del solvente puro.

x=Concentración del soluto no volátil.

m(x),b(x)=Parámetros característicos de cada solución a una composición dada.

Cuando la relación de línea recta de la ecuación (2.1) es seguida por una solución se dice que la solución obedece la regla de Duhring. Una típica gráfica de During para una solución de NaOH se muestra en la figura (2.1).

2.5 Mecanismos de la ebullición .-Al calentar un recipiente que contenga un líquido se empiezan a formar pequeñas burbujas de vapor en puntos aleatorios de la superficie caliente.

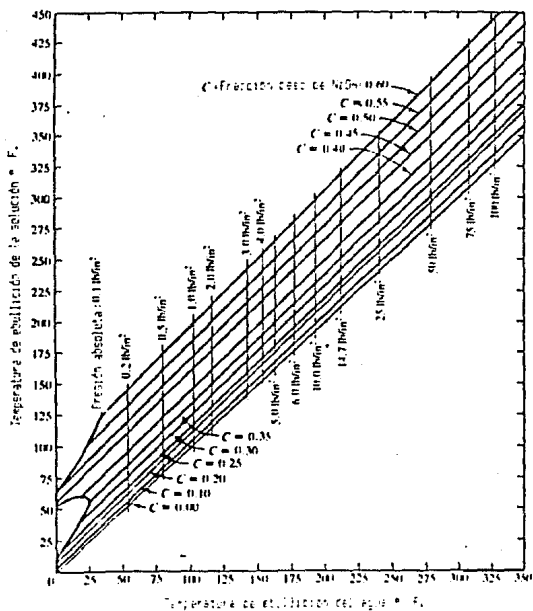


Figura 2.1.-Gráfica de Charting para una solución

de hidróxido de sodio en agua

Esta superficie puede ser alguna de las paredes del recipiente a través de la cual se proporciona calor, o la superficie de un tubo inmerso en el líquido y por el cual fluye un fluido caliente.

El calor pasa a través de la superficie caliente hacia el líquido en los lugares en los que aún no se han formado burbujas y se distribuye en todo el líquido mediante convección natural. Parte de el calor fluye hacia las burbujas haciendo que se evapore más líquido del que se encuentra alrededor de ellas, lo que las hace aumentar de tamaño. Cuando se ha desarrollado la suficiente fuerza ascendente entre las burbujas y el líquido, las burbujas se liberan de las fuerzas que las sujetan a la superficie caliente y se elevan hacia la superficie del líquido.

La transferencia de calor por vaporización sin agitación mecánica, es una combinación de la convección natural del líquido y la convección adicional producida por las corrientes ascendentes de burbujas. Bajo pequeñas diferencias de temperatura entre la superficie caliente y el líquido en ebullición, la formación de burbujas se realiza lentamente, y la velocidad de transferencia de calor depende únicamente del líquido.

El número de puntos en los que se originan las burbujas depende directamente de la textura de la superficie caliente, siendo su rugosidad un factor muy importante.

Otro factor de gran importancia en la formación y crecimiento de las burbujas es la tensión superficial que existe entre el líquido y la superficie caliente. Si la tensión su-

perforal es baja, el líquido tiende a mojar a la superficie caliente (Fig 2.2(a)), haciendo que las burbujas se desprendan y se eleven hacia la superficie del líquido. Para líquidos con tensión superficial intermedia (Fig 2.2(b)), puede existir un balance momentáneo entre la burbuja y la superficie caliente, por lo tanto se requiere formar burbujas mayores para que la fuerza ascendente pueda hacer que se eleven. En los líquidos de tensión superficial alta (Fig 2.2(c)), el tamaño de las burbujas tiene que ser aún mayor para poder liberarlas de la superficie caliente.

Ebullición por nucleación y ebullición por película. -Si se grafica en forma logarítmica la cantidad de calor transferido hacia el líquido en ebullición por unidad de área de superficie caliente (Q/A) , contra la diferencia de temperaturas que existe entre la superficie caliente y el líquido en ebullición $(DT)w$, obtendremos una curva similar a la de la figura 2.3. Por definición el coeficiente de transferencia de calor en la ebullición (hv) es:

$$hv = (Q/A)/(DT)w \quad (2.2)$$

por lo tanto, a partir de la primera curva podemos graficar hv contra $(DT)w$.

Las primeras curvas de este tipo fueron realizadas por Mac Adams, correspondiendo las de la figura 2.3 a las del agua ebulliciendo a presión atmosférica.

Las curvas de Mac Adams se pueden dividir en 3 segmentos distintos. En el primer segmento, a $(DT)w$ bajas, la línea AB es recta y con una pequeña pendiente positiva.

En el segundo segmento la línea BC es también una recta,

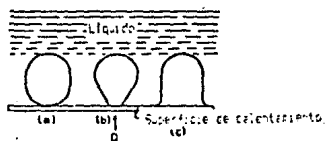


Figura D.1.-Efecto de la tensión superficial en la formación de las burbujas.

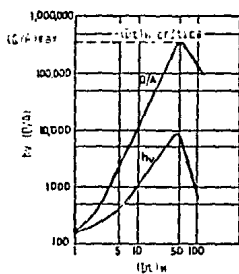


Figura D.2.-Curvas de Mc Adams para agua hirviendo a presión atmosférica.

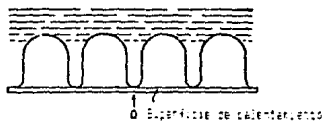


Figura D.3.-Ebullición por película.

pero tiene una pendiente mayor a la de la línea AB. El segundo segmento termina en el punto C, en el cual la pendiente de la curva cambia de signo transformándose de ascendente(+) en descendente(-).

En el punto C tanto el calor transferido por unidad de área (Q/A), como el coeficiente de transferencia de calor (hv), alcanzan su valor máximo. A la diferencia de temperaturas (DT)_w existente en este punto se le llama *diferencia de temperaturas crítica*.

Los valores en este punto para el agua ebulviendo a 1 atmósfera son: (Q/A) = 400,000 Btu/hr ft²

$$(hv) = 8000 \text{ Btu/hr}$$

$$(DT)_w = 45 \text{ }^\circ\text{F}$$

En el tercer segmento de la curva, a partir del punto C, tanto (Q/A) como (hv) disminuyen al aumentar (DT)_w.

Cada uno de los 3 segmentos de las curvas de Mac Adams, corresponde a un diferente mecanismo de ebullición. En la primera sección de las curvas, cuando la (DT)_w es baja, el calor se transfiere principalmente mediante convección natural. En estas condiciones, aunque ya existen corrientes de burbujas ascendentes, estas son tan pequeñas que no afectan a las corrientes de convección natural.

En la segunda sección las (DT)_w son mayores (desde 9 hasta 45 °F en el caso del agua), por lo que la velocidad de formación de burbujas es lo suficientemente grande para hacer que las corrientes ascendentes de burbujas aumenten la turbulencia del líquido. Esta turbulencia hace que el coeficiente de transferencia de calor total hv, sea mucho mayor que el

debido al de la sola convección natural. Al ir aumentando $(DT)_w$ la velocidad de formación de burbujas aumenta, por lo que el coeficiente de transferencia de calor se incrementa rápidamente.

Al mecanismo de ebullición correspondiente a estas 2 zonas (la AB y la BC) se le llama ebullición por nucleación, debido a que las burbujas solo se forman en algunos núcleos o puntos de la superficie caliente. En este tipo de ebullición, las burbujas ocupan solo una pequeña porción de la superficie caliente en un determinado momento, quedando la mayor parte de la superficie caliente en contacto con el líquido.

En la tercera sección de la curva, la superficie caliente y el líquido se acercan a la condición mostrada en la figura 2.4. Debido a la gran cantidad de calor transferido hacia el líquido las burbujas cubren la mayor parte de la superficie caliente, quedando solo un área pequeña disponible para que el líquido haga contacto con ella. La capa de burbujas actúa como una resistencia a la transferencia de calor, reduciéndose el coeficiente de transferencia de calor conforme se aumenta la diferencia de temperaturas $(DT)_w$.

A este mecanismo de ebullición se le llama ebullición por película.

De todo lo anterior se concluye que las altas diferencias de temperatura, tan favorables en la transferencia de calor por conducción y por convección, son desfavorables para la ebullición.

2.6 Coeficientes Globales de Transferencia de Calor .-Los siguientes factores afectan directamente a la velocidad de

transferencia de calor en la vaporización, y han frustrado en gran medida los intentos de obtener una o dos correlaciones simples, aplicables a la mayoría de los líquidos: (1) la naturaleza de la superficie caliente y la distribución de las burbujas; (2) las propiedades del líquido en ebullición, tales como tensión superficial, coeficiente de expansión y viscosidad; (3) el complicado mecanismo de formación y crecimiento de las burbujas.

Esto ha originado que en el diseño de evaporadores se use la siguiente ecuación empírica:

$$(Q/A) = U_c (DT)^w \quad (2.3)$$

en la que U_c es el coeficiente global de transferencia de calor y en el se incluyen todos los coeficientes individuales que afectan dicha transferencia en un momento dado. Este coeficiente se puede evaluar a partir de correlaciones específicas para el fluido usado, a partir de datos experimentales en sistemas a escala, a partir de evaporadores similares, o mediante el criterio y la experiencia.

2.7 Clasificación del equipo para vaporización .-Existen 2 tipos principales de equipos vaporizadores tubulares en la industria: las calderas y los intercambiadores vaporizadores.

Las calderas son dispositivos tubulares calentados a fuego directo, cuya función es convertir la energía química del combustible en calor latente de vaporización.

Los intercambiadores vaporizadores por el contrario, no están en contacto directo con fuego, y su función es convertir el calor latente o sensible de un fluido en calor latente de

vaporización de otro fluido. Si un intercambiador vaporizador es usado para evaporar agua o una solución acuosa, se le llama comúnmente evaporador. Si se usa para suministrar el requerimiento de calor en la parte inferior de una torre de destilación, aunque el fluido evaporado no sea agua, se le llama rehedidor. Cuando no se usa para la formación de vapor de agua, y no es parte de un proceso de destilación, al intercambiador vaporizador se le llama simplemente vaporizador.

Cuando un evaporador es usado para suministrar agua pura a un sistema generador de potencia, o a cualquier proceso asociado a la generación de potencia, se le llama evaporador de planta de potencia. Cuando un evaporador es usado para concentrar una solución química acuosa mediante la evaporación del agua que actúa como solvente, se le llama evaporador químico. El fluido de calentamiento más usado en este tipo de evaporadores es el vapor de agua saturado.

El enfoque de este estudio está dirigido hacia los evaporadores químicos.

2.8 Clasificación y descripción de los evaporadores químicos..-Los evaporadores químicos se pueden clasificar en 2 grupos: los evaporadores de convección natural, los cuales son usados para concentrar soluciones simples; y los evaporadores de convección forzada, los cuales se usan para concentrar soluciones viscosas o que puedan producir un alto porcentaje de incrustaciones.

2.8.1 Evaporadores de convección natural..-Entre los evaporadores de convección natural encontramos 5 clases diferentes:

- 1.-Evaporadores de tubos horizontales.
- 2.-Evaporadores de tubos verticales tipo calandria.
- 3.-Evaporadores de tubos verticales tipo canasta.
- 4.-Evaporadores de tubos verticales largos.
- 5.-Evaporadores de película.

2.B.1.1 Evaporadores de tubos horizontales .-Este tipo de evaporadores se muestra en la figura 2.5. Aunque estos evaporadores constituyen el tipo mas antiguo de evaporadores quiticos y sus usos fueron en un tiempo muy diversos, en la actualidad sus aplicaciones se han limitado, siendo substituidos en la mayoría de los casos por otros tipos de evaporadores.

Estos evaporadores se caracterizan por tener una coraza de sección transversal circular o cuadrada, y un haz de tubos horizontal, siendo este el único tipo de evaporadores en el que el vapor de calentamiento circula dentro de los tubos.

Su uso en la actualidad es limitado ya que al tener un haz de tubos horizontal es fácil que se depositen grandes cantidades de sedimentos salinos o incrustaciones, reduciendo en gran manera su eficiencia. Por esta razón estos evaporadores se usan solamente en problemas relativamente simples de concentración de soluciones.

2.B.1.2 Evaporadores de tubos verticales tipo calandria .-El evaporador tipo calandria se muestra en la figura 2.6. Este tipo de evaporadores se caracterizan por tener un haz de tu-

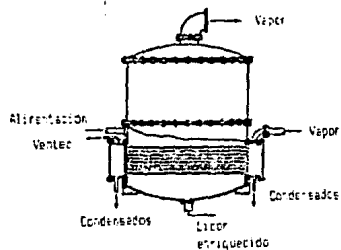


Figura 2.5.-Evaporador de tubos horizontales.

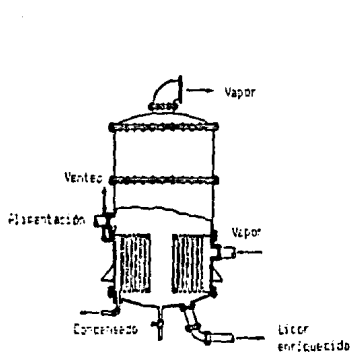


Figura 2.6.-Evaporador tipo "Calandria".

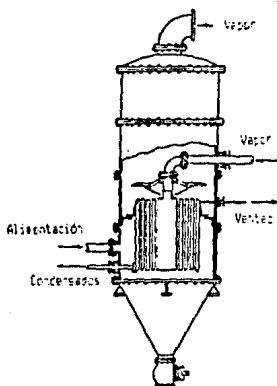


Figura 2.7.-Evaporador tipo "Cajeta".

bos vertical, fluyendo el vapor de calentamiento por fuera de los tubos en la llamada *chaqueta de vapor*.

Los evaporadores de tipo calandria son tan comunes y su uso tan extenso en la actualidad, que se les ha llegado a considerar como los evaporadores típicos.

Debido al bajo incrustamiento que sufren los tubos verticales del evaporador, estos evaporadores se usan cuando se trabaja con soluciones altamente incrustantes.

2.8.1.3 Evaporadores de tubos verticales tipo canasta..-Un evaporador de tipo canasta se muestra en la figura 2.7. Estos evaporadores son similares a los de tipo calandria, solo que tienen un haz de tubos movable, lo cual es una ventaja para limpiarlo durante su mantenimiento.

2.8.1.4 Evaporadores de tubos verticales largos..-Dos ejemplos de estos evaporadores se muestran en las figuras 2.8 y 2.9. Este tipo de evaporadores consiste en un largo elemento de calentamiento tubular, diseñado para que el licor fluya a través de los tubos solo una vez (figura 2.8), o varias veces (figura 2.9) mediante convección natural.

Estos evaporadores son muy usados para el manejo de soluciones espumosas, teniendo por el contrario un uso restringido al manejar soluciones altamente incrustantes.

2.8.1.5 Evaporadores de película..-Estos evaporadores son una variación de los evaporadores de tubos verticales largos (figura 2.10), siendo su característica principal el que el líquido sea alimentado en la parte superior de los tubos y

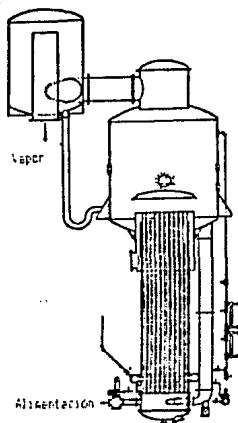


Figura 2.6.-Evaporador de tubos verticales largos.

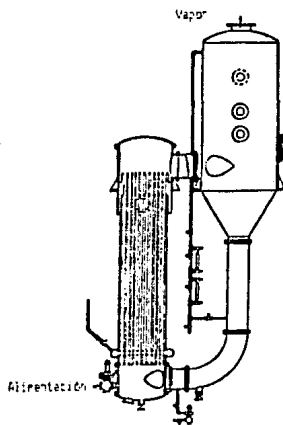


Figura 2.8.-Evaporador de tubos verticales largos con recirculación.

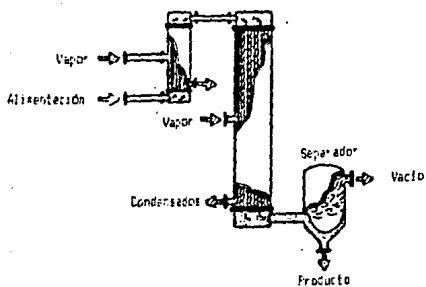


Figura 2.10.-Evaporador de película.

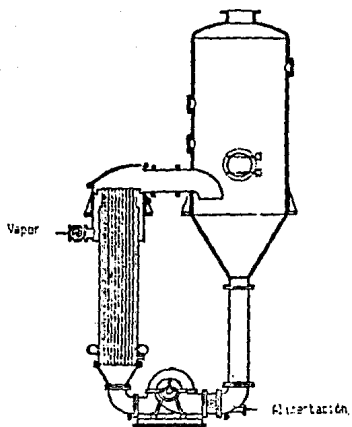


Figura 2.12.-Evaporador de convección forzada.

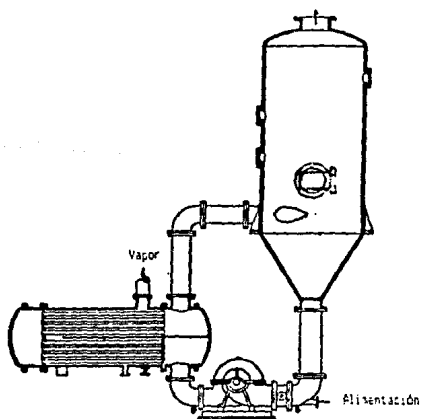


Figura 2.11.-Evaporador de convección forzada.

fluya a través de las paredes en forma de una película. La separación del líquido y del vapor se efectúa generalmente en la parte inferior del evaporador, teniendo el fluido una baja caída de presión en su recorrido a través de los tubos.

Estos evaporadores son muy usados para concentrar materiales sensitivos al calor como los jugos de frutas, ya que el tiempo de retención del líquido en el evaporador es muy bajo.

2.8.2 Evaporadores de convección forzada .-Dos tipos de evaporadores de convección forzada se muestran en las figuras 2.11 y 2.12. La operación de los evaporadores de circulación forzada es menos económica que la operación de los evaporadores de convección natural, pero estos evaporadores son necesarios cuando los problemas de concentración involucran soluciones altamente viscosas, altamente incrustantes o de alta sensibilidad térmica.

2.8.3 Selección del evaporador óptimo .-El proceso de selección del equipo óptimo para un proceso de evaporación determinado depende en gran medida de las propiedades físicas y químicas de la solución que se va a concentrar. Dentro de estas propiedades las que tienen una mayor influencia en la selección son las siguientes:

- a) Rango de viscosidad de la solución.
- b) Resistencia térmica de la solución.
- c) Grado de incrustación que genera la solución en los equipos.

Características de la solución alimentada

Tipo de Evaporadores	Viscosidad Alta (mayor a 20000 cps)	Viscosidad Media (1000-10000 cps)	Viscosidad Baja (menor a 1000 cps)	Espumosas	Incrustantes	Cristalizables	Sólidos en Suspensión	Sensitivas al Calor
Evaporadores de tubos horizontales	NA	M	A	A	NA	NA	NA	NA
Evaporadores de tipo calandria y canasta	NA	A	A	A	A	A	A	NA
Evaporadores de tubos verticales largos	NA	M	A	A	NA	NA	M	A
Evaporadores de película	NA	M	A	A	NA	NA	M	A
Evaporadores de convección forzada	M	A	A	A	A	A	M	A

A = Aplicables en todos los casos.

M = Aplicables solo en algunos casos.

NA = No aplicables.

Tabla 3.1.-Selección del evaporador óptimo.
(Estudio de Parker).

Además de estos factores existen otros de orden económico que se deben considerar al seleccionar el evaporador óptimo, tales como los costos de inversión y operación de cada uno de los equipos.

Para simplificar el proceso de selección de evaporadores, se han realizado estudios como los de Parker¹¹ (tabla 3.1), en los que se indican las características de los principales tipos de evaporadores y la clase de soluciones que cada uno puede manejar.

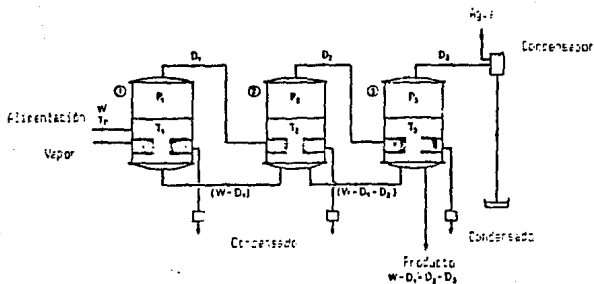
2.9 Operación de los evaporadores químicos. (Evaporación a simple efecto y evaporación a múltiple efecto)..-Cuando una operación de evaporación es efectuada mediante un solo evaporador se dice que es una evaporación a simple efecto. Sin embargo, en la gran mayoría de las operaciones de evaporación el costo mas importante del proceso es el de energía, y un método que tiende a reducir este consumo es la operación a múltiple efecto.

Un sistema de múltiple efecto consiste en una serie de evaporadores sencillos llamados cuerpos o efectos, conectados de modo que el vapor procedente de un evaporador sirva como medio de calentamiento para el efecto contiguo (figura 2.12). Mediante un condensador y un eyector se establece un vacío en el último efecto de la serie y se retiran los no condensables del sistema. El primer efecto de un evaporador de múltiple efecto siempre será aquel que recibe el vapor vivo y en él la presión del espacio-vapor adquiere su valor mas elevado. El último efecto es el que tiene la menor presión en el espa-

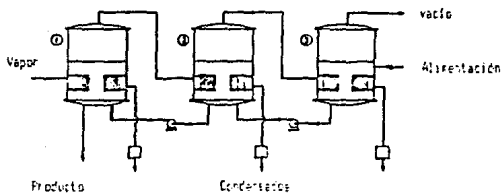
cio-vapor. La presión en cada efecto es menor que en el efecto del cual recibe vapor, y superior a la del efecto al que suministra vapor. Al actuar cada efecto como un evaporador simple, la caída de temperatura a través de su superficie de calentamiento, se debe a la caída de presión en dicho efecto.

En la operación a régimen permanente, las velocidades de flujo y las velocidades de evaporación son tales que en ninguno de los efectos hay acumulación o agotamiento de soluto o disolvente.

Una vez que se fijan la temperatura, la concentración, la velocidad de flujo de alimentación, las presiones de vapor a la entrada, la presión en el condensador y se mantienen los niveles de las soluciones en los distintos efectos; todas las concentraciones, velocidades de flujo, presiones y temperaturas en los efectos permanecen constantes durante la operación. La composición de la solución concentrada solamente se puede modificar variando la velocidad de flujo de la alimentación, alcanzando la concentración final de la solución un nuevo valor después de haber transcurrido un cierto tiempo. El paso de efecto simple a efecto múltiple no afecta las características básicas de la construcción del evaporador, sino solamente su operación y las tuberías de interconexión. Cada efecto actúa en sí como un evaporador de efecto simple, por consiguiente, todo lo referente a un evaporador de simple efecto es aplicable a cada una de las unidades de un evaporador de múltiple efecto.



alFlujo en paralelo.



Flujo en contracorriente.

Figura 2.13.-Sistema de evaporadores de tres efectos con flujo en paralelo y en contracorriente.

2.9.1 Tipos de flujo en los sistemas de evaporadores de múltiple efecto (Flujo en paralelo y flujo en contracorriente). -En un sistema de evaporadores de múltiple efecto existen 2 formas principales en las que se puede alimentar el vapor vivo y la solución al sistema. Cuando tanto el vapor vivo como la solución se alimentan al primer evaporador, se dice que el sistema de evaporadores tiene flujos en paralelo, ya que las 2 corrientes fluyen en la misma dirección (figura 2.13a). Por el contrario cuando el vapor vivo se alimenta en el primer evaporador y la solución en el último evaporador, alimentándose en efectos opuestos, se dice que el sistema de evaporadores tiene flujos en contracorriente, ya que las corrientes fluyen en direcciones contrarias (figura 2.13b).

2.9.2 Ventajas y desventajas del flujo en paralelo. -Al usar flujo en paralelo en un sistema de evaporadores, si la solución alimentada está a una temperatura mayor que la temperatura de saturación del primer efecto, parte de la solución se evaporará en forma instantánea (evaporación tipo flash). Debido a que normalmente se mantiene un vacío en el último efecto, la solución concentrada fluirá por la misma reducción de presión de un efecto a otro, requiriéndose solamente una bomba para remover el líquido en el último efecto. De manera similar, debido a que la temperatura de saturación de la solución en cada efecto es menor que la temperatura en el efecto precedente, existe una vaporización instantánea de la solución al llegar al efecto, lo cual origina un ahorro en el consumo total de vapor.

El coeficiente global de transferencia de calor en un eva-

porador esta en relación directa con la temperatura de ebullición de la solución, y en relación inversa con la concentración y viscosidad de la solución. Por esta razón cuando un sistema de evaporadores opera con flujo en paralelo, el último efecto tiene el coeficiente de transferencia de calor mas bajo, ya que la solución es la mas concentrada y al mismo tiempo la mas fría.

2.9.3 Ventajas y desventajas del flujo en contracorriente .- Este tipo de flujo tiene la ventaja de no tener la solución mas concentrada en el efecto mas frío, ya que la solución diluida entra al ultimo efecto que es el mas frío, y sale concentrada en el primer efecto, que es el mas caliente. En este tipo de flujo la solución debe ser calentada al llegar a cada efecto, ya que procede de un efecto que se encuentra a menor temperatura. De manera similar, la solución debe ser bombeada de un efecto a otro, debido a que la presión aumenta en la misma dirección del flujo de la solución. Este bombeo origina incrementos en los gastos de operación y mantenimiento en el sistema de evaporadores. Por otra parte, el arreglo de temperaturas que existe en este tipo de flujo tiene ventajas sobre el arreglo que tiene el flujo en paralelo, ya que se presenta una relación de temperaturas de flujos en contracorriente, originando un gran ahorro en el consumo de vapor vivo.

2.9.4 Elección del tipo de flujo óptimo .- El problema de la elección de tipo de flujo para un sistema de evaporadores de

múltiple efecto no es un problema de transferencia de calor, sino un problema de economía.

El gasto de vapor vivo es menor en un flujo en contracorriente si la alimentación está fría, y es menor en un flujo en paralelo si la temperatura de de la alimentación es igual o mayor a la temperatura del primer efecto.

El tipo de flujo que requiere la menor área de transferencia de calor depende del grado de concentración y viscosidad que tenga la concentración final.

Por tales motivos, un estudio económico de ambas opciones para un problema dado nos dará la mejor alternativa de flujo.

2.10 Procesos a régimen no permanente .-Cuando en un proceso todas las condiciones de operación son constantes, y no existe acumulación de masa y energía, se dice que el proceso opera a *régimen permanente*, buscándose en la mayoría de los procesos industriales la operación bajo dicho régimen.

Los mismos procesos que operan a régimen permanente pueden encontrarse en un momento dado con acumulación de masa y energía, o con las condiciones de operación variando con respecto al tiempo. A este último estado de los procesos se le llama *régimen no permanente*, presentándose en el arranque del proceso, en el cambio o alteración de alguna de las condiciones del proceso, o bien en el paro del proceso. Como todas estas actividades son indispensables en la operación de los procesos industriales, el estudio de los procesos a régimen no permanente ha adquirido una gran importancia en la actualidad.

2.11 Análisis y optimización de los evaporadores de múltiple efecto .-Al diseñar un sistema de evaporadores de múltiple efecto se busca obtener un arreglo que tenga el menor "Costo Total" posible. Dentro de el "Costo Total" se incluye el costo de fabricación e instalación del equipo, así como el costo de operación del mismo.

Para la optimización del costo del equipo se han elaborado algunos estudios en los que se demuestra que generalmente el mejor diseño es aquel en el que todos los evaporadores tienen la misma area de transferencia de calor. Los mismos estudios nos dicen por otro lado que el número de efectos óptimo es aquel en el que se logra que el costo de fabricación e instalación del equipo sea similar al costo de operación del mismo.

2.12 Aplicaciones de los evaporadores químicos en la industria .-Los evaporadores químicos se usan en todos los procesos industriales en los que se requiere concentrar una solución acuosa de cualquier tipo. Algunos ejemplos de procesos industriales que usan este tipo de evaporadores son la potabilización de agua marina, la obtención de hidróxido de sodio cristalino, la obtención de azúcar de caña, así como también la concentración de jugos, leches, productos químicos especializados y productos farmacéuticos.

"King J.C., "Separation Processes", 2nd Ed., Mc. Graw Hill, 1980, Apéndice B pp.785-790.

CAPITULO III

Descripción del Modelo Matemático

3.1 Introducción .-En este capítulo se presenta el modelo matemático usado en el simulador, así como los métodos numéricos que resuelven dicho modelo.

3.2 Comportamiento dinámico de un evaporador de simple efecto .-El tratamiento matemático de un sistema de evaporadores de múltiple efecto operando a régimen no permanente se inicia con la formulación de un modelo dinámico para un evaporador de simple efecto. El modelo que se obtenga se puede generalizar después para sistemas de evaporadores de múltiple efecto.

El modelo matemático se formula en base a las siguientes suposiciones:

- 1.-La masa de líquido en el evaporador está perfectamente mezclada.
- 2.-La masa de solvente que se encuentra en el espacio de vapor es despreciable comparada con la masa del líquido en el evaporador.
- 3.-La acumulación de energía en las paredes de los tubos del evaporador es despreciable.
- 4.-Las pérdidas de calor hacia los alrededores del evaporador son despreciables.

Para desarrollar el modelo matemático se va a usar el evaporador de la figura 3.1.

Para efectuar cualquier tipo de balance, ya sea de masa o de energía, usamos la ecuación general de balances sin reacción química, que nos dice:

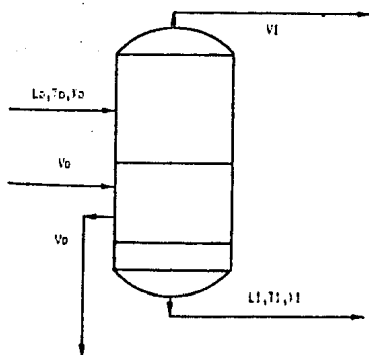


Figura 3.1.-Evaporador base para el modelo estatico.

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Acumulacion.} \quad (3.1)$$

Basandonos en la ecuación 3.1 podemos efectuar los balances totales de energía y masa, y el balance de masa por componentes para el evaporador de la figura 3.1

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Acumulación}$$

Balance total de energía.

$$(L_0 h(T_0, X_0) + V_0 X_0) - (V_1 H(T_1) + L_1 h(T_1, X_1)) = \left(\frac{d(M h(T_1 - X_1))}{dt} \right) \quad (3.2)$$

Balance total de masa.

$$(L_0) - (V_1 + L_1) = \left(\frac{dM}{dt} \right) \quad (3.3)$$

Balance de masa por componentes.

$$(L_0 X_0) - (L_1 X_1) = \left(\frac{d(M X_1)}{dt} \right) \quad (3.4)$$

eliminando los paréntesis en las ecuaciones tenemos:

$$L_0 h(T_0, X_0) + V_0 X_0 - V_1 H(T_1) - L_1 h(T_1, X_1) = \frac{d(M h(T_1 - X_1))}{dt} \quad (3.5)$$

$$L_0 - V_1 - L_1 = \frac{dM}{dt} \quad (3.6)$$

$$L_0 X_0 - L_1 X_1 = \frac{d(M X_1)}{dt} \quad (3.7)$$

Si en las ecuaciones anteriores hacemos el término de acumulación igual a cero obtenemos las ecuaciones que nos describen el régimen permanente.

Además de estas ecuaciones debemos incluir a la ecuación de velocidad de transferencia de calor (ecuación 2.2).

$$Q=U A(DT)w \quad (2.1)$$

como: $Q=V_o \lambda_o$ $(DT)w=(T1-t_o)$

nos queda: $V_o \lambda_o=U A(T1-t_o)$

$$U A(T1-t_o)-V_o \lambda_o=0 \quad (3.8)$$

por último incluimos a la ecuación de equilibrio másico (regla de Duhring, ecuación 2.1):

$$T1=a(X1)t1+b(X1) \quad (2.1)$$

reordenando

$$a(X1)t1+b(X1)-T1=0 \quad (3.9)$$

3.3 Modelo dinámico para un evaporador de simple efecto .-El modelo matemático que nos representa a un evaporador de simple efecto está dado por las siguientes ecuaciones:

Balance total de energía.

$$L_0 h(T_0, T_0) + V_0 L_0 - V_1 H(T_1) - L_1 h(T_1 - X_1) = \frac{d(M h(T) - X)}{dt} \quad (3.5)$$

Balance total de masa.

$$L_0 - V_1 - L_1 = \frac{dM}{dt} \quad (3.6)$$

Balance de masa por componentes.

$$L_0 Y_0 - L_1 X_1 = \frac{d(M X)}{dt} \quad (3.7)$$

Velocidad de transferencia de calor.

$$U A (T_1 - t_0) - V_0 Y_0 = 0 \quad (3.8)$$

Equilibrio másico (regla de Duhring).

$$a(X_1)(1) + b(X_1) - T_1 = 0 \quad (3.9)$$

3.4 Métodos numéricos para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales. -La solución de un sistema de ecuaciones diferenciales como el que se plantea en la sección anterior se obtiene fácilmente con la ayuda de algunos métodos numéricos.

Para resolver ecuaciones diferenciales existen 3 tipos distintos de métodos numéricos: los explícitos, los implícitos y los semi-implícitos.

Los métodos numéricos explícitos son aquellos en los que

la solución de la ecuación se obtiene mediante la información sobre la curva en un solo punto de la misma, y no se requiere iterar la solución. Como ejemplos de estos métodos están los de Euler y los de Runge-Kutta.

Los métodos implícitos son aquellos en los que los puntos subsecuentes de la curva se obtienen mediante un proceso de iteración. La gran ventaja de los métodos explícitos sobre los implícitos consiste en los primeros se puede tener un mejor control sobre el error que existe al resolver las ecuaciones diferenciales. Como ejemplo de un método implícito tenemos a la regla trapezoidal y el método de los 2 puntos.

Los métodos semi-implícitos son una combinación de los 2 primeros tipos de métodos siendo unos métodos mas fáciles de aplicar que los implícitos, y con una precisión mayor que los explícitos. Como ejemplo de este tipo de métodos tenemos los métodos semi-implícitos de Runge-Kutta y los de Michel-sen.

3.4.1 Errores por truncamiento .- Al resolver ecuaciones diferenciales mediante el uso de métodos numéricos la solución que se obtiene no es exacta, sino que tiene un cierto grado de precisión dependiendo del método numérico usado y de la forma en que se aplica el método.

A esta inexactitud que tienen los métodos numéricos se le llama error por truncamiento. El error por truncamiento T_{n+1} se expresa mediante la fórmula:

$$T_{n+1} = y(t_{n+1}) - \gamma_{n+1} \quad (3.10)$$

en donde $y(t_{n+1})$ es el valor correcto de y en el tiempo t_{n+1} .

3.4.2 Método implícito de los dos puntos. -El método implícito de los dos puntos fue el que se seleccionó para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales de la sección 3.2, ya que es de fácil aplicación, y proporciona resultados de una precisión aceptable para los fines de este estudio. Este método contiene un parámetro ajustable que incluso lo puede transformar en un método explícito (en el caso de que el valor del parámetro sea igual a cero).

Este método se puede aplicar a cualquier ecuación diferencial del tipo de la ecuación 3.11.

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (3.11)$$

Este método consiste en aproximar la integral de la ecuación 3.11 mediante el uso de valores ponderados del integrando en x_n y x_{n+1} mediante la ecuación 3.12

$$[f(x_{n+1}, y_{n+1}) + (1-\theta) f(x_n, y_n)] h = y_{n+1} - y_n \quad (3.12)$$

en donde θ es el parámetro ajustable y su valor se encuentra en el rango $0 \leq \theta \leq 1$. El error por truncamiento de este método está dado por la siguiente ecuación:

$$T_{n+1} = \frac{h^2}{2} (1-2\theta) y^{(2)}(x_n) + \frac{h^3}{6} (1-3\theta) y^{(3)}(x_n) + O(h^4) \quad (3.13)$$

en donde n es el incremento en el valor de la variable independiente y $O(h^n)$ es un término cuyo valor es del orden de h^n .

3.4.3 Solución del modelo dinámico para evaporadores de efecto simple mediante el método implícito de los dos puntos.-Si resolvemos la ecuación del balance total de masa (ecuación 3.6), mediante el método implícito de los dos puntos (ecuación 3.12) nos queda la siguiente ecuación:

$$[L_0 - V_1 - L_1] + (1 - \theta) [L_0 - V_1 - L_1]^{n+1} = \frac{M}{\Delta T} - \frac{[M]^{n+1}}{\Delta T} \quad (3.14)$$

en donde $[]^{n+1}$ indica que todas las variables dentro de los corchetes son evaluadas al principio del intervalo de tiempo considerado.

Si hacemos $\frac{1 - \theta}{\theta} = \alpha$ obtenemos:

$$L_0 - V_1 - L_1 + \alpha [L_0 - V_1 - L_1]^{n+1} = \frac{M}{\Delta T} - \frac{[M]^{n+1}}{\Delta T}$$

Si despejamos e igualamos a cero obtenemos:

$$L_0 - V_1 - L_1 - \frac{M}{\Delta T} + \alpha [L_0 - V_1 - L_1]^{n+1} - \frac{[M]^{n+1}}{\Delta T} = 0$$

Repetiendo este procedimiento con las demás ecuaciones del modelo matemático (ecuaciones 3.5-3.9) obtenemos las siguientes ecuaciones:

Balance de entalpía:

$$\begin{aligned} f1 = & L_0 h(T_0, x_0) + V_0 Z_0 - V_1 H(T_1) - L_1 h(T_1, x_1) - \frac{M h(T_1, x_1)}{\theta \frac{dT}{dt}} \\ & + \theta [L_0 h(T_0, x_1) + V_0 Z_0 - V_1 H(T_1) - L_1 h(T_1, x_1)] - \frac{M^0 h(T_1^0, x_1^0)}{\theta \frac{dT}{dt}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Balance total de masa:

$$f2 = L_0 - V_1 - L_1 - \frac{M}{\theta \frac{dT}{dt}} + \theta [L_0 - V_1 - L_1] - \frac{M^0}{\theta \frac{dT}{dt}} \quad (3.16)$$

Balance de masa por componentes:

$$f3 = L_0 x_0 - L_1 x_1 - \frac{M x_1}{\theta \frac{dT}{dt}} + \theta [L_0 x_0 - L_1 x_1] - \frac{M^0 x_1^0}{\theta \frac{dT}{dt}} \quad (3.17)$$

Velocidad de transferencia de calor:

$$f4 = U A (T_1 - t_0) - V_0 Z_0 \quad (3.18)$$

Equilibrio másico:

$$f5 = a(x_1) t + b(x_1) - T_1 \quad (3.19)$$

De esta manera obtenemos un sistema de ecuaciones no lineales. Debido a que se tienen 5 ecuaciones independientes, debemos fijar todas las variables existentes con excepción de 5 en el punto t_{n+1} . Esto se hace suponiendo que todas las variables en el inicio del intervalo considerado son conocidas.

3.4.4 Características de estabilidad del método implícito de los dos puntos.- A partir de un análisis de estabilidad

practicado en varios ejemplos de evaporadores (figuras 3.2 y 3.3) se encontró que el valor del parámetro ajustable que le da la mayor estabilidad al método numérico es "0.6". Por tal motivo el valor $\alpha = 0.6$ se va a usar como parámetro de ajuste durante el diseño y operación del simulador.

3.5 Solución de sistemas de ecuaciones no lineales (Método de Newton-Raphson) .-El método numérico de Newton-Raphson es un procedimiento iterativo que nos permite obtener soluciones de sistemas de ecuaciones no lineales con un alto grado de aproximación, dependiendo la precisión, del número de iteraciones realizadas y de la exactitud en las operaciones aritméticas.

El método consiste en proporcionar valores iniciales de las incógnitas, los cuales van a ser modificados en cada iteración, hasta obtener el grado de precisión deseado en las soluciones del sistema.

La fórmula básica del método de Newton-Raphson es la siguiente:

$$\sum_{j=1}^n \frac{\partial f_j}{\partial x_i} \Delta x_i = -f_j \quad (3.20)$$

en donde Δx es el vector de los incrementos de las variables,

$$\Delta x = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n]^T$$

f es el vector de las funciones,

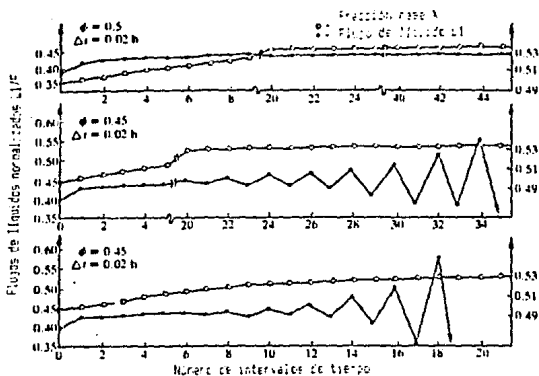


Figura 3.2.-Gráficas de estabilidad para β_0 igual o menor a 1/2.

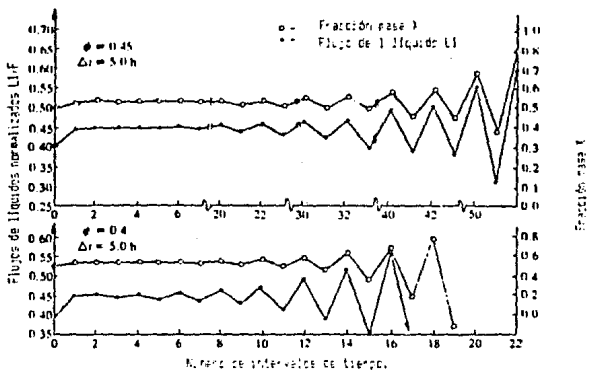


Figura 3.3.-Gráficas de estabilidad para β_0 menor a 1/2.

$$\bar{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$$

y J_n es el Jacobiano o matriz de derivadas.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{d f_1}{d x_1} & \frac{d f_1}{d x_2} & \dots & \frac{d f_1}{d x_n} \\ \frac{d f_2}{d x_1} & \frac{d f_2}{d x_2} & \dots & \frac{d f_2}{d x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d f_n}{d x_1} & \frac{d f_n}{d x_2} & \dots & \frac{d f_n}{d x_n} \end{bmatrix}$$

Despejando el vector Dx de la ecuación 3.20 nos queda,

$$\bar{Dx} = J^{-1} \bar{f} \quad (3.21)$$

en donde J^{-1} es la matriz inversa del Jacobiano.

En cada iteración se deben evaluar tanto el vector de funciones como el Jacobiano, para así obtener el vector de incrementos de las variables. El procedimiento se repite varias veces hasta que el valor de todas las funciones sea menor al error escogido como tolerable.

3.6 Derivación numérica de funciones .-La derivación analí-

tica de las funciones puede ser en muchos casos bastante complicada. En estos casos se opta por la derivación numérica con tamaño de paso implícito, expresada por la siguiente fórmula:

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{x(h-1)} \quad (3.22)$$

en donde h tiende a ser igual a uno ($0.999...9 < h < 1.000...1$). Aunque este valor debe ser cercano a uno, se debe tener cuidado de que no aproximarlo demasiado a dicha cantidad ya que esto originaría muchos errores de redondeo en los cálculos. En el caso particular de este estudio, ninguna de las variables que se manejan puede ser igual a cero, por lo que este problema no se llega a presentar.

3.7 Procedimientos de escalamiento .-El propósito del escalamiento es el reducir los elementos de la matriz del Jacobiano a un mismo orden de magnitud. También se desea que las funciones tengan el mismo orden de magnitud para que la norma eucladiana de las mismas represente una medida de que tan bien se satisfacen todas las funciones mediante los valores asumidos de las variables. Una forma de lograr esto es mediante el "método de escalamiento de variables y de renglones".

Escalamiento de variables y renglones .-Considerese el caso general en el cual las funciones independientes f_1, f_2, \dots, f_n con n variables independientes x_1, x_2, \dots, x_n se van a resol-

ver mediante el método de Newton-Raphson. Para usar dicho método nos basamos en la ecuación 3.20.

$$\bar{J} \bar{D}x = -\bar{f} \quad (3.20)$$

Para lograr el escalamiento de variables se debe formar la matriz R_n . R_n es una matriz diagonal de $n \times n$ cuyos elementos diagonales r_{ii} , son iguales o un poco mayores al valor absoluto del correspondiente elemento de x , esto es:

$$r_{11} \geq |x_1|, r_{22} \geq |x_2|, \dots, r_{nn} \geq |x_n|$$

Las operaciones requeridas para escalar Dx se pueden representar mediante la multiplicación matricial $r^{-1}Dx$, por lo que la ecuación 3.20 se puede representar de la siguiente forma:

$$\bar{J} \bar{R} \bar{R}^{-1} \bar{D}x = -\bar{f} \quad (3.23)$$

reordenando

$$\bar{D} \bar{D}y = -\bar{f} \quad (3.24)$$

en donde

$$\bar{D}y = \bar{R}^{-1} \bar{D}x \quad (3.25)$$

$$\bar{D} = \bar{J} \bar{R} \quad (3.26)$$

Después de estas operaciones matriciales se realiza el escalamiento de renglones por medio de la matriz M . La matriz M es una matriz diagonal de $n \times n$, en la cual sus elementos m_{ii} se seleccionan de tal forma que para cada renglón

$$m_{ii} = \text{máximo } |d_{ij}| \text{ sobre todos los elementos del renglón } i.$$

Premultiplicando cada lado de la ecuación 3.24 por M^{-1} obtenemos:

$$M^{-1} D DY = - (M^{-1} f) \quad (3.27)$$

reordenado

$$E DY = -F \quad (3.28)$$

en donde

$$E = M^{-1} D \quad (3.29)$$

$$F = M^{-1} f \quad (3.30)$$

En esta forma obtenemos el vector escalado F con el cual se puede verificar fácilmente si ya se llegó al error tolerable, o si se deben realizar más iteraciones.

Este procedimiento de escalamiento se debe efectuar en todas las iteraciones que se realicen.

3.8 Modelo dinámico para sistemas de evaporadores de múltiple efecto. -El desarrollo del modelo dinámico para un sistema de evaporadores de múltiple efecto tanto en flujo paralelo (figura 3.4), como en flujo en contracorriente (figura 3.5), es análogo al de un evaporador de simple efecto.

Las ecuaciones para un sistema en paralelo o en contracorriente son:

Balance de entalpía.

$$f_1 = f_1 L_{n-1} h(T_{n-1}, x_n) + V_{n-1} [H(T_p) - h(T_{n-1})] - V_n h(T_n) + k_2 L_n h(T_{n1}, x_n) - \frac{M_n h(T_{n+1}, x_{n+1})}{\theta \Delta T} \quad (3.31)$$

$$\theta [k_1 L_{n-1} h(T_{n-1}, x_n) + V_{n-1} [H(T_p) - h(T_{n-1})] - V_n h(T_n) + k_2 L_n h(T_{n1}, x_n)] = \frac{M_n \theta h(T_{n+1}, x_{n+1})}{\lambda \Delta T}$$

Balance total de masa.

$$f_2 = f_1 L_{n-1} - V_n + k_2 L_n - \frac{M_n}{\theta \Delta T} + \theta [k_1 L_{n-1} - V_n + k_2 L_n] = \frac{M_n \theta}{\lambda \Delta T} \quad (3.32)$$

Balance de masa por componentes.

$$f_3 = f_1 L_{n-1} x_{n-1} + k_2 L_n x_n - \frac{M_n x_{n+1}}{\theta \Delta T} + \theta [k_1 L_{n-1} x_{n-1} + k_2 L_n x_n] = \frac{M_n \theta x_{n+1}}{\lambda \Delta T} \quad (3.33)$$

Velocidad de transferencia de calor.

$$f_4 = U_1 A_1 (T_n - T_{n-1}) - V_{n-1} [H(T_p) - h(T_{n-1})] \quad (3.34)$$

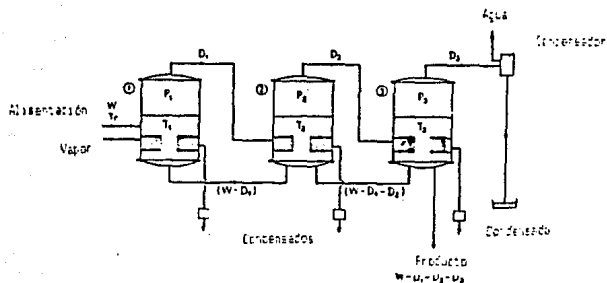


Figura 3.4.-Sistema de evaporadores de tres efectos con flujo en paralelo.

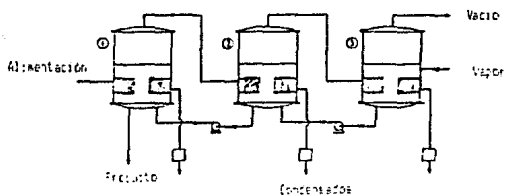


Figura 3.5.-Sistema de evaporadores de tres efectos con flujo en contracorriente.

Equilibrio másico.

$$f_0 = (x_{n+1} - f_n) / (x_{n+1} - T_n) \quad (3.35)$$

Cuando $n = 1$, $T_p = T_1$

Cuando $n > 1$, $T_p = T_{n-1} + k_3$

para flujo en paralelo:

$$k_1 = 1 \quad k_2 = -1 \quad k_3 = 1$$

para flujo en contracorriente:

$$k_1 = -1 \quad k_2 = 1 \quad k_3 = 0$$

El número de ecuaciones y de incógnitas para un sistema de "n" efectos es igual a $5 \times n$. El procedimiento matemático para resolver el sistema de ecuaciones para evaporadores de múltiple efecto, es similar al procedimiento seguido con los evaporadores de efecto simple.

3.9 Descripción del algoritmo usado en el simulador.-Para poder usar el modelo matemático en un sistema de evaporadores operando en un régimen no permanente, se deben proporcionar las condiciones de operación del sistema en régimen permanente (punto de inicio). El mismo modelo matemático usado para representar el régimen no permanente se puede usar para el régimen permanente si hacemos la variable de ajuste igual a cero ($Q = 0$), y el incremento de tiempo lo

hacemos muy grande ($DT = 10^{30}$).

Basandonos en esto podemos elaborar el algoritmo que nos ayude a solucionar el modelo matemático desarrollado anteriormente.

El algoritmo propuesto es el siguiente:

- 1.-Proporcionar datos del sistema de evaporadores (número de efectos, valores de las 5 variables independientes del sistema, tipo de flujo, etc.)
- 2.-Proporcionar valores aproximados de todas las incógnitas para poder iniciar el procedimiento de cálculo.
- 3.-Resolver el sistema de ecuaciones no lineales mediante el método de Newton-Raphson usando escalamiento de variables y de renglones.
- 4.-Modificar los valores de una o mas de las 5 variables independientes.
- 5.-En base a las condiciones en régimen permanente y a los nuevos valores de las variables independientes, resolver el sistema de ecuaciones mediante el método de Newton-Raphson.
- 6.-Comparar las nuevas condiciones de operación con las previas, para verificar si se llegó de nuevo al régimen permanente. En el caso de que no se halla llegado al régimen permanente se debe regresar al punto 5.

CAPITULO IV

Descripción del Simulador

4.1 Introducción .-En este capítulo se describe la estructura del programa de computadora que realiza la simulación.

4.2 Características del programa .

Nombre del programa principal: SIMULADOR.

Objetivo del programa: Realizar una simulación dinámica de un sistema de evaporadores de múltiple efecto.

Computador usado: Hewlett Packard 1000 Modelo 19.

Lenguaje usado: Fortran 77 ANSI, mas extensiones de Hewlett Packard.

Número total de subrutinas: 29.

Número total de funciones: 12.

Número de archivos de datos: 1 (SIMULADOR.DAT).

Número de archivos de impresión: 1 (SIMULADOR.REP).

Número máximo de evaporadores o efectos: 20.

Fluido caliente usado: Vapor de agua saturado.

Fluido evaporado: El programa tiene los datos termodinámicos de las soluciones de hidróxido de sodio, de cloruro de sodio

y de azúcar de caña, pero el usuario puede usar cualquier otra solución proporcionándole a la computadora los datos termodinámicos de la misma.

Sistemas de unidades: Sistema Internacional o Sistema Inglés.

Tipo de flujo: En paralelo o en contracorriente.

4.3 Programa principal .-El programa de cómputo presenta una estructura modular ya que el algoritmo de la sección 3.9 se separó en varios módulos, programándose cada módulo como una subrutina. La columna vertebral de esta serie de módulos es el programa principal, cuya única función es la de llamar a las subrutinas siguiendo la secuencia propuesta en el algoritmo antes mencionado. La forma modular del programa hace que su estructura sea mas fácil de entender y también que se le puedan hacer modificaciones fácilmente (figura 4.1).

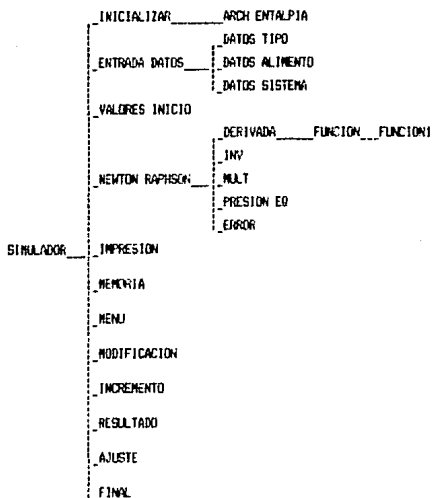


Figura 4.1.-Diagrama de las subrutinas del programa principal siguiendo el orden en el que son llamadas por el mismo.

4.4 Subrutinas .-A continuación se listan las subrutinas usadas en el programa (siguiendo el orden en que son llamadas por el programa principal).

Subrutina.

Objetivo.

1.-INICIALIZAR

*Imprimir el formato de inicio de programa.

*Pedir las características de la solución que se va a evaporar.

*Abrir el archivo de impresión de resultados en el papel.

*Subrutinas que llama:

a)ARCH_ENTALPIA

*Pedir los datos de entalpía de la solución usada.

2.-ENTRADA_DATOS

*Coordinar a las subrutinas de entrada de datos.

*Subrutinas que llama:

a)DATOS_TIPO

*Pedir los datos que definen al sistema.

b)DATOS_ALIMENTO

*Pedir los valores de las variables independientes.

c)DATOS_SISTEMA

*Pedir los datos mecánicos de cada evaporador.

3.-VALORES_INICIO

*Asignarle valores aproximados a todas las incógnitas (ver apéndice A).

- 4.-NEWTON_RAPHSON *Efectuar el método de Newton-Raphson para resolver el sistema simultáneo de ecuaciones no lineales que propone el modelo matemático.
- *Subrutinas que llama:
- a)DERIVADA *Evaluar el Jacobiano (ver apéndice B).
- b)FUNCION *Evaluar las funciones del modelo matemático.
- c)FUNCION1 *Evaluar las funciones del modelo matemático.
- d)INV *Invertir matrices (ver apéndice C).
- e)MULT *Multiplicar matrices.
- f)PRESION_ED *Evaluar las presiones de equilibrio del vapor de agua a partir de las temperaturas de saturación.
- g)ERROR *En caso de error imprimir un mensaje y regresar al inicio del programa.
- 5.-JMPRESION *Imprimir los valores de todas las condiciones de operación del sistema de evaporadores.
- 6.-MEMORIA *Guardar los valores de las condiciones de operación a un cierto tiempo para compararlos con los valores en intervalos de tiempo posteriores.

- 7.-MENU *Presentarle al usuario las opciones que tiene una vez calculado el sistema de evaporadores a régimen permanente.
- 8.-MODIFICACION *Pedir los cambios en las variables independientes del sistema para efectuar la simulación dinámica.
- 9.-INCREMENTO *Cambiar los valores originales de las variables independientes, por los valores proporcionados en la subrutina anterior.
- 10.-RESULTADO *Presentar las condiciones del sistema cuando ya se recuperó el régimen permanente.
- 11.-AJUSTE *Regresar los valores de las condiciones del sistema a su estado original después de haber realizado una simulación dinámica.
- 12.-FINAL *Cerrar el archivo de impresión en papel.
*Imprimir formato de final de programa.

4.5 Subrutinas Especiales .-Las siguientes subrutinas fueron usadas para fijar los formatos de impresión en pantalla y en papel:

- 1.-AASTERISCO *Imprimir un renglón de asteriscos en el archivo de impresión en papel.
- 2.-ASTERISCO *Imprimir un renglón de asteriscos en la pantalla.
- 3.-AESPACIO *Imprimir un renglón en blanco en el archivo de impresión en papel.
- 4.-ESPACIO *Imprimir un renglón en blanco en la pantalla.
- 5.-HOME *Limpiar la pantalla y colocar el cursor en el extremo superior izquierdo de la misma.
- 6.-PAUSA. *Suspender la ejecución del programa temporalmente.

4.6 Funciones .-Las siguientes funciones fueron usadas para evaluar las propiedades del vapor de agua y de las soluciones evaporadas (para consultar las fórmulas usadas ver los apéndices D y E).

Función.	Objetivo.
1.-CTB	*Calcular el valor de la constante B para la ecuación 3.32.
2.-CTM	*Calcular el valor de la constante M para la ecuación 3.32.
3.-HC	*Calcular la entalpía del vapor de agua condensado.
4.-HE	*Calcular la entalpía del vapor de agua saturado.
*Funciones usadas:	
a) BM	*Estas funciones son parte de las ecuaciones usadas para calcular la entalpía del vapor de agua en su punto de rocío (ver apéndice D).
b) NL	
c) NN	
d) NX	
e) NZ	
5.-HL	*Calcular la entalpía de la solución.
6.-PRESION	*Calcular la presión de equilibrio a la temperatura de saturación del vapor de agua.
7.-U1	*Proporcionar el valor del coeficiente

global de transferencia de calor.

4.7 Variables .-A continuación se listan las variables que existen en cada área común de memoria (las dimensiones de las matrices y de los vectores se indican entre paréntesis). .

Area común.	Dato que almacena.
1.-ARCHIVOS	
XM(21,5)	*Condiciones del sistema en el intervalo de tiempo anterior.
PREM(21)	*Presión en cada efecto en el intervalo de tiempo anterior.
XO(21,5)	*Condiciones del sistema a régimen permanente.
FRED(21)	*Presión en cada efecto cuando el sistema está a régimen permanente.
HORAS	*Tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación dinámica.
2.-DATAUXILIARES	
N	*Número de efectos del sistema.
NOP1	*Tipo de flujo del sistema.
NOP2	*Solución que se va a evaporar.
NOP3	*Sistema de unidades usado.
NOP4	*Número de la segunda variable independiente.
NO	*Número de las memorias en las que se

guardan las condiciones de la alimentación.

NO1 *Número de las memorias en las que se guardan las condiciones de la salida.

NO2 *Orden con el que se guardan las condiciones del sistema en la memoria.

NO3 *Número de la primer variable dependiente.

3.-DATOS SISTEMA

CMA(20) *Capacidad másica de cada evaporador.

U(20) *Coeficiente de transferencia de calor de cada evaporador.

A(20) *Area total de transferencia de calor de cada evaporador.

4.-ENTALPIAS

ENT(50,9) *Tabla de entalpías de la solución usada.

5.-FACTORES

E *Error tolerado al evaluar las funciones.

H *Factor para incrementar las funciones en la derivación numérica.

DT *Incremento en tiempo.

PHI *Constante Phi del método implícito de

los dos puntos.

SIGMA *Constante Sigma del método implícito de los dos puntos.

INC *Contador del número de intervalos en la simulación dinámica.

HINC *Incremento de las funciones en la derivación numérica.

1.-FUNCIONES

FUN(5,20),FUN(100)*Valores de las funciones que constituyen el sistema de ecuaciones no lineales.

2.-JACOBIANOS

JACOBIANO(100,100) *Jacobiano del sistema de ecuaciones no lineales.

3.-MEMORIAS

F1 *Memorias en las que se guarda el valor de cada función evaluada para pasarlo después a las matrices de memoria FA1 FA2.

FA1(3,20) *Matrices en las que se guardan los valores de las funciones evaluados al principio del intervalo de tiempo durante la simulación dinámica.

FA2(3,20)

4.-MENUS

MENU *Variable en la que se indica si se va

a calcular el sistema a régimen permanente, o si se va a calcular a régimen no permanente.

10.-MODIFICACIONES

MOD(5,7)

*Matriz en la que se guardan las modificaciones que se le van a hacer a las variables independientes durante la simulación dinámica.

MO

*Variable que nos indica el número de intervalos de tiempo en el que se le van a hacer modificaciones a las variables independientes.

11.-PAUSAS

OPT

*Variable alfanumérica en la que el usuario escoge la forma en la que va a continuar la ejecución del programa después de una pausa.

12.-PRESIONES

PRE(20)

*Presión en cada efecto.

13.-SOLUCIONES

ARCHIVO

*Nombre del archivo en el que el usuario va a escribir los datos termodinámicos de alguna nueva solución.

SOLUCION

*Nombre de la solución que se está usando.

14. -VARIABLES

X(21,5)	*Matrices o vectores en los que se
V(21)	guardan las condiciones de operación
T(21)	de cada uno de los efectos del sistema
L(21)	
TE(21)	
X(21)	

Nota: Debido a que en el modelo matemático las condiciones iniciales del sistema tienen subíndice 0, el cual no puede ser manejado por las matrices de la computadora, se recorrieron los subíndices de todos los efectos para que las condiciones iniciales tengan subíndice igual a 1.

4.8 Listados .-A continuación se presentan los listados del programa principal y de todas las subrutinas y funciones del simulador.


```

*****
BERRA /VENTA_P185
C
SUBROUTINE INICIAL12ZF
*****
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON /DATAUTILIARES/M,NOP1,NOP2,NOP3,NOP4,M0,M01,M02,M03
COMMON /DUHRING/CTEM,CTEB
COMMON /VENTA_P185/ENT1,50,92
COMMON /FACTORES/E,M,DT,PHE,SIGMA,INC,MHIC
COMMON /MENU/MENU
COMMON /PAUSAS/OPT
COMMON /SOLUCIONES/ARCHIVO,SOLUCION
CHARACTER*15 ARCHIVO,SOLUCION+10,OPT+1
*****
*** Subrutina que imprime los formatos de inicio de programa. ***
*** pide las caracteristicas de la solucion que se va a usar y ***
*** abre el archivo de impresion de resultados en el papel. ***
*****
IF (MENU.EQ.2) GO TO 5
/OPEN(10,FILE='SIMULADOR.REP',STATUS='OLD',IOSTAT=105)
CALL HOME
WRITE(1,110)
WRITE(10,110)
CALL ESPACIOS(4)
CALL PAUSA(1)
CALL HOME
CALL ATERISCO(0)
WRITE(1,100)
CALL ATERISCO(0)
*****
*** Aqui se pide el tipo de solucion que se va a evaporar y enese ***
*** caso de que sea necesario se pidan los datos de entalpia de ***
*** la misma. ***
*****
WRITE(1,*)'Cual solucion vas a usar?'
READ(1,*) HOF2
GO TO (2,3,30,20,10,10) HOF2
CALL HOME
CALL ATERISCO(0)
WRITE(1,*)'Dame el nombre de tu solucion'
READ(1,*) SOLUCION
CALL ESPACIOS(1)
WRITE(1,*)'Dame el nombre de tu archivo (archivo.dat)'
READ(1,*) ARCHIVO
CALL ESPACIOS(1)
WRITE(1,*)'Dame los valores de las constantes a y b de Duhring'
READ(1,*)CTEM,CTEB
IF(NOP2.EQ.4)GO TO 22
CALL ESPACIOS(1)
WRITE(1,*)'Dame el numero de paginas de tu archivo'
READ(1,*)HUB
CALL ESPACIOS(1)
CALL PAUSA(2)
IF (OPT.EQ.'C') GO TO 10

```

```

IF (NOP1.EQ.4) CALL ARCH_ENTALPIA(M,N)
GO TO 22
*****
*** Aqui se leen los datos de entalpia si se usa una solucion ***
*** de NaOH. ***
*****
ARCHIVO='SOSU.DAT'
SOLUCION='NaOH'
M=30
HUB=30
OPEN(110,FILE=ARCHIVO,STATUS='OLD',IOSTAT=105,ERR=120)
DO 1=1,M
  READ(110,*)HUB(2,1),ENTC(1,1),ENT(1,1),ENTC(1,3),ENT(1,4)
  * ENTC(1,2),ENTC(1,6),ENT(1,7),ENTC(1,8),ENT(1,9)
END DO
CLOSE(110)
MENU=1
INC=0
IF(NOP1.EQ.1) SOLUCION='NaCl'
IF(NOP2.EQ.2) SOLUCION='Azucar'
PETER=
CALL HOME
CALL ATERISCO(0)
CALL ESPACIOS(2)
WRITE(1,*)'El archivo no existe'
CALL ESPACIOS(2)
CALL ATERISCO(0)
CALL PAUSA(1)
GO TO 5
*****
*** Zona de formatos ***
*****
FORMA1='Solucion acua de etanol (funciones):',T10,'1.-Solucion
de NaCl',T10,'2.-Solucion de glucosa',T10,'3.-Solucion de NaOH
',T10,'4.-Otra solucion de la que ya proporcionas datos',T10
*5.-Solucion nueva')
FORMA1(112,59)*',T12,59*',T12,3*',T68,3*',T12,3*',T16,'P
rograma para simular un sistema de evaporadores',T68,3*',T12,3
*',T20,'de multiples efectos a regimen no permanente.'
*168,3*',T12,3*',T68,3*',T12,3*',T16,'Realizado por:',T68,3*',T12,3*',T37,'Luis Enrique Gutierrez Jui
nes',T68,3*',T12,3*',T68,3*',T12,3*',T37,'Ingenieria de
Alcance',T68,3*',T12,3*',T37,'Universidad La Salle',T68,3*',T1
*12,3*',T37,'Enero de 1986.'
*168,3*',T12,3*',T68,3*',T12,59*',T12,59*'
END

```



```

PENC...O.L.S.C
C *****
C SUBROUTINE ARCHV (ARCHV,DIRUP)
C *****
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION A-H,O-Z
C DIMENSION
C *****
C (COMMON /SOLUCIONES/ARCHIVO,SOLUCIONES
C /COMMON /PARAMOS/DPT
C /COMMON /COP/ DPT,ARCHIVO=15,FM=9,SOLUCIONES=10
C /DIMENSION > 50,9)
C *****
C *** Subrutina que pide los valores de entrada de la solución ***
C *** cuando se desea usar una solución nueva ***
C *****
C
C CALL NAME
C CALL ASTERISCO 0
C WRITE (1,*) 'Ingresar columna de tu archivo' (maximo 9)
C READ 1,*,MC
C DO I=1,MC
C CALL NAME
C CALL ASTERISCO 0
C DO J=1,MC
C WRITE (1,*) 'Dame el valor de MC',I,',',J,')'
C READ 1,*,J,J
C FM: TO
C CALL NAME
C CALL ASTERISCO 0
C WRITE (1,*) 'Ejemplo: 1'
C WRITE (1,*) '21, 991' (K,J,J,MC)
C CALL ASTERISCO 0
C WRITE (1,100): (I,J,J=1,MC)
C CALL PAUSA 5
C IF (DPT.EQ. 1) GO TO 5
C IF (DPT.EQ. 2) THEN
C WRITE (1,*) 'Columna del cambio'
C READ 1,*,MCC
C WRITE (1,*) 'Dame el valor de MCC',I,',',MCC,')'
C READ 1,*,MCC,MCC
C GO TO 10
C END IF
C END DO
C IF N=NR/2) J=1
C DO I=1,FM
C J=I-1+20*I
C J=J+20
C IF (I.EQ. IFM) J=NR
C CALL NAME
C CALL ASTERISCO 0
C WRITE (1,*) '(2N, 91N)' (K,J,J=1,0)
C CALL ASTERISCO
C DO J=1, JF
C WRITE (1,120): (K(J,K),K=1,MC)
C END DO
C CALL PAUSA 5
C IF (DPT.EQ. 1) GO TO 5
C IF (DPT.EQ. 2) THEN
C WRITE (1,*) 'Ejemplo y columna del cambio (8 final)'
C READ 1,*)MCC,MCC

```

```

IF (MCC.EQ. 0) MCC (0,0) GO TO 20
WRITE (1,*) 'Dame el valor de MC',MCC,')',MCC,')'
READ 1,*)MCC,MCC)
GO TO 30
END IF
END DO
OPEN (ARCHV, FILE=ARCHIVO, STATUS='UNKNOWN', IOSTAT=105, ERR=3)
DO I=1, MC
WRITE (100,130): (I,J,J=1,MC)
END DO
CLOSE (100)
RETURN
? WRITE (1,*) 'Fin de archivo 0',IOS
100 FORMAT (3X,99F.2)
120 FORMAT (2X,99F.2)
130 FORMAT (F8.2)
END

```

```

C *****
C SUBROUTINE PNTMAIN_DATOS
C *****
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON /DATAUWIL/INRES/1,NOPI,NOP2,NOP3,NOP4,NO,NO1,NO2,NO3
COMMON /FACTORES/FACT,M,DT,PHI,SIGMA,THC,HINC
COMMON /MENU/MENU
CHARACTER*40 DPT
C
C *****
C *** Subrutina principal que controla todas las subrutinas de ***
C *** entrada de datos al programa. ***
C *****
C
C I=1E30
PHI=1.0
SIGMA=0
CALL DATOS_TIPO
NO1=1
NO2=1
IF (NOPI.NE.1) THEN
  NO=NO1
  NO1=1
  NO2=1
ELSE IF
  NO=1
  NO1=1
  NO2=1
END IF
** CALL INRES_ALIMENTO (*30,*30,*40,*40)
** CALL ESPACIOS(1)
WRITE(*,*) 'Escriba el nombre de 5 variables.'
CALL PAUSA(1)
GO TO 10
30 CALL ESPACIOS(1)
WRITE(*,*) 'Escriba el nombre de 5 variables.'
CALL PAUSA(1)
GO TO 10
40 CALL INRES_SISTEMA
MENU=2
RETURN
END
C
C *****
C SUBROUTINE DATOS_TIPO
C *****
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON /DATAUWIL/INRES/1,NOPI,NOP2,NOP3,NOP4,NO,NO1,NO2,NO3
COMMON /FACTORES/FACT,M,DT,PHI,SIGMA,THC,HINC
COMMON /MENU/MENU
COMMON /PAUSA/DPT
CHARACTER*40 DPT
CHARACTER*40 TEXT1
C
C *****
C *** Subrutina donde se proporcionan el # de intercambiadores ***
C *** del flujo, el tipo de flujo, el fluido a usar y el sis- ***
C *** tema de unidades. ***
C *****
TEXT1='1-Numero de evaporadores del sistema'

```

```

TE12='12-Fluido de salida del sistema'
TE13='13-Fluido paralelo.'
TE14='14-Fluido a contracorriente.'
TE15='15-Sistema de unidades usado.'
TEXT31='16-1-Sistema Internacional.'
TEXT32='16-2-Sistema Ingles.'
TEXT4='17-Interacción de derivación (1-MINUS/1)'.
TEXT5='17-Tolerancia de las funciones (0.00001)'.
IF (MENU.EQ.1) GO TO 31
10 I=1
CALL HOME
CALL ASTERISCO(0)
WRITE(*,10)
20 CALL ESPACIOS(1)
WRITE(*,11)
SIGN=1.0
GO TO 20.30.40
40 WRITE(*,12)TE1,TE12,TE13,TE14,TE15,TE16,TE17
SIGN=1.0
NO1=1
GO TO 20.30.40
30 I=TE1,TE2,TE3,TE4,TE5,TE6,TE7,TE8,TE9,TE10,TE11,TE12
SIGN=1.0
NO1=1
GO TO 20.30.40
10 I=TE1,TE2,TE3,TE4
SIGN=1.0
GO TO 20.30.40
20 I=2
CALL HOME
CALL ASTERISCO(0)
WRITE(*,10)
CALL ESPACIOS(1)
WRITE(*,14)TEXT1,M,TE12,TE13,NOPI,TE15,TE16,NOPI,TE17,M,
+ TEXT5,C
CALL ASTERISCO(0)
CALL PAUSA(2)
IF (DPT.EQ.1) THEN
  CALL ASTERISCO(0)
  WRITE(*,10)
  SIGN=1.0
  GO TO (50,60,70,80,90) SIGN
END IF
GO TO 40
30 I=3
CALL HOME
CALL ASTERISCO(0)
WRITE(*,10)
CALL ESPACIOS(1)
WRITE(*,14)TEXT1,M,TE12,TE13,NOPI,TE15,TE16,NOPI,TE17,M,
+ TEXT5,C
CALL ASTERISCO(0)
CALL PAUSA(2)
IF (DPT.EQ.2) THEN
  CALL ASTERISCO(0)
  WRITE(*,10)
  SIGN=1.0
  GO TO (50,60,70,80,90) SIGN
END IF
WRITE(*,14) 'Para cambiar el # de efectos tiene q
+ sus volver a iniciar el programa.'

```



```

C *****
C SUBROUTINE HOME
C *****
C
C *****
C *** Subrutina para limpiar la pantalla y poner el cursor a la ***
C *** parte superior de ella ***
C *****
C
C CHARACTER HOME(4)
C HOME='CLEAR'/'27'/'H'/'27'/'J'
C WRITE(1,*)HOME
C RETURN
C END
C
C *****
C SUBROUTINE PREGUNTA
C *****
C COMMON /PREGUNTA OPT
C CHARACTER OPT(1)
C
C *****
C *** Subrutina para detener el progreso al imprimir opciones o ***
C *** mostrar y preguntar la opcion escogida. ***
C *****
C
C GO TO (10,20,30,40,50) J(1)
C WRITE(1,*) (RETURN)-Continuar.
C GO TO 100
C WRITE(1,*) (RETURN)-Continuar. (C)-Corregir
C GO TO 100
C WRITE(1,*) (RETURN)-Continuar
C GO TO 100
C WRITE(1,*) (RETURN)-Continuar. (I)-Nuevo incremento. (E)-Nuevo error
C IF J=Menu
C GO TO 100
C WRITE(1,*) (RETURN)-Continuar. (C)-Corregir. (I)-Inicio de proceso
C
C GO TO 100
C WRITE(1,*) (RETURN)-Continuar. (F)-Final
C PRINT(1,*) OPT
C RETURN
C END
C
C *****
C SUBROUTINE PAISAL
C *****
C
C *****
C *** Subrutina que detiene temporalmente la solucion del pro- ***
C *** ble. ***
C *****
C
C CHARACTER OP=1, FIC=10, FNAME
C WRITE(1,*) 'Teclea RETURN para continuar'

```

```

WRITE(1,*) FNAME(23:31)
WRITE(1,*) FNAME(23:31)
RETURN
END
C
C *****
C SUBROUTINE FANTASIA
C *****
C CHARACTER FIC, FNAME
C
C *****
C *** Subrutina para representar un fantasma en la parte inferior de ***
C *** la pantalla ***
C *****
C
C WRITE(1,*) FIC(24:31) para fijar la T del condensador, no fijar I
C COMMON /FANTASIA
C FANTASIA=1000000000
C RETURN
C END
C
C *****
C SUBROUTINE OPT_OPTIONAL
C *****
C COMMON /OPTIONAL OPT
C CHARACTER OPT(1)
C
C *****
C *** Subrutina que imprime un mensaje de error cuando el sistema ***
C *** es propuesto por el usuario no tiene solucion ***
C *****
C
C CALL HOME
C CALL WRITE(100,*)
C CALL ESP(100,*)
C WRITE(1,*) 100
C CALL ESP(100,*)
C CALL WRITE(100,*)
C CALL FANTASIA
C J=0
C IF OPT EQ 'F' J=3
C RETURN
C
C *****
C *** Zona de formatos. ***
C *****
C
C *****
C 160 FORMAT(1E15) El sistema que propone no tiene solucion.
C 1. Recomendaciones:
C 1.-T15, 1.-Modificar el area de transferencia de calor
C 2.-T15, 2.-Modificar el flujo de vapor
C 3.-Modificar el flujo de enfriacion
C 4.-Modificar la temperatura del vapor
C 5.-Modificar la temperatura de la solucion
C 6.-Para sistemas a regimenes no permanentes aumentar la DT
C
C END

```

```

C L S C
**PROGRAMA PARA SISTEMAS**
*****
SUPPORT THE VALUES IN THE
*****
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-M,D-Z)
DOUBLE PRECISION L(21)
COMMON /DATA/ IL(20), I(20), MOP1, MOP2, MOP3, MOP4, MO, MUI, MUI2, MUI3
COMMON /A/ A(20), B(20), C(20), D(20), E(20), F(20), G(20), H(20), I(20), J(20), K(20), L(20), M(20), N(20), O(20), P(20), Q(20), R(20), S(20), T(20), U(20), V(20), W(20), X(20), Y(20), Z(20)
*****
** Subrutina que le asigna valores aproximados a todas las **
** incógnitas del sistema para poder efectuar el método de **
** Newton-Raphson **
*****
FAC=1.0
IF (MOP3.EQ.2) FAC=1.0
SUM=0.0
DO I=1,N
    SUM=SUM+1
END DO
I=1
GO TO (10,20,30,40,50,60,70) MOP3
I=2
GO TO (10,20,30,40,50,60,70) MOP4
V=1.0/HC*(SUM-NI*(MUI2/MUI))
GO TO (5,70) I
I=3+TE*(MUI3/MUI)
GO TO (5,70) I
LI=NO*(MUI3/SUM-NI*(MUI3/MUI))
GO TO (5,80) I
IF (MOP3.NE.2) FAC
DO I=1,80) I
V=NO*(MUI3)
GO TO (5,80) I
M=MUI3*(MUI3)
GO TO (5,80) I
I=1+MUI3*(MUI3)
IF (FAC.EQ.1) I=I*(MUI3)
GO TO (5,90) I
TS=I*(1-T*(MUI3))
DO I=2,MUI3
    T(I)=T(I-1)*TS
END DO
I=0
V=1.0/HC*(1-M*(MUI3)/MUI3)
TS=CTR*(MUI3), M*(MUI3)+CTR*(MUI3), M*(MUI3)
TS=T*(MUI3)+20*FAC
I=1
IF (MOP1.EQ.2) I=0
I=0
DO I=MO+MUI3, MO1, MUI3
    I=I+1
    V(I)=V*(MUI3-I)/SUM
    L(I)=L*(MUI3-MUI3-I)
    TE(I)=TE*(I-MUI3)+TE*(MUI3)-TS*(MUI3)
    IF (I.EQ. MO1) MUI3=MO1+L*(MUI3)/L*(MUI3)
END DO

```

```

RETURN
END

```



```

ELSE
  IF J EQ 2 AND MD3 NE 7 AND MD4 NE 7 GO TO 38
  IF J GT 2 AND J NE MD3 AND J NE MD4 GO TO 38
END IF
END IF
WRITE(J)WRITE(J)DMC(1)
*****
*** Aquí se imprimen verifica que las variables no se ***
*** salgan del rango lógico de valores, u en el caso de ***
*** que si se salgan se imprimen un mensaje de error. ***
*****
IF J EQ 2 OR J EQ 4 AND X(1) J LE 8 B) CALL MOD_AREA
  (2) J = 10
IF J EQ 2 OR J EQ 4 AND X(1) J GT 800 C) CALL MOD_AREA
  (1) J = 10
  (1) J = 10
END DO
END DO
GO TO 46
RETURN JR
END

```

```

1 1 1
2 FUNCIONES
3 *****
4 SUBROUTINE FUNCION
5 *****
6 IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
7 COMMON /PARA/IL (NPF1,N,NPF2,NPF3,NPF4,NO,N01,N02,N03)
8 COMMON /FUNCIONES/ F(1,2)
9
10 *****
11 *** Subrutina que contiene las subrutinas de todas las fun- ***
12 *** ciones y que da los resultados en una matriz. ***
13 *****
14
15 DO I=1,N
16   CALL FUNCION(F(1,I),I,I)
17   CALL FUNCION(F(2,I),I,I)
18   CALL FUNCION(F(3,I),I,I)
19   CALL FUNCION(F(4,I),I,I)
20   CALL FUNCION(F(5,I),I,I)
21
22 END DO
23
24 RETURN
25 END

```

```

1 FUNCIONES DE LOS SISTEMAS DE MENORES Y PRESIONES Y VARIABLES
2 *****
3 SUBROUTINE FUNCION(F,I,I)
4 *****
5 IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
6 ENI=F,I,I
7 DOUBLE PRECISION E(21)
8 COMMON /PARA/IL (NPF1,N,NPF2,NPF3,NPF4,NO,N01,N02,N03)
9 COMMON /PRESIONES/CMO(20),UN(20),M(20)
10 COMMON /PRESIONES/E,M (1,2),SIGMA,INC,MINC
11 COMMON /PRESIONES/FUNC(20)
12 COMMON /PRESIONES/F1,F2,F(1,2),F(2,2)
13 COMMON /VARIABLES/M(1),L,TER(1),L,TER(1),M(21)
14
15 *****
16 *** Balance de masa total. ***
17 *****
18
19 J=1
20 GO TO 10
21 F1=M(1)*M(1)*F(1,1)+M(1)*F(1,2)+M(1)*F(2,1)+M(1)*F(2,2)
22 F2=CMO(1)*M(1)*F(1,1)+M(1)*F(1,2)+M(1)*F(2,1)+M(1)*F(2,2)
23 F=M(1)*M(1)*F(1,1)+M(1)*F(1,2)+M(1)*F(2,1)+M(1)*F(2,2)
24 F1=F1-F2/M(1)+SIGMA*F(1,1)+F(2,1,1)+M(1)*M(1)
25 F1=M(1)*F(1,1)
26 GO TO 20

```

```

1 *****
2 *****
3 *****
4 *****
5 *****
6 *****
7 *****
8 *****
9 *****
10 *****
11 *****
12 *****
13 *****
14 *****
15 *****
16 *****
17 *****
18 *****
19 *****
20 *****
21 *****
22 *****
23 *****
24 *****
25 *****
26 *****
27 *****
28 *****
29 *****
30 *****
31 *****
32 *****
33 *****
34 *****
35 *****
36 *****
37 *****
38 *****
39 *****
40 *****
41 *****
42 *****
43 *****
44 *****
45 *****
46 *****
47 *****
48 *****
49 *****
50 *****
51 *****
52 *****
53 *****
54 *****
55 *****
56 *****
57 *****
58 *****
59 *****
60 *****
61 *****
62 *****
63 *****
64 *****
65 *****
66 *****
67 *****
68 *****
69 *****
70 *****
71 *****
72 *****
73 *****
74 *****
75 *****
76 *****
77 *****
78 *****
79 *****
80 *****
81 *****
82 *****
83 *****
84 *****
85 *****
86 *****
87 *****
88 *****
89 *****
90 *****
91 *****
92 *****
93 *****
94 *****
95 *****
96 *****
97 *****
98 *****
99 *****
100 *****

```

```

1 GO TO 10
2 F1=M(1)*M(1)*F(1,1)+M(1)*F(1,2)+M(1)*F(2,1)+M(1)*F(2,2)
3 F2=CMO(1)*M(1)*F(1,1)+M(1)*F(1,2)+M(1)*F(2,1)+M(1)*F(2,2)
4 F=M(1)*M(1)*F(1,1)+M(1)*F(1,2)+M(1)*F(2,1)+M(1)*F(2,2)
5 F1=F1-F2/M(1)+SIGMA*F(1,1)+F(2,1,1)+M(1)*M(1)
6 F1=M(1)*F(1,1)
7 GO TO 20
8
9 *****
10 *****
11 *****
12 *****
13 *****
14 *****
15 *****
16 *****
17 *****
18 *****
19 *****
20 *****
21 *****
22 *****
23 *****
24 *****
25 *****
26 *****
27 *****
28 *****
29 *****
30 *****
31 *****
32 *****
33 *****
34 *****
35 *****
36 *****
37 *****
38 *****
39 *****
40 *****
41 *****
42 *****
43 *****
44 *****
45 *****
46 *****
47 *****
48 *****
49 *****
50 *****
51 *****
52 *****
53 *****
54 *****
55 *****
56 *****
57 *****
58 *****
59 *****
60 *****
61 *****
62 *****
63 *****
64 *****
65 *****
66 *****
67 *****
68 *****
69 *****
70 *****
71 *****
72 *****
73 *****
74 *****
75 *****
76 *****
77 *****
78 *****
79 *****
80 *****
81 *****
82 *****
83 *****
84 *****
85 *****
86 *****
87 *****
88 *****
89 *****
90 *****
91 *****
92 *****
93 *****
94 *****
95 *****
96 *****
97 *****
98 *****
99 *****
100 *****

```

```

1 *****
2 *****
3 *****
4 *****
5 *****
6 *****
7 *****
8 *****
9 *****
10 *****
11 *****
12 *****
13 *****
14 *****
15 *****
16 *****
17 *****
18 *****
19 *****
20 *****
21 *****
22 *****
23 *****
24 *****
25 *****
26 *****
27 *****
28 *****
29 *****
30 *****
31 *****
32 *****
33 *****
34 *****
35 *****
36 *****
37 *****
38 *****
39 *****
40 *****
41 *****
42 *****
43 *****
44 *****
45 *****
46 *****
47 *****
48 *****
49 *****
50 *****
51 *****
52 *****
53 *****
54 *****
55 *****
56 *****
57 *****
58 *****
59 *****
60 *****
61 *****
62 *****
63 *****
64 *****
65 *****
66 *****
67 *****
68 *****
69 *****
70 *****
71 *****
72 *****
73 *****
74 *****
75 *****
76 *****
77 *****
78 *****
79 *****
80 *****
81 *****
82 *****
83 *****
84 *****
85 *****
86 *****
87 *****
88 *****
89 *****
90 *****
91 *****
92 *****
93 *****
94 *****
95 *****
96 *****
97 *****
98 *****
99 *****
100 *****

```

```

1 *****
2 *****
3 *****
4 *****
5 *****
6 *****
7 *****
8 *****
9 *****
10 *****
11 *****
12 *****
13 *****
14 *****
15 *****
16 *****
17 *****
18 *****
19 *****
20 *****
21 *****
22 *****
23 *****
24 *****
25 *****
26 *****
27 *****
28 *****
29 *****
30 *****
31 *****
32 *****
33 *****
34 *****
35 *****
36 *****
37 *****
38 *****
39 *****
40 *****
41 *****
42 *****
43 *****
44 *****
45 *****
46 *****
47 *****
48 *****
49 *****
50 *****
51 *****
52 *****
53 *****
54 *****
55 *****
56 *****
57 *****
58 *****
59 *****
60 *****
61 *****
62 *****
63 *****
64 *****
65 *****
66 *****
67 *****
68 *****
69 *****
70 *****
71 *****
72 *****
73 *****
74 *****
75 *****
76 *****
77 *****
78 *****
79 *****
80 *****
81 *****
82 *****
83 *****
84 *****
85 *****
86 *****
87 *****
88 *****
89 *****
90 *****
91 *****
92 *****
93 *****
94 *****
95 *****
96 *****
97 *****
98 *****
99 *****
100 *****

```

```

C
10  I=1
    J=1
    K=1
    IF(MOP1.EQ.2) THEN
        P1=1
        K=1
        P3=0
    END IF
    IF (I.EQ.1) TP=TC13
    IF (I.EQ.2) TP=TE13+(K*3)
    GO TO (1,2,3,4,5) J
20  IF (J.EQ.2) FT=(F3-PTH0)/MHC
    RETURN
END

```

REM4 'PRESIONES Y VARIABLES'

```

L *****
SUBROUTINE PRESION_FF
C *****
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
  DOUBLE PRECISION L(21)
  COMMON /PARAMETROS/ H,HOP1,HOP2,HOP3,HOP4,H0,H01,H02,H03
  COMMON /PRESIONES/PRES(21)
  COMMON /VARIABLES/VIC(3),T(21),L,TE(21),XC(21)
F *****
L *****
C *****
DO I=1,N+1
  PRES(I)=PRESION(T(I))
END DO
RETURN
END

```



```

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      EMO=11.8
      COMMON /DATAHAMILIARF/ H, HOP1, HOP2, HOP3, HOP4, HO, HO1, HO2, HO3
      COMMON /ENTALP/ENT(1,50,9)
      .....
      *** Funcion para calcular la entalpia de laclusion. ***
      .....
      T=11
      GO TO (10,20,30,40) HOP2
      IF HOP3.EQ.2) T=11.32*H1.8
      H1=1.0045-D.01621*H2+0.5261E-4*H3-4*H4*E2
      H2=1.2714-1.4925*H1+0.8724*H2*E2+1*H1-4
      H3=2.8013-1.2024*H1+0.0121*H2*E2+1*H1-4
      H4=1.59.936-D.40937*H1.8
      H5=H1*1.4*H1-0.2471*1.2-3*HOP3)/2+H2+1*H3-216*HOP3)/3*H4
      IF HOP3.EQ.2) H1=H4*H1.8
      GO TO 50
      T=10
      IF HOP3.EQ.2) T=10.32
      C=1-0.8054*E1
      H1=C*H1-T*H3
      GO TO 50
      T=HOP3.EQ.1) T=11.14*H2
      DO 1=2,8
         IF (C.E=ENT(1,1),HOP3) LE ENT(1,14)Y(1)=1
      END DO
      DO 1=2,3
         IF (C.E=ENT(1,1) HOP3) LE ENT(1,1)Y(12)=1
      END DO
      PC=5-ENT(1,1)Y(1)+ENT(1,1)Y(1)+ENT(1,1)Y(1)
      H1=PC+ENT(12,1)Y(1)+ENT(12,1)Y(1)+ENT(12,1)Y(1)
      H2=PC+ENT(12,1)Y(1)+ENT(12,1)Y(1)+ENT(12,1)Y(1)
      H3=7-ENT(12,1)Y(1)+ENT(12,1)Y(1)+ENT(12,1)Y(1)
      H4=H1+H2+H3+H1*H1
      IF HOP3.EQ.1) H1=H1/1.8
      GO TO 50
      H1=1
      RETURN
      END
      .....
      FUNCTION CTH(1,5)
      .....
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      EMO=11.8
      COMMON /DATAHAMILIARF/ H, HOP1, HOP2, HOP3, HOP4, HO, HO1, HO2, HO3
      COMMON /GUMRING/CTEM,C1EM,C1CE
      .....
      *** Funcion usada para calcular el valor de la constante M de ***
      *** la ecuacion de equilibrio fisico. ***
      .....
      T=11
      IF HOP3.EQ.1) T=11.0*H2
      GO TO (10,20,30,40) HOP2
      C1=1.041-D.00123*7.2E-6*1*(8+3.443)*H1+1.13
      GO TO 50

```

```

      .....
      FAL=1
      IF HOP3.EQ.2) FAL=1.8
      H=0.00001037
      P=6.000208400
      C1=H*P+C*E*H*P.0451/3
      GO TO 20
      LTM=1.046.141952*H5
      LG=10.5*H
      C1=H*CTEM
      RETURN
      END
      .....
      FUNCTION C1E(1,5)
      .....
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      EMO=11.5
      COMMON /DATAHAMILIARF/ H, HOP1, HOP2, HOP3, HOP4, HO, HO1, HO2, HO3
      COMMON /GUMRING/CTEM,C1CE
      .....
      *** Funcion usada para calcular el valor de la constante E de ***
      *** la ecuacion de equilibrio fisico. ***
      .....
      T=11
      GO TO (10,20,30,40) HOP2
      C1E=0.4805+2.4403*H1+1.13
      GO TO 50
      C1E=1
      GO TO 50
      C1E=271.3627*H1+2-9.4160*H5
      GO TO 50
      C1E=C1E*P
      IF HOP3.EQ.1) C1E=C1E*1.8+17.7720*(C1E*11.5)-13
      RETURN
      END
      .....
      DATA /DATA/SYSTEMS/
      .....
      FUNCTION M(1,1)
      .....
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      EMO=11
      COMMON /DATAHAMILIARF/ H, HOP1, HOP2, HOP3, HOP4, HO, HO1, HO2, HO3
      COMMON /DATA/SYSTEMS/CM(20),UC(20),AC(20)
      COMMON /PAUSAS/OPT,OPT1
      CHARACTER*1 OPT,OPT1
      .....
      *** Funcion que proporciona el valor del coeficiente (jobs) ***
      *** de transferencia de calor. ***
      .....
      IF (OPT1.EQ.'S') THEN
         U1=U(1)
      ELSE
         T=11

```

IF HOP2 EC.11 Y*01.F432
U*27 0* 1 00.P12*8 0*224.0
3E*H0*3.EC.11 U1*01*0.6025

END IF
RETURN
END


```

IF (HDFI.EQ.1) CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1) ,KN,2
GO TO 50
*****
*** Evaluacion del "JACOBIANO" en I1 ***
*****
VE=5+I1-1
KN=1
GO TO (3,7,2,33,34,35) J
*****
*** Evaluacion de las derivadas de V ***
*****
CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION4(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
GO TO 50
*****
*** Evaluacion de las derivadas de T ***
*****
CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION4(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
GO TO 50
*****
*** Evaluacion de las derivadas de L ***
*****
CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION2(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION3(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
GO TO 50
*****
*** Evaluacion de las derivadas de TE ***
*****
CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION4(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
IF (HDFI.EQ.2) CALL FUNCION5(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
GO TO 50
*****
*** Evaluacion de las derivadas de K ***
*****
CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION3(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
IF (HDFI.EQ.2) CALL FUNCION5(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
GO TO 50
*****
*** Evaluacion del "JACOBIANO" en I1 ***
*****
VE=I1+5
KN=1

```

```

GO TO 5, 11 20 44 50 J
*****
*** Evaluacion de las derivadas de b ***
*****
IF (HDFI.EQ.2) THEN
CALL FUNCION1(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
CALL FUNCION4(JACOBIANO(1),I1),KN,2)
ENDIF
ENDIF
*****
END DO
I1=I1+1
GOTO 10
CALL TRESTON,EO
*****
END DO
RETURN
END

```

```

C L S C
*****
SUBROUTINE MULT(A,B,C,I1,J1,P1)
*****
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
EWA A,B,C
DIMENSION A(100,100),B(100,100),C(100,100)
*****
*** Subrutina para multiplicar matrices. ***
*****
DO I=1,I1
  DO J=1,J1
    C(I,J)=0
    DO K=1,P1
      C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J)
    END DO
  END DO
END DO
RETURN
END

*****
SUBROUTINE INV(A,N)
*****
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
EWA A,N,UNIT,Y,Z
DIMENSION A(100,100),B(100,100),X(100,100),C(100,100)
DIMENSION UNIT(100,100)
*****
*** Subrutina para invertir matrices. ***
*****
I=0
DO I=1,N
  UNIT(I,I)=1.0
  DO J=I+1,N
    UNIT(I,J)=0.0
  END DO
  DO J=1,I-1
    Y(I,J)=0.0
    Z(I,J)=0.0
  END DO
  END DO
  DO I=1,N
    IF(A(I,I).EQ.0) THEN
      ICONT=0
      DO J=N,I-1,STEP=-1
        IF(ICONT.EQ.1) GO TO 5
        IF(A(I,J).NE.0) THEN
          UNIT(I,J)=1.0
          ICONT=1
        END IF
      END DO
    END IF
  END IF
END DO
CALL MULT(UNIT,A,A,N,N,N)

```

```

DO I=1,N
  DO J=1,N
    A(I,J)=A(I,J)
  END DO
  DO I=1,N-1
    A(I,I)=1
    A(I,I+1)=A(I,I+1)-A(I,I)*A(I+1,I)
  END DO
  IF(A(I,I).NE.0) THEN
    A(I,I)=1/A(I,I)
    GO TO 10
  END IF
  DO J=I+1,N
    A(I,J)=A(I,J)+A(I,I)*A(I+1,J)
  END DO
  DO I=1,N-1
    A(I,I)=1/A(I,I)
    A(I,I+1)=A(I,I+1)-A(I,I)*A(I+1,I)
  END DO
  IF(A(I,I).EQ.0) THEN
    I=I+1
    GO TO 10
  END DO
  IF(I.EQ.N) GO TO 7
  UNIT(I,J)=UNIT(I,J)+A(I,J)
END DO
END DO
CALL MULT(UNIT,A,A,N,N,N)
IF(I.EQ.N) THEN
  WRITE(*,*) 'LA MATRIZ NO SE PUEDE INVERTIR'
  GO TO 20
END IF
I=I+1
WRITE(*,*) I, ' '
DO I=1,N
  A(I,J)=A(I,J)
  DO I=N-1,1,-1
    A(I,I)=1/A(I,I)
    A(I,I+1)=A(I,I+1)-A(I,I)*A(I+1,I)
  END DO
  DO I=1,N-1
    A(I,I)=1/A(I,I)
    A(I,I+1)=A(I,I+1)-A(I,I)*A(I+1,I)
  END DO
  GO TO 30
END DO
DO I=1,N
  DO J=1,I-1
    DEL=0.0
    IF(I.EQ.J) DEL=1.0
    Z(I,J)=DEL
    DO K=1,I
      Z(I,J)=Z(I,J)+A(I,K)*Z(K,J)
    END DO
    Z(I,J)=Z(I,J)+A(I,I)*Z(I,J)
  END DO
  DO I=1,N
    DO J=1,N
      DEL=0.0
      IF(I.EQ.J) DEL=1.0
      Y(I,J)=DEL
    END DO
  END DO

```

ESTA FORMA NO PUEDE SER INVERTIDA

```

      DO K=J-1
        Y(I,J)=Y(I,J)-ALC(I,M)*Y(K,J)
      END DO
      Y(I,J)=Y(I,J)/ALC(I,I)
    END DO
  END DO
CALL MULT7,V,O,N,M,H3
IF (I.EQ.0) THEN
  DO I2=1,I-1
    DO J=1,N
      AU(J,1)=ALC(J,I)
      DO I=2,M
        AT(J,I-1)=ALC(J,I)
      END DO
      AL(J,N)=AU(J,1)
    END DO
  END DO
CALL MULT6,UNIT,AU,N,N,M
RETURN
END

```



```
*****
SUBROUTINE MENU (M) = 3
*****
```

```
*****
** Subrutina que le presenta al usuario las opciones que figuran
** de una vez calculado el sistema de evaporadores a régimen **
** permanente. **
*****
```

```
CALL MONE
CALL MTERFISCO (M)
MWRITE (1,100)
CALL MTERFISCO (M)
MWRITE (1,1) 'Cual opcion escoges?'
MWRITE (1,2) 'M'
RETURN (M)
```

```
*****
** Zona de formato. **
*****
```

```
FORMAT 'Estas son las opciones que tienes en este momento: /',
/11,'1.-Iniciar el programa (modificar B de efecto o solución una
/11,'2.-Modificar alguno de los datos iniciales
/11,'3.-Evaluación su sistema de evaporadores a régimen no permanente
/11,'4.-Finalizar el programa
/11,'5.-Fin'
END
```



```

C
C *****
C SUPROUTINE WJUSTICE
C *****
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-M, N-Z)
C COMMON /COMMON/ NNN(2), N(2), P(2), V(2), S, P(2), V(2),
C COMMON /COMMON/ I(2), I(2), I(2), I(2), I(2), I(2), I(2), I(2), I(2), I(2),
C COMMON /COMMON/ P(2), P(2), P(2), P(2), P(2), P(2), P(2), P(2), P(2), P(2),
C COMMON /COMMON/ V(2), V(2), V(2), V(2), V(2), V(2), V(2), V(2), V(2), V(2),
C
C *****
C *** SUBROUTINE que produce los valores de las conclusiones del ***
C *** sistema a su estado original despues de haber realizado un ***
C *** simulacion dinamica. ***
C *****
C
C DO I=1,N
C   TO J=1,S
C     I(1)=I(1)+1
C     P(1)=P(1)+1
C   EN DO
C RETURN
END

```

```

C L L S C
C *****
C SUBROUTINE RESULTADO *
C *****
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DIMENSION X(21,5), PREM(21), MO(21,5), PRCO(21), HORA(2)
C CHARACTER*1 OPT
C
C *****
C *** Subrutina que presenta las condiciones del sistema en el ***
C *** momento en el que se recupera el regimen permanente ***
C *****
C
C CALL NAME
C CALL ESPACIOS(5)
C CALL INTERISCO(0)
C CALL ANTERISCO(0)
C CALL ESPACIOS(5)
C CALL ATSPACIOS(5)
C WRITE(1,*) HORA(2)
C WRITE(10,*) HORA(2)
C CALL ESPACIOS(5)
C CALL ATSPACIOS(5)
C CALL ANTERISCO(0)
C CALL INTERISCO(0)
C WRITE(1,*) 'Quisiera volver a ver los valores en el equilibrio'
C WRITE(1,*) OPT
C IF (.NOT. EQ. 'S') CALL IMPRESION(10,*)
C RETURN
C
C *****
C *** Zona de formatos ***
C *****
C
C IFMT(120, 'El equilibrio se logro despues de ', F6.2, ' horas')
C END
C
C *****
C SUBROUTINE FINAL
C *****
C
C *****
C *** Subrutina en la que se cierra el archivo de impresion en ***
C *** papel y se imprimen los formatos del final del programa. ***
C *****
C
C CALL NAME
C CALL ESPACIOS(0)
C CALL ANTERISCO(0)
C WRITE(1,*)
C CALL ANTERISCO(0)
C CALL ESPACIOS(0)
C CLOSE(100)
C RETURN
C
C *****
C *** Zona de formatos ***
C *****

```

CAPITULO V
Manual del usuario

5.1 Introducción .-En esta sección se le explica brevemente al usuario la forma en la que se debe operar el programa "Simulador".

5.2 Funcionamiento general del programa .-El programa "Simulador" es autoexplicativo, por lo que cualquier usuario con nociones de evaporación puede ejecutarlo.

La secuencia que sigue el programa para pedir y proporcionar información se detalla en los siguientes incisos.

5.3 Inicio del programa .-Para poder efectuar la simulación, el usuario debe entrar al sistema de la computadora, y una vez dentro debe teclear la palabra "Simulador", con lo que se inicia la ejecución del programa.

5.4 Selección del tipo de solución que se va a evaporar .-El programa presenta las cinco siguientes alternativas para que el usuario seleccione la solución química que se va a emplear en la simulación.

Las opciones son las siguientes:

- a) Solución de cloruro de sodio (NaCl).
- b) Solución de azúcar.
- c) Solución de hidróxido de sodio (NaOH).
- d) Cualquier solución de la que se tengan datos termodinámicos.
- e) Cualquier solución de la que ya se hayan proporcionado datos termodinámicos.

Para los tres primeros tipos de solución química, el pro-

grama ya tiene la información requerida para realizar la simulación, mientras que para la cuarta y la quinta opción, el usuario le debe de proporcionar a la computadora los datos termodinámicos y las constantes de la ley de Duhring de la solución escogida.

5.5 Número de efectos del sistema de evaporadores .-El sistema de evaporadores puede constar desde uno hasta 20 efectos(evaporadores).

5.6 Tipo de flujo .-El sistema puede operar con las corrientes de la solución química y del vapor de calentamiento fluyendo en paralelo, o bien fluyendo en contracorriente.

5.7 Sistema de unidades .-Durante la ejecución del programa el usuario puede seleccionar uno de los dos siguientes sistemas de unidades para proporcionar y recibir datos de la computadora:

a)Sistema internacional.

Longitud [=] metros.

Masa [=] kilogramos.

Tiempo [=] segundos.

Temperatura [=] grados centígrados.

b)Sistema inglés.

Longitud [=] pies.

Masa [=] libras.

Tiempo [=] segundos.

Temperatura [=] grados Fahrenheit.

5.8 Grado de precisión en los cálculos .-Debido a que se efectúan una derivación numérica y un sistema iterativo de convergencia, el usuario le debe proporcionar a la computadora tanto el incremento que desea usar en la derivación, como el error tolerado en el sistema convergente. En ambos casos la precisión de los cálculos es mayor al aumentar el número de cifras significativas hasta un máximo de 15 cifras significativas.

5.9 Condiciones de operación de los fluidos .-De acuerdo a lo que se mencionó en el capítulo IV, la solución del modelo matemático solo se logra si se fijan los valores de cinco de sus variables. Para este efecto el programa le presenta al usuario la opción de elegir estas cinco variables dentro del siguiente grupo de siete variables:

- 1.-Flujo del vapor de alimentación.
- 2.-Temperatura del vapor de alimentación.
- 3.-Flujo de la solución de alimentación.
- 4.-Temperatura de la solución de alimentación.
- 5.-Composición de la solución de alimentación.
- 6.-Composición de la solución a la salida del último efecto.
- 7.-Temperatura del condensador de vapor.

El programa solo acepta que se fijen cinco variables, por

lo que despliega un mensaje de error si se fija un número de variables distinto a cinco.

5.10 Datos mecánicos de los evaporadores .-En esta etapa del programa el usuario le debe proporcionar a la computadora la capacidad másica, el area de transferencia de calor y el coeficiente total de transferencia de calor de cada evaporador.

En el caso del coeficiente total de transferencia de calor, el usuario puede proporcionarle a la computadora el valor que tiene cada efecto, o bien puede usar una fórmula ya integrada al programa que calcula el coeficiente de transferencia de calor en función a la temperatura de cada efecto (apéndice B). Mediante esta fórmula el usuario puede observar el efecto que tiene la temperatura sobre el coeficiente total de transferencia de calor en cada evaporador.

5.11 Simulación del comportamiento del sistema de evaporadores en régimen permanente .-Después de que el usuario le proporcionó a la computadora todos los datos mencionados en los incisos anteriores, la computadora calcula las condiciones de operación que tiene el sistema de evaporadores en régimen permanente y las despliega en una tabla efecto por efecto (tabla 5.1).

En el caso de que los datos proporcionados por el usuario formen un modelo matemático que no tenga solución por llegarse a alguna indeterminación, la computadora despliega un mensaje de error y le pide al usuario que modifique los datos originales.

Condiciones iniciales del sistema de evaporadores
 Flujo Paralelo
 2 de evaporadores 2
 Inclusion de NaOH
 Operador: Sistema Ingles

T	P	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor			Alimentacion				
200.0	681.24	17400.0	1	350.7	110.20	44243.9	8736.7
138.2	110.21	8736.7	2	276.4	28.09	35467.8	8736.8
147.5	20.59	8796.6	3	130.0	.53	23870.2	11596.8
81.2	.53	11596.8					
Salidas de Vapor			Producto				

Tabla S.1.-Condiciones del sistema de evaporadores operando en régimen permanente.

5.12 Opciones para continuar con la ejecución del programa .-Después de que se calcularon las condiciones del sistema en régimen permanente, la computadora le presenta al usuario las siguientes opciones para que continúe la ejecución del programa:

- a) Reiniciar el programa para modificar el número de efectos del sistema de evaporadores y la solución que se va a evaporar.
- b) Modificar alguno de los datos originales del sistema de evaporadores.
- c) Realizar la simulación del comportamiento dinámico del sistema de evaporadores.
- d) Finalizar la ejecución del programa.

5.13 Simulación del comportamiento del sistema de evaporadores en régimen no permanente .-Cuando el usuario selecciona esta opción, la computadora despliega una tabla con las siete condiciones de operación que pueden modificarse. Estas condiciones de operación son:

- 1.-Flujo del vapor de alimentación.
- 2.-Temperatura del vapor de alimentación.
- 3.-Flujo de la solución de alimentación.
- 4.-Temperatura de la solución de alimentación.
- 5.-Composición de la solución de alimentación.
- 6.-Composición de la solución a la salida del último efecto.
- 7.-Temperatura del condensador de vapor.

El usuario le debe proporcionar a la computadora los nuevos

valores de las condiciones de operación que se quieran modificar, pudiéndose modificar como máximo cinco condiciones. Además el usuario debe proporcionar el incremento en tiempo que se va a usar para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales del modelo matemático.

Con base a esta información, la computadora calcula las condiciones de operación que va teniendo el sistema de evaporadores en los intervalos de tiempo seleccionados anteriormente por el usuario, hasta que el sistema vuelva a alcanzar el régimen permanente.

En cada intervalo de tiempo la computadora despliega una tabla con todas las condiciones de operación del sistema de evaporadores al principio y al final del intervalo (tabla 5.2).

En el momento en el que la variación de todas las condiciones del sistema durante un intervalo sea menor al rango de error proporcionado por el usuario, se considera que ya se obtuvo de nuevo el régimen permanente desplegando la computadora una tabla con todas las condiciones que tiene el sistema de evaporadores en ese momento.

En el caso de que las modificaciones propuestas por el usuario lleven a las ecuaciones del modelo matemático a una indeterminación, la computadora despliega un mensaje de error y pide de nuevo las modificaciones en el sistema para reiniciar la simulación dinámica.

5.14 Final del programa .-Al concluir la simulación del comportamiento dinámico del sistema de evaporadores, el usuario puede efectuar otra simulación dinámica con el mismo siste-

Condiciones del sistema de evaporadores durante de 2 000 horas
 Flujo Ficticio
 8 Cc. evaporadores: 3
 Solución de NaOH
 Origenes: Sistema Inglesa

T	P	V	Efecto	T	F	L	V	X
Entrada de Vapor			Alimentación					
			Frío	200.0		30000.0		.2000
				200.0		30000.0		.2000
500.0	681.24	17000.0	1	364.3	121.42	44747.3	5232.7	.2231
500.0	681.24	17000.0	Frío	264.3	121.33	44823.4	5166.6	.2235
342.1	121.42	8032.7	2	286.4	74.73	26486.2	8071.0	.2729
342.0	121.33	8166.6	Frío	287.1	34.98	36772.5	6665.9	.2742
255.8	24.73	8271.0	3	151.6	1.29	25276.5	11219.7	.3902
255.2	24.50	8060.9	Frío	155.2	1.29	24051.6	10720.9	.3946
108.0	1.29	11219.7						
110.4	1.29	10720.9	Frío					
Salidas de Vapor			Producto					

Tabla 5.2.-Condiciones del sistema de evaporadores durante la simulación dinámica.

ma de evaporadores , puede reiniciar el programa empleando otro sistema de evaporadores, o bien puede dar por terminada la ejecución del programa.

5.15 Ejemplo de uso del programa .-

PROBLEMA - En una planta química se tiene un sistema de evaporadores de triple efecto y flujo en paralelo con el que se concentra una solución de NaOH al 50% en peso. La solución diluida se alimenta a una temperatura de 200°F, con un flujo de 50,000 lb/hr, usandose como medio de calentamiento una corriente de 17,400 lb/hr de vapor saturado a 500°F. Cada evaporador tiene un area de transferencia de calor de 250 ft² y una capacidad másica de 2,500 lb de solución.

a) Obtenga las condiciones que tiene el sistema cuando está operando en régimen permanente.

Por un ajuste en la caldera de la planta, el flujo de vapor de calentamiento disminuye de 17,400 a 17,000 lb/hr, por lo que el sistema deja de operar en régimen permanente durante un cierto tiempo.

b) Obtenga las condiciones cambiantes del sistema de evaporadores a intervalos de una hora y determine el tiempo que tardará el sistema y las condiciones que tendrá al alcanzar de nuevo el régimen permanente.

Para efectos prácticos suponga que el coeficiente global de transferencia de calor es función directa de la temperatura, de acuerdo a la ecuación propuesta en el apéndice f.

SOLUCION .-La solución de este problema se logra mediante

una simulación dinámica. La simulación dinámica se realiza de la siguiente manera:

- *Primero el usuario debe entrar al sistema de la computadora en la cuenta que le fué asignada.
- *En el momento en que la computadora despliegue el cursor ">" se escribe la palabra "SIMULADOR.
- *Aparecen los letreros del inicio del programa.
- *Se le proporcionan a la computadora los siguientes datos en el momento en que los pida:

DATOS INICIALES:

Tipo de solución: solución de NaOH.

Número de evaporadores del sistema: tres.

Tipo de flujo: flujo en paralelo.

Sistema de unidades: sistema inglés.

Incremento en la derivación: 1.00000000000001(exactitud máxima.)

Tolerancia en la evaluación de las funciones: 0.000000000001

CONDICIONES DEL PROCESO:

Flujo de vapor: 17,400 lb/hr.

Temperatura del vapor: 500°F.

Flujo de alimentación: 50,000 lb/hr.

Temperatura de alimentación: 200°F.

Composición de alimentación: 50%.

DATOS DEL SISTEMA DE INTERCAMBIADORES:

Coefficiente global de transferencia de calor: es función de la temperatura de cada efecto(apéndice F).

Area de transferencia de calor: 250 ft² para cada efecto.

Capacidad másica: 2,500 lb de solución para cada efecto.

*Con estos datos la computadora calcula las condiciones del proceso operando en régimen permanente, y al terminar despliega una tabla en donde aparecen todas las condiciones de operación del sistema de evaporadores efecto por efecto (corrida de ejemplo, parte A). En esta forma queda resuelta la primera parte del problema.

*Para resolver la segunda parte del problema se debe dejar que continúe la ejecución del programa, apareciendo un menú en el que la computadora despliega las distintas opciones que tiene el usuario para continuar con la corrida del programa. De estas opciones se selecciona la que corresponde a la simulación del comportamiento dinámico del sistema de evaporadores.

*Al seleccionar esta opción la computadora le pide al usuario los nuevos valores de las condiciones de operación que desee modificar.

Nuevo flujo de vapor: 17,000 lb/hr.

Incremento de tiempo para la simulación dinámica: 1 hora.

*En base a esta información la computadora calcula en cada intervalo de tiempo, las condiciones de operación cambiantes del sistema de evaporadores y las despliega en la pantalla junto con los valores de las condiciones del intervalo de tiempo anterior (corrida de ejemplo parte B).

*Esta secuencia de cálculos se repite hasta que el sistema de evaporadores vuelva a lograr operar en régimen permanente.

*Al obtenerse de nuevo el régimen permanente, la computadora despliega los valores de las nuevas condiciones estables del sistema y el tiempo que tardo el sistema en obtenerlas (corrida de ejemplo, parte C).

*En esta forma queda resuelta la segunda y última parte del problema.

Corrida de Ejemplo


```

*****
*****
*** Programa para simular un sistema de evaporadores ***
*** de multiple efecto e ingenieria en alimentos. ***
*** Realizado por: Luis Enrique Gutierrez Jimenez ***
*** Universidad Guayaquil ***
*** Ingenieria Quimica ***
*** Universidad La Salle ***
*** Enero de 1986 ***
*****
*****

```

				Presio	200.0	5000.0	1200.0
				200.0	5000.0	1200.0	2000.0
210.0	281.24	17000.0	1	364.3	121.33	44833.4	5142.6
577.0	481.74	17000.0	Presio	364.3	115.20	44827.0	5736.2
342.0	121.37	5166.6	2	286.4	74.98	36772.5	8066.9
272.2	115.20	5166.6	Presio	287.1	74.98	36772.5	8776.8
283.2	34.75	8271.0	3	151.6	1.29	24574.5	10720.9
241.5	26.15	8271.0	Presio	155.2	1.29	24574.5	11218.7
110.4	1.29	10720.9					
01.2	.52	11576.8	Presio				

Salidas de Vapor

Producto

Condiciones Iniciales del Sistema de Evaporadores

Flujo Paralelo
 8 de evaporadores 2
 Solucion de Math
 Unidades: Sistema Ingles

T	P	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor				Alimentacion			
500.0	281.24	17000.0	1	200.0	5000.0		1200.0
577.0	481.74	17000.0	2	364.3	115.20	44267.0	5736.2
272.2	74.98	8746.8	3	150.8	.53	23070.2	11594.0

Salidas de Vapor

Producto

Info del Estado de ejemplo parte b.

Condiciones del sistema de evaporadores despues de: 1.000 horas

Flujo Paralelo
 8 de evaporadores 2
 Solucion de Math
 Unidades: Sistema Ingles

T	P	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor				Alimentacion			

Condiciones del sistema de evaporadores despues de: 2.000 horas

Flujo Paralelo
 8 de evaporadores 3
 Solucion de Math
 Unidades: Sistema Ingles

T	P	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor				Alimentacion			

Salidas de Vapor

Producto

				Presio	200.0	5000.0	1200.0
				200.0	5000.0	1200.0	2000.0
510.0	281.24	17000.0	1	364.3	121.42	44767.3	5232.7
500.0	481.24	17000.0	Presio	364.3	121.33	44833.4	5746.6
342.0	121.42	5272.7	2	286.4	74.77	36496.2	8271.0
342.0	121.37	5166.6	Presio	287.1	74.98	36772.5	8066.9
283.2	34.75	8271.0	3	151.6	1.29	24574.5	11218.7
251.2	26.15	8271.0	Presio	155.2	1.29	24574.5	10720.9
110.4	1.29	11218.7					
110.4	1.29	10720.9	Presio				

Salidas de Vapor

Producto

Condiciones del sistema de evaporadores después de 3.000 horas
 Flujo: Paralelo
 # de evaporadores: 3
 Solución: de NaOH
 Unidades: Sistema Inglés

T	F	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor			Alimentación				
			Previo	200.0		50000.0	2000
			Posterior	200.0		50000.0	2000
518.0	691.24	17800.0	1	364.7	121.36	44811.3	3218.7
520.0	691.24	17800.0	Previo	364.2	121.42	44767.7	3218.2
742.1	121.39	3188.7	2	286.6	34.96	36554.1	8228.0
742.1	121.39	3188.7	Posterior	286.4	34.73	36496.2	8227.9
251.2	34.96	6273.0	3	194.3	1.70	25251.8	10889.1
251.2	34.96	6273.0	Previo	191.6	1.20	25276.5	11219.2
110.0	1.20	10889.1					
110.0	1.20	11219.2	Previo				

Salidas de Vapor

Condiciones del sistema de evaporadores después de 4.000 horas
 Flujo: Paralelo
 # de evaporadores: 3
 Solución: de NaOH
 Unidades: Sistema Inglés

T	F	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor			Alimentación				
			Previo	200.0		50000.0	2000
			Posterior	200.0		50000.0	2000
509.0	691.24	17800.0	1	364.3	121.39	44782.6	3218.0
511.0	691.24	17800.0	Previo	364.3	121.39	44811.3	3218.7
342.1	121.39	3188.7	2	286.6	34.96	36554.1	8228.0
342.1	121.39	3188.7	Posterior	286.4	34.96	36609.5	8121.0

518.0 691.24 17800.0 1 364.7 121.36 44811.3 3218.7
 520.0 691.24 17800.0 Previo 364.2 121.42 44767.7 3218.2
 742.1 121.39 3188.7 2 286.6 34.96 36554.1 8228.0
 742.1 121.39 3188.7 Posterior 286.4 34.73 36496.2 8227.9
 251.2 34.96 6273.0 3 194.3 1.70 25251.8 10889.1
 251.2 34.96 6273.0 Previo 191.6 1.20 25276.5 11219.2
 110.0 1.20 10889.1
 110.0 1.20 11219.2 Previo

Salidas de Vapor

Condiciones del sistema de evaporadores después de 5.000 horas
 Flujo: Paralelo
 # de evaporadores: 3
 Solución: de NaOH
 Unidades: Sistema Inglés

T	F	V	Efecto	T	P	L	V
Entrada de Vapor			Alimentación				
			Previo	200.0		50000.0	2000
			Posterior	200.0		50000.0	2000
509.0	691.24	17800.0	1	364.3	121.39	44782.6	3218.0
511.0	691.24	17800.0	Previo	364.3	121.39	44782.6	3218.0
742.1	121.39	3188.7	2	286.6	34.96	36554.1	8228.0
742.1	121.39	3188.7	Posterior	286.4	34.79	36554.1	8228.0
251.2	34.96	6273.0	3	194.3	1.20	25251.8	10889.1
251.2	34.96	6273.0	Previo	192.4	1.22	25417.9	11031.1
110.0	1.20	10889.1					
110.0	1.20	11031.1	Previo				

Salidas de Vapor

Condiciones del sistema de evaporadores después de 6.000 horas
 Flujo: Paralelo
 # de evaporadores: 3
 Solución: de NaOH
 Unidades: Sistema Inglés

T	P	M	Efecto	T	F	L	M	V
Entrada de Vapor			Alimentación					
			Frío	200.0		50000.0		2000
				200.0		50000.0		2000
500.0	481.24	17000.0	1	364.3	121.39	44707.2	5211.9	2272
500.0	481.24	17000.0	Frío	364.3	121.39	44707.2	5211.9	2272
742.1	121.39	5211.5	2	286.7	24.83	36502.6	8102.9	2732
742.1	121.39	5211.5	Frío	286.7	24.83	36502.6	8102.9	2732
255.0	34.83	8102.9	3	192.8	1.26	25507.4	11075.2	3907
255.0	34.83	8102.9	Frío	192.8	1.26	25507.4	11075.2	3907
109.7	1.26	11075.2						
109.7	1.26	11075.2	Frío					

Salidas de Vapor			Producto					
Condiciones del sistema de evaporadora después de: 7.000 horas								
Flujo Paralelo								
8 de evaporadora - 3								
Solución de NaOH								
Unidades: Sistema Ingles								

T	P	M	Efecto	T	F	L	M	V
Entrada de Vapor			Alimentación					
			Frío	200.0		50000.0		2000
				200.0		50000.0		2000
500.0	481.24	17000.0	1	364.3	121.39	44707.2	5211.9	2272
500.0	481.24	17000.0	Frío	364.3	121.39	44707.2	5211.9	2272
742.1	121.39	5211.5	2	286.7	24.83	36502.6	8102.9	2732
742.1	121.39	5211.5	Frío	286.7	24.83	36502.6	8102.9	2732
255.0	34.83	8102.9	3	192.8	1.26	25507.4	11075.2	3907
255.0	34.83	8102.9	Frío	192.8	1.26	25507.4	11075.2	3907
109.7	1.26	11075.2						
109.0	1.24	11075.2	Frío					

Salidas de Vapor			Producto					
------------------	--	--	----------	--	--	--	--	--

T	P	M	Efecto	T	F	L	M	V
Condiciones del sistema de evaporadora después de: 8.000 horas								
Flujo Paralelo								
8 de evaporadora - 3								
Solución de NaOH								
Unidades: Sistema Ingles								
Entrada de Vapor			Alimentación					
			Frío	200.0		50000.0		2000
				200.0		50000.0		2000
500.0	481.24	17000.0	1	364.3	121.39	44707.2	5211.9	2272
500.0	481.24	17000.0	Frío	364.3	121.39	44707.2	5211.9	2272
742.1	121.39	5211.5	2	286.7	24.83	36502.6	8102.9	2732
742.1	121.39	5211.5	Frío	286.7	24.83	36502.6	8102.9	2732
255.0	34.83	8102.9	3	192.8	1.26	25507.4	11075.2	3907
255.0	34.83	8102.9	Frío	192.8	1.26	25507.4	11075.2	3907
109.7	1.26	11075.2						
109.7	1.26	11075.2	Frío					

Salidas de Vapor			Producto					
El equilibrio se logra después de 8.000 horas								

CAPITULO VI

Conclusiones

Conclusiones

El logro principal de este estudio fue el haber obtenido un sistema de cómputo que le permite al estudiante de Ingeniería Química simular el comportamiento dinámico de un sistema de evaporadores de múltiple efecto.

Este sistema de cómputo le proporciona una gran ayuda didáctica a los estudiantes, ya que les permite reforzar conceptos básicos de diversas áreas de la Ingeniería Química en una forma práctica. Algunas de estas áreas son:

Transferencia de calor.

Equilibrio entre 2 fases.

Evaporación.

Balances de materia y de energía.

Procesos de operación en régimen permanente y en régimen no permanente.

El sistema de cómputo también permite que el alumno se familiarice con la operación de este tipo de equipos industriales, ya que el alumno puede modificar libremente las condiciones de operación del proceso y observar los cambios que se generan en el sistema.

El planteamiento del modelo matemático y el algoritmo desarrollado para crear el programa pueden servir de guía para que el alumno desarrolle modelos matemáticos y programas de cómputo similares para otros equipos usados en la Ingeniería Química, ya que el estudio presenta en una forma muy deta-

llada todos los pasos que se siguieron para poder crear el simulador.

Por ultimo, este estudio le permite al alumno darse cuenta de la gran importancia que tienen actualmente las computadoras en el entendimiento de las operaciones unitarias y de los procesos complejos que forman parte de la Ingenieria Quimica.

CAPITULO VII

APENDICES

APENDICE A

Asignación de valores aproximados a las condiciones del sistema de evaporadores, para usarlas como punto de partida en el método de Newton Raphson.

Para poder emplear el método de Newton Raphson en la resolución de un sistema de ecuaciones no lineales, se le deben asignar valores aproximados (dentro de los límites lógicos de cada condición) a todas las incógnitas del sistema de ecuaciones no lineales.

Al desarrollar el programa "Simulador" se usaron varios criterios para poder asignarle valores al sistema de evaporadores para poder iniciar los cálculos.

Para asignarle valores a las dos variables que fija el usuario como dependientes, de las siete opciones que presenta el programa, se consideró lo siguiente:

- *El vapor de alimentación es igual a la tercera parte del flujo de la solución de alimentación.
- *La temperatura del vapor de alimentación es 50°C mayor que la temperatura de la solución de alimentación.
- *El flujo de solución de alimentaciones tres veces mayor al flujo del vapor de alimentación.
- *La temperatura de la solución de alimentación es 50°C mayor que la temperatura del vapor de alimentación.
- *La concentración del soluto en la solución de alimentación es del 10% en peso.
- *La concentración del soluto en la solución final es del 60% en peso.
- *La temperatura del condensador final del sistema es de

20°C.

Para asignarle valores a las demás condiciones del sistema de evaporadores se consideró que la variación de dichas condiciones a lo largo del sistema es lineal. De esta forma podemos asignarle valores a las condiciones de operación de los efectos intermedios del sistema por medio de los valores que se les asignaron en el inciso anterior a las condiciones de los efectos inicial y final.

APENDICE B

EVALUACION DEL JACOBIANO

En la evaluación del jacobiano que se emplea en el método de Newton Raphson para resolver el sistema de ecuaciones no lineales, se deben obtener las derivadas de todas las ecuaciones del sistema con respecto a todas las variables del sistema. Debido a que en muchos casos las derivadas son iguales a cero, ya que la variable independiente no se encuentra presente en la ecuación, se hizo un estudio para determinar cuales derivadas del jacobiano pueden tener un valor distinto a cero. De esta forma se evita que la computadora use tiempo de cálculo para evaluar derivadas que de antemano se sabe que son iguales a cero (figura B.1).

APENDICE C**Inversión de Matrices.**

Para la inversión de matrices que se necesita en el método de Newton Rapshon se siguió el método de descomposición en matrices superior e inferior. Para mayores detalles de este método se puede consultar el libro "Numerical Methods" de Germund Dahlquist y Ake Bjork, (ver la referencia en la bibliografía).

APENDICE D**Propiedades termodinámicas del vapor de agua**

La evaluación de las propiedades termodinámicas del vapor de agua se efectuó mediante las fórmulas que se presentan en el libro "Tablas de Vapor" de la "Electrical Reserch Association", (ver la referencia completa en la bibliografía).

APENDICE E**Propiedades termodinámicas de las soluciones acuosas**

Las propiedades termodinámicas de las soluciones acuosas de Hidróxido de Sodio se obtuvieron de la tabla E.1, la cual está basada en datos proporcionados por el "American Institute of Chemical Engineers".

Las propiedades termodinámicas de las soluciones de azúcar de caña se obtuvieron de la tabla 33.2 del libro "Handbook of Cane Sugar Engineering" (ver la referencia en la bibliografía).

% de concentraci6n del NaOH

Temperatura de la soluci6n en °F.

45.00	16.00	8.00	5.00	3.00	1.50	0.75	0.37	0.19	0.10
50.00	21.00	10.50	6.50	4.00	2.00	1.00	0.50	0.25	0.13
60.00	30.00	15.00	9.00	5.50	2.75	1.38	0.69	0.34	0.17
70.00	40.00	20.00	12.00	7.00	3.50	1.75	0.88	0.43	0.22
80.00	50.00	25.00	15.00	8.50	4.25	2.13	1.07	0.52	0.26
90.00	60.00	30.00	18.00	10.00	5.00	2.50	1.26	0.61	0.30
100.00	70.00	35.00	21.00	11.50	5.75	2.88	1.45	0.70	0.34
110.00	80.00	40.00	24.00	13.00	6.50	3.25	1.64	0.79	0.38
120.00	90.00	45.00	27.00	14.50	7.25	3.63	1.83	0.88	0.42
130.00	100.00	50.00	30.00	16.00	8.00	4.00	2.02	0.97	0.46
140.00	110.00	55.00	33.00	17.50	8.75	4.38	2.21	1.06	0.50
150.00	120.00	60.00	36.00	19.00	9.50	4.75	2.40	1.15	0.54
160.00	130.00	65.00	39.00	20.50	10.25	5.13	2.59	1.24	0.58
170.00	140.00	70.00	42.00	22.00	11.00	5.50	2.78	1.33	0.62
180.00	150.00	75.00	45.00	23.50	11.75	5.88	2.97	1.42	0.66
190.00	160.00	80.00	48.00	25.00	12.50	6.25	3.16	1.51	0.70
200.00	170.00	85.00	51.00	26.50	13.25	6.63	3.35	1.60	0.74
210.00	180.00	90.00	54.00	28.00	14.00	7.00	3.54	1.69	0.78
220.00	190.00	95.00	57.00	29.50	14.75	7.38	3.73	1.78	0.82
230.00	200.00	100.00	60.00	31.00	15.50	7.75	3.92	1.87	0.86
240.00	210.00	105.00	63.00	32.50	16.25	8.13	4.11	1.96	0.90
250.00	220.00	110.00	66.00	34.00	17.00	8.50	4.30	2.05	0.94
260.00	230.00	115.00	69.00	35.50	17.75	8.88	4.49	2.14	0.98
270.00	240.00	120.00	72.00	37.00	18.50	9.25	4.68	2.23	1.02
280.00	250.00	125.00	75.00	38.50	19.25	9.63	4.87	2.32	1.06
290.00	260.00	130.00	78.00	40.00	20.00	10.00	5.06	2.41	1.10
300.00	270.00	135.00	81.00	41.50	20.75	10.38	5.25	2.50	1.14
310.00	280.00	140.00	84.00	43.00	21.50	10.75	5.44	2.59	1.18
320.00	290.00	145.00	87.00	44.50	22.25	11.13	5.63	2.68	1.22
330.00	300.00	150.00	90.00	46.00	23.00	11.50	5.82	2.77	1.26
340.00	310.00	155.00	93.00	47.50	23.75	11.88	6.01	2.86	1.30
350.00	320.00	160.00	96.00	49.00	24.50	12.25	6.20	2.95	1.34
360.00	330.00	165.00	99.00	50.50	25.25	12.63	6.39	3.04	1.38
370.00	340.00	170.00	102.00	52.00	26.00	13.00	6.58	3.13	1.42
380.00	350.00	175.00	105.00	53.50	26.75	13.38	6.77	3.22	1.46
390.00	360.00	180.00	108.00	55.00	27.50	13.75	6.96	3.31	1.50
400.00	370.00	185.00	111.00	56.50	28.25	14.13	7.15	3.40	1.54

Tabla E.1.-Propiedades termodinámicas del NaOH. (Btu/lb).

APENDICE F**Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor**

El usuario puede observar el efecto que tiene la temperatura sobre el coeficiente total de transferencia de calor, proporcionándole a la computadora alguna ecuación empírica que calcule dicho coeficiente en función de la temperatura de cada efecto y que se aplique al tipo de solución que haya escogido.

La fórmula se debe de programar al final de la subrutina "U1", escribiendo las temperaturas como "T", y el coeficiente global de transferencia de calor como "U1". Después de esto solo se necesita compilar la subrutina "U1" y encadenarla con el programa principal.

CAPITULO VIII

Bibliografía

BIBLIOGRAFIA

- 1.-Balzhiser R.E., Samuels M.R., Eliassen J.D., "Termodinámica Química para Ingenieros", Prentice Hall Inc., 1972.
- 2.-Finlayson B. A., "Nonlinear Analysis in Chemical Engineering", Mc. Graw Hill 1980.
- 3.-Germund Dahlquist & Ake Bjork, "Numerical Methods", Prentice Hall, 1974.
- 4.-Green D. "Perry's Chemical Engineers Handbook", Mc. Graw Hill (6ª edición) 1984.
- 5.-Holland D. C., Liapis A.I., "Computer Methods for Solving Dynamic Separation Problems", Mc. Graw Hill 1983.
- 6.-Holland D. C., "Fundamentos y Modelos de Procesos de Separación", Prentice Hall International, 1975.
- 7.-Hugot E., "Handbook of Cane Sugar Engineering", Elsevier Scientific Publishing Company, 2nd Ed., 1979.
- 8.-Kern D.D., "Process Heat Transfer", Mc. Graw Hill 1950.

- 9.-King C.J., "Separation Processes", 2nd Ed., Mc. Graw Hill 1980.
- 10.-Mc. Cabe W.L., Smith J.C. & Harriott P., "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc. Graw Hill, 4th Ed., 1983.
- 11.-Parker N.A., "How to Specify Evaporators", Chem. Eng. Albany 70, No. 15 (22 July 1963) 135-40.
- 12.-Peters M.S., Timmerhaus L.D., "Plant Design & Economics for Chemical Engineers", 3rd Ed., Mc. Graw Hill, 1980.
- 13.-Rohsenow & Hartnett, "Handbook of Heat Transfer", Mc. Graw Hill 1973.
- 14.-Rudd & Watson, "Stategy Process Engineering", John Wiley & Sons, 1968.
- 15.-The Electrical Research Association, "Tablas de Vapor", Eduard Arnold Publishers Ltd., editado en español por Representaciones y Servicios de Ingenieria S.A., México 1970.
- 16.-Vemury Karplus, "Digital Computer Treatment of Partial Differential Equations", Prentice Hall Inc. 1981.