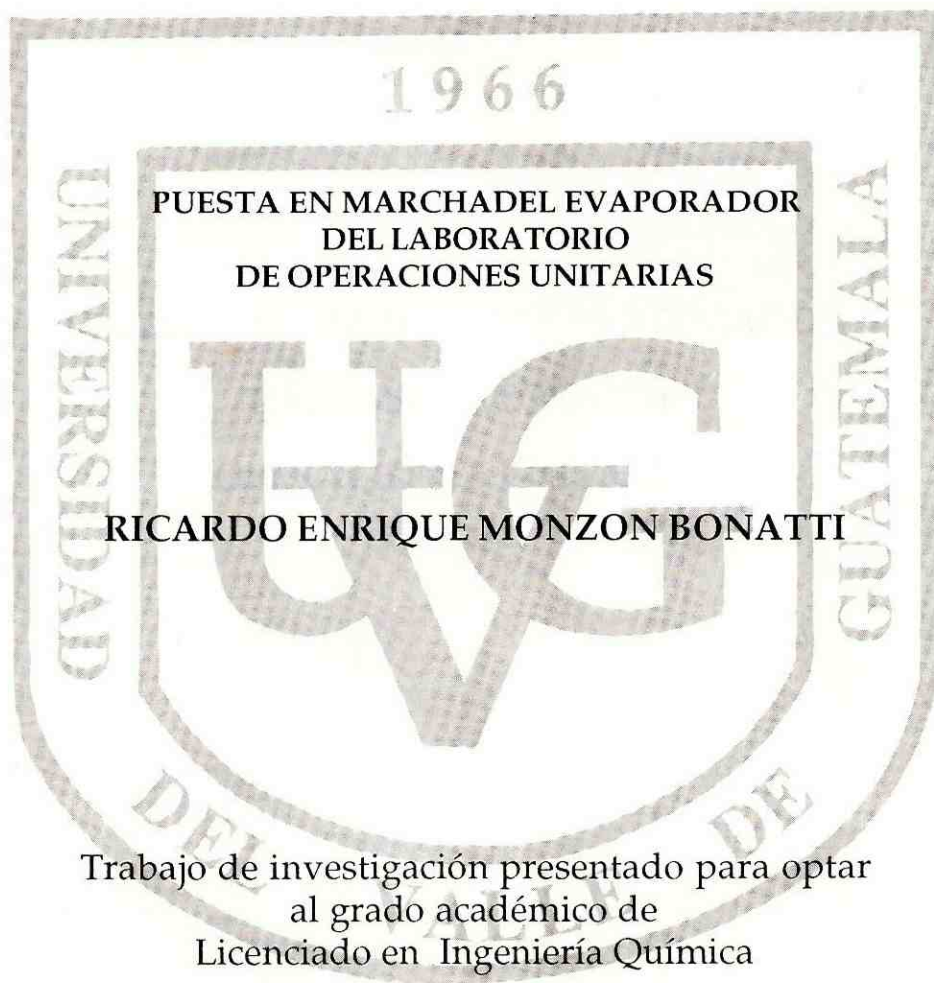


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



**BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Guatemala

1991

**PUESTA EN MARCHA DEL EVAPORADOR
DEL LABORATORIO DE
OPERACIONES UNITARIAS**

Vo. Bo. :

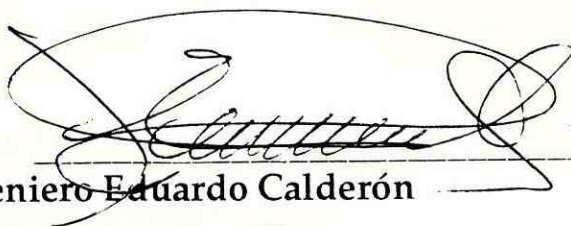
(f)



Ingeniero Oscar Gil
Asesor

Tribunal :

(f)



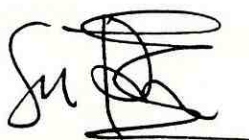
Ingeniero Eduardo Calderón

(f)



Ingeniero Arturo Estrada

(f)



Ingeniero Oscar Gil

Fecha de aprobación: 29 de octubre de 1991.

XII.

XI.

CONTENIDO

I. RESUMEN	VII
II. INTRODUCCION	1
III. GENERALIDADES	5
A. Evaporación	5
B. Tipos de evaporadores	6
C. Cristalización	8
IV. DESCRIPCION DEL EQUIPO	11
A. Resistencia química	11
B. Propiedades térmicas	12
C. Propiedades mecánicas	14
D. Tuberías	15
E. Intercambiadores de calor	15
F. Transferencia de calor dentro de los intercambiadores de calor	16
G. Columna empacada	17
H. Estructura	17
I. Piezas principales del equipo	18
V. DISEÑO	21
A. Modificaciones y justificaciones	21
B. Diagramas del equipo	23
C. Sistema eléctrico de control	25
D. Costos del equipo	29
VI. RESULTADOS	
A. Pruebas en el equipo	31
Balances de materia y energía con agua	31
Balances de materia y energía con cloruro de sodio	37
Manual de Operación	41
VII. REGISTRO DEL EQUIPO	43
VIII. CONCLUSIONES	45
IX. RECOMENDACIONES	47
X. FOTOGRAFIAS	49
XI. BIBLIOGRAFIA	51
XII. ANEXOS	53

RESUMEN

Este trabajo de tesis fue realizado en dos etapas: la parte práctica, que consistió en la reparación y puesta en marcha del evaporador del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y la segunda parte que consistió en complementar la primera con un trabajo escrito sobre el evaporador original, los cambios que éste sufrió y lo que llevó a convertirlo en un evaporador-cristalizador. Además, queda constancia de las pruebas realizadas en él con agua y NaCl, así como de un Manual de Operación del mismo. También se colocó un sistema eléctrico de control de vapor para utilizarlo con el evaporador-cristalizador. Y por último, se menciona en este trabajo un registro del equipo, sus herramientas y lo que costó a la Universidad del Valle su reparación. Hay que tomar en cuenta que el equipo no había sido utilizado desde su compra en 1981 y le faltaban piezas que debían ser traídas de Francia y tenían un alto costo; por lo que en este trabajo se utilizaron materiales nacionales adaptados y algunos repuestos ya existentes, lo cual benefició enormemente a la universidad, ya que el costo fue mucho menor de lo esperado y el equipo está en uso desde agosto de 1991.

I. INTRODUCCION

En el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala existen varios equipos para el estudio de las operaciones unitarias básicas de Ingeniería Química; uno de ellos es el evaporador, que nunca fue usado para la realización de prácticas en el laboratorio, de allí que era necesario ponerlo a funcionar, ya que la práctica de evaporación es necesaria al estudiar dichas operaciones unitarias.

En un principio, el equipo ya había sido armado con un criterio, pero aún faltaban algunas piezas para su mejor funcionamiento. Por lo que se decidió cotizarlas en Francia, lugar donde se había comprado el equipo, pero esta cotización mostró un costo muy elevado y un tiempo de entrega bastante largo.

Entonces, se decidió que lo mejor era tratar de instalar el sistema de la forma más sencilla posible y que además funcionara como evaporador-cristalizador. Así se podrían aprovechar algunas piezas del equipo y las que faltaran se podrían conseguir o fabricar en el mercado local, con lo que se reduciría el gasto considerablemente y sería una buena experiencia como trabajo de graduación. No sólo porque en la carrera no existe casi la parte práctica, en lo que a diseño y montaje se refiere, sino también porque es una buena experiencia para un Ingeniero Químico que más adelante, en su vida profesional, trabajará en Ingeniería de Procesos o Producción.

El propósito de este trabajo es completar la puesta en marcha del evaporador, con un trabajo escrito sobre ello; en donde se muestran los cambios que se le hicieron al sistema de evaporación, algunas de las pruebas y, además, la puesta en condiciones de operación para su posterior uso en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Con base en esto, también se elaboró un Manual de Uso y Operación del Evaporador.

II. OBJETIVOS

- A) Poner en funcionamiento el Evaporador , modificándolo para que pueda ser utilizado como Evaporador-cristalizador.
- B) Que el Evaporador funcione de la manera más sencilla posible, para que los procesos de evaporación y cristalización sean comprendidos más fácilmente.
- C) Aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Química, para el rediseño del sistema, para obtener experiencia en la cotización de materiales, montaje de instrumentos y equipo auxiliar; basándose en criterios técnicos que justifiquen su adecuada selección, y así poder diseñar equipo a nivel planta-piloto.
- D) Realizar pruebas preliminares y hacer las correcciones necesarias para que el equipo opere de una forma satisfactoria.

III. GENERALIDADES

A. Evaporación

La evaporación juega un papel importante en la manufactura de una gran variedad de productos en la industria de proceso químico (CPI), incluidos alimentos, pulpa y papel, productos farmacéuticos, productos químicos orgánicos e inorgánicos, polímeros y fertilizantes.

Básicamente, la evaporación es usada para concentrar una solución que consiste en un solvente volátil y un soluto no volátil, sin intentar fraccionar el solvente. Difiere de la cristalización en que en ésta se trata de formar un producto cristalino o promover el crecimiento de cristales, mientras que en la evaporación se quiere vaporizar el solvente de la solución. La diferencia entre los dos procesos casi desaparece cuando el producto de la evaporación es un lodo cristalino y un "licor madre" saturado, por ejemplo, en la evaporación de salmuera para producir sal común. En la mayoría de los procesos de evaporación, el producto es un licor *grueso* ("Thick Liquor"), el cual puede ser saturado o no, dependiendo de las condiciones de operación.

Dependiendo del tipo de proceso, el diseño del equipo varía, según las características del soluto y el solvente. El soluto puede ser sensitivo al calor o puede tender a polimerizarse o aglomerarse en la superficie de transferencia de calor. El solvente puede ser un fluido viscoso o una emulsión que se puede romper. Estas y otras características juegan un papel importante en el diseño y selección de evaporadores.

La evaporación se divide en tres categorías mayores, dependiendo de la naturaleza del proceso de ebullición:

1. En bulto ("Bulk"): Ebullición en la cual la masa del líquido ebulle como

en un contenedor de metal o en un termosifón de circulación natural, como los usados en destilación.

2. Calentamiento convectivo: Como en los evaporadores de circulación forzada.

3. Evaporación de película fina: En la cual una película fina del líquido es mantenida en la superficie de calentamiento.

Todo equipo de evaporación tiene una superficie de calentamiento para la transferencia de calor, un medio de calentamiento al fluido de proceso y medios para una efectiva separación de vapor del líquido residual.

B. Tipos de evaporadores

Los tipos más comunes de evaporadores son:

1. Solares
2. Contenedor Batch ("*Batch Pan*")
3. De Circulación natural:
 - a. De tubos cortos verticales
 - b. De tubos horizontales
 - c. Tipo canasta
 - d. De tubos largos verticales
4. De Circulación forzada
5. De película
 - a. Que sube o se levanta ("*Rising Film*")
 - b. Que baja o cae ("*Falling Film*")
6. Película delgada agitado ("*Thin Film Agitated*")
7. De platos
8. Con compresión de vapor
9. Película horizontal con spray ("*Horizontal Spray Film*")

B1. Evaporadores de circulación natural

La operación de estas unidades depende del balance entre la fricción de las dos fases y las pérdidas en la aceleración del circuito de flujo, y la cabeza estática desarrollada por el líquido en el cuerpo principal del evaporador.

La superficie de calentamiento puede ser horizontal o vertical y puede estar sumergida total o parcialmente y aún fuera del cuerpo del evaporador. Las unidades de circulación natural ofrecen un moderado rango de operación (2:1) y no son recomendadas para servicios donde se esperan fluctuaciones muy amplias y bruscas. Pueden ser operados con o sin recirculación. Si no hay recirculación, la alimentación pasa a través de los tubos sólo una vez, y la mezcla, de dos fases, queda en el cuerpo principal del evaporador donde son separados vapor y líquido. Estas unidades son útiles, especialmente en el manejo de materiales sensibles al calor, debido a los tiempos de residencia cortos. En las unidades de recirculación, el bulto del líquido ("pool") es mantenido dentro del evaporador. La alimentación se mezcla con el bulto del líquido ("pool") ya en el evaporador y pasa a través de la superficie de transferencia de calor. La mezcla de dos fases que está retornando al evaporador es separada en vapor y líquido. El producto es sacado de este bulto para que todo licor en el cuerpo del evaporador esté a su máxima concentración.

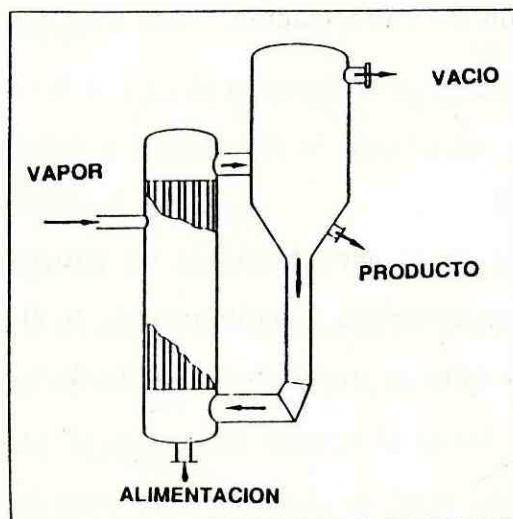


Fig. 1 Evaporador de circulación natural

Debido a que el líquido recircula en el evaporador donde hace contacto repetidas veces con la superficie de transferencia de calor, los evaporadores de circulación natural con recirculación no son adecuados para el manejo de materiales sensitivos al calor.

Cuando el líquido entra a la superficie de transferencia de calor a una concentración mayor, su densidad, viscosidad y su punto de ebullición son más altos y debido a ello, los coeficientes de transferencia de calor tienden a ser más bajos. Las ventajas son que este tipo de evaporadores pueden trabajar en un amplio rango de concentraciones y carga, y son adecuados para evaporaciones de un solo efecto.

El término vacío es usado normalmente para describir cualquier sistema a presión reducida, relativa a la presión local prevaleciente. Usualmente la presión local es simplemente la atmosférica. En las industrias de proceso químico, el grado de vacío puede ser expresado como un valor relativo o absoluto, dependiendo del proceso de vacío utilizado. Al disminuir la presión en el evaporador se observa que la temperatura de destilación disminuye significativamente, aunque se llega a un punto en el que la eficiencia de la separación se ve afectada.

Si una solución saturada caliente es introducida en un tanque mantenido a una presión más baja que la presión de vapor de la solución de alimentación, parte del solvente inmediatamente "flashea" y el líquido se enfría a una temperatura equivalente a la presión de vaporización, más una elevación en el punto de ebullición.

C. Cristalización

La cristalización es esencialmente un proceso de concentración y purificación; y es muy importante a nivel industrial. Si el proceso se lleva a cabo correctamente, se puede obtener un producto sólido de buena calidad, a menudo

provinendo de una solución impura o también puede ser un método para el refinamiento de soluciones al remover impurezas diluidas en forma sólida.

Cualquier sal puede ser cristalizada de una solución por evaporación del solvente. Se trata de obtener la mayor cantidad de cristales posible, por lo que para separar los cristales de sus "aguas madres" es deseable que tengan un tamaño uniforme.

La formación de la fase sólida se llama nucleación, y este proceso se puede llevar a cabo debido a la supersaturación. Los cristales no se forman ni crecen en una solución saturada y desaparecerán en una insaturada. La supersaturación puede ser llevada a cabo por enfriamiento o evaporación o ambos métodos, en proceso batch o continuo y en equipos de una o varias etapas.

La cristalización batch tiene su mayor aplicación en bajas tasas de producción y cuando los materiales manejados son muy caros. El ciclo en este tipo de cristalizadores está en el rango de 2 a 8 horas.

La sal se cristaliza en un sistema cúbico; sistema regular o isométrico con 23 elementos de simetría, que es el número máximo posible en un cristal.

Los cristales formados son medidos en milímetros o en micrones (μ) en tres dimensiones y en cualquier tipo de cristizador, los cristales necesitan un determinado tiempo de crecimiento. A mayor tiempo de crecimiento, mayor es el tamaño del cristal y viceversa.

Para prolongar el tiempo de crecimiento es necesario extender el ciclo del tiempo en operaciones batch o incrementar el tamaño de los balones o tanques de almacenamiento en operaciones continuas.

La velocidad de crecimiento de un cristal en una disolución depende de:

- La transferencia de sustancia a la superficie del cristal.
- El mecanismo de deposición sobre la superficie. La agitación de la solución durante la cristalización puede reducir la transferencia de sustancia a la superficie de los cristales, pero incluso cuando no haya agitación, el transporte del

producto hacia la superficie no es necesariamente el factor que determina la velocidad.

La presencia de impurezas puede también afectar la velocidad de crecimiento de los cristales, generalmente disminuyéndola. Existen dos tipos de impurezas: las producidas por el agua o líquido de disolución y las que produce el equipo en contacto con la solución.

También es importante la pureza del producto, que depende de las características físicas y químicas de la sal, del diseño del cristizador y, parcialmente, del tratamiento que se le dé al producto, luego de su separación.

Una ventaja importante de la cristalización sobre otros métodos de separación es que se pueden recuperar productos de alta pureza de soluciones impuras con bajo consumo de energía, y por consiguiente, a bajo costo.

Algunos ejemplos de productos cristalinos usados en la industria son: Cloruro de Sodio, Sacarosa, Lactosa, Acido Cítrico, Sulfato de Sodio, Cloruro de Potasio, Hidróxido de Sodio, Carbonato de Sodio, etc.

IV. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El evaporador es de la casa E.I.V.S./Corning, y está instalado en la parte norte del laboratorio. Este sistema está compuesto, en su mayoría, por piezas de vidrio, lo cual permite que los procesos de evaporación y cristalización sean estudiados y visualizados de una manera más práctica y efectiva.

Las partes de vidrio del sistema están hechas en vidrio borosilicato, correspondiente a las normas ISO 3585. Se trata de un vidrio de poca dilatación térmica que resiste el choque térmico y los químicos en una forma excelente.

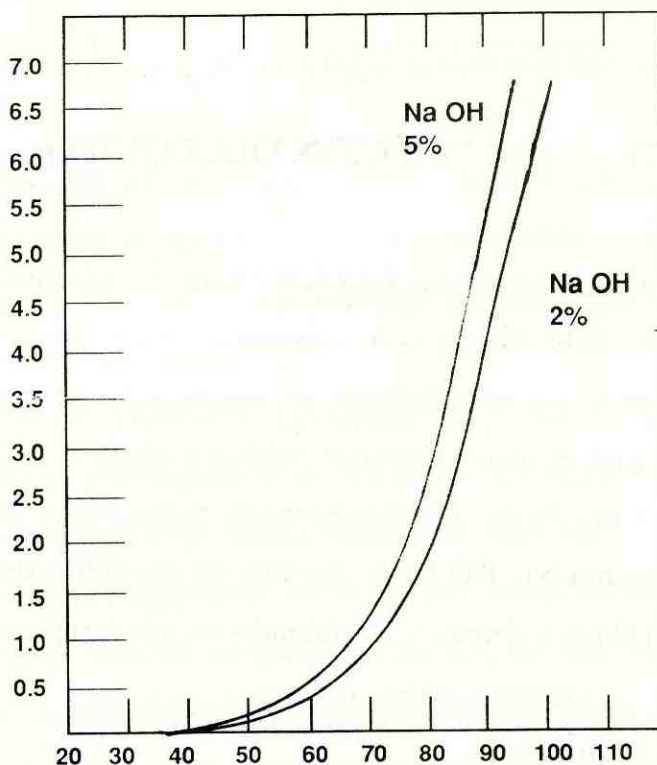
A. Resistencia química

El vidrio borosilicato es inerte a casi todos los químicos, excepto a los ácidos fluorhídrico, fosfórico y a soluciones fuertemente cáusticas.

Tabla 1

ATAQUE AL VIDRIO BOROSILICATO		
	Ataque a temp. amb.	Ataque a temp. elevadas
HF	X	X
H ₃ PO ₄	NO	X
Sol. Cáusticas	Sólo a 30% Conc.	X

x= sí es atacado, temp.=temperatura, amb=ambiente, sol.=soluciones conc.= Concentración



Gráfica 1
Ataque por el NaOH al 2% y 5% al vidrio borosilicatos

B. Propiedades térmicas

El coeficiente de dilatación lineal del vidrio borosilicatos es de $33 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ en el intervalo de temperatura de 0-300 $^\circ\text{C}$. El calor específico del vidrio borosilicatos es de 0.233 Kcal/Kg $^\circ\text{C}$; entre 25-300 $^\circ\text{C}$ la conductibilidad térmica es de 1.0 Kcal/m h $^\circ\text{C}$. Dentro del intervalo de utilización habitual puede producirse un ligero incremento de la conductibilidad térmica, debido a la elevación de la temperatura.

El peso específico del vidrio es 2.23 g/cm^3 a 20 $^\circ\text{C}$. El vidrio borosilicatos puede utilizarse sin algún inconveniente a temperaturas no mayores que 300 $^\circ\text{C}$, con la única condición que no hayan cambios bruscos de temperatura que generen un choque térmico excesivo. Las variaciones bruscas de temperatura son aceptables hasta 120 $^\circ\text{C}$ (choque térmico). Para las temperaturas menores a 0 $^\circ\text{C}$, la resistencia a la tracción del vidrio borosilicatos tiende a aumentar, pero el equipo puede trabajar a temperaturas tan bajas como -200 $^\circ\text{C}$, o sea que el rango de uso es [-200, 300] $^\circ\text{C}$.

C. Propiedades mecánicas

El valor promedio de resistencia a la ruptura instantánea debido a la tracción se sitúa en 700 Bar.

Tabla 2
Presiones de utilización para distintos diámetros de tubería en vidrio

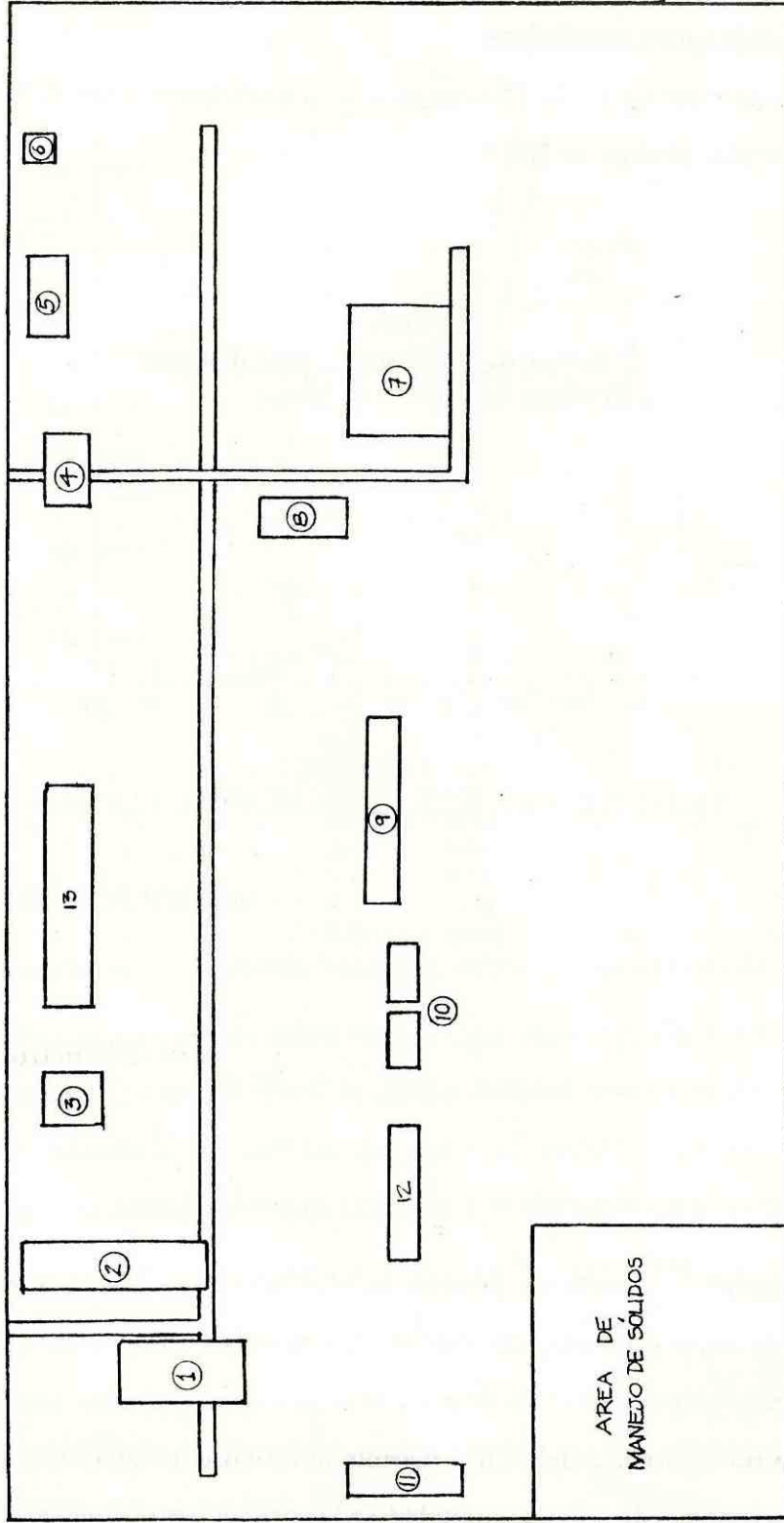
DN	Bars
15	4
25	4
40	4
50	4
80	3
100	2
150	2
200	1,2
225	1,0
300	0,7
400	0,6
450	0,5
600	0,3
800	0,3
1000	0,3

DN=Diámetro Nominal

Todos los elementos y tuberías pueden ser usados al vacío. Algunas ventajas presentadas por las tuberías de vidrio son:

- La transparencia del vidrio permite observar el recorrido total del flujo, las variaciones de coloración, debido a las reacciones químicas y los cambios del flujo por remolinos y otros.
- El vidrio permanece inerte y no comunica partículas indeseables al (los)

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. CALDERA | 8. TORRE DE ENFRIAMIENTO |
| 2. SISTEMA DE SUACIZACION DE AGUA | 9. BANCO DE CAIDAS DE PRESION |
| 3. EVAPORADOR | 10. BANCOS DE MEDIDORES DE FLUJO |
| 4. TORRE DE DESTILACION | 11. INTERCAMBIADORES DE CALOR |
| 5. TORRE DE ABSORCION | 12. SISTEMA DE ANEJO DE AIRE |
| 6. TORRE DE EXTRACCION | 13. SECADOR ROTATORIO |
| 7. SISTEMA DE FILTRACION | |



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

FIGURA 2

líquido (s) que se utiliza.

- La superficie lisa del vidrio permite fácilmente el flujo y la esterilización.
- La resistencia del vidrio a la corrosión es excepcional.

D. Tuberías

Las válvulas de paso de agua están hechas de vidrio y politetrafluoroetileno (PTFE), lo que le confiere una resistencia especial a la corrosión. Todas las válvulas están garantizadas para una larga vida útil. Su temperatura máxima de utilización es de 200°C. Todas las válvulas responden a las especificaciones ISO 3587.

E. Intercambiadores de calor

Hay dos tipos básicos: Condensadores con serpentín y tubulares. En el equipo se utilizarán sólo condensadores con serpentín, para lo cual se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

1. Los condensadores no deben utilizarse sin un adecuado líquido refrigerante que circule a través de los serpentines, de una forma continua y uniforme.
2. Los condensadores no deben utilizarse en ningún caso con vapor dentro de los serpentines.
3. La presión recomendada de servicio máximo es de 2.7 Bar, dentro de los serpentines.
4. La tubería de acceso y de salida de los serpentines debe ser flexible, para asegurar que alguna vibración no sea transmitida al vidrio y con ello evitar su rotura.
5. Los condensadores pueden montarse en serie, para formar una superficie mayor.
6. Choque térmico generalmente admisible: 120°C.

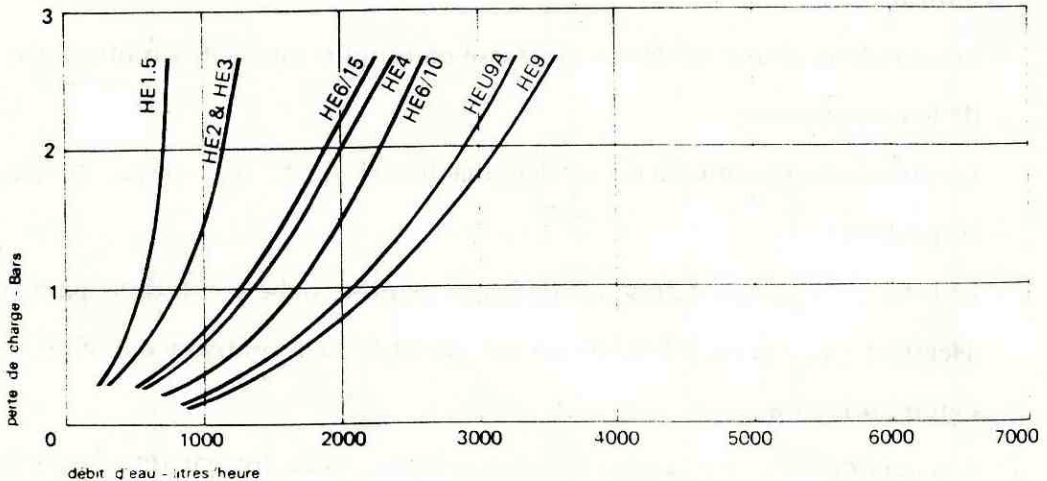
F. Transferencia de calor dentro de los intercambiadores de calor

La transferencia de calor dentro de los intercambiadores de calor con serpentín, puede tomarse en promedio como 270 Kcal / h m² °C dependiendo de las condiciones de utilización.

Algunos ejemplos de su variación debido a ciertas aplicaciones serían:

CIRCULACION FUERA DEL SERPENTIN	Vapor a Condensar	líquido	gas
CIRCULACION DENTRO DEL CERPENTIN	agua de enfriamiento	agua de enfriamiento	agua de enfriamiento
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR (Kcal / h m ₂ °C)	250	150	50

Además, el coeficiente de transferencia de calor varía dependiendo de las dimensiones del condensador.



Gráfica 2
Comportamiento del intercambiador de calor principal HE 6/15

G. Columna Empacada

Esta columna presenta, en su interior, anillos (101) tipo Raschig. Para su selección se utilizó el siguiente criterio:

La relación entre el diámetro de la columna/diámetro del empaque no puede ser inferior a 8/1. Su utilidad es la de evitar que el vapor arrastre consigo el líquido.

H. Estructura

La estructura está hecha de tubo galvanizado de 1 1/2". Para el ensamblaje de las tuberías y demás elementos, se procede de la siguiente manera:

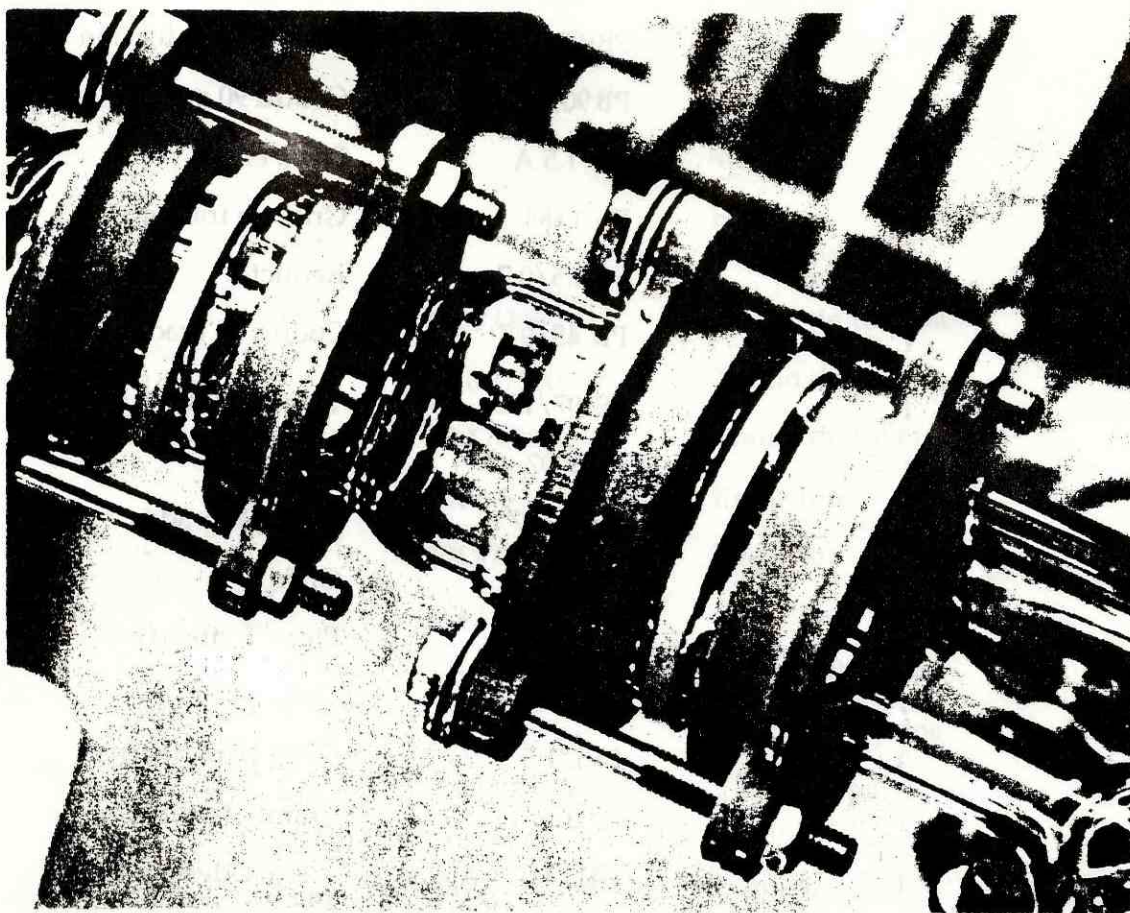


Fig. 3

Esquema para la unión de tuberías y accesorios

I. Piezas principales del equipo

Las piezas que consta el evaporador son las siguientes:

# DE PIEZAS	CODIGO	DESCRIPCION
1	CST 4/100	Elemento de columna con toma de temperatura
1	HE 6/15	Intercambiador de calor
1	HE 1.5	Intercambiador de calor
1	DP 100	Tubo sonda
1	VSD 50	Balón
3	VSU 20	Balón
1	PBRT 6/3	Codo con reducción
1	PB 90/1.5	Codo a 90 grados
1	PY 1.5 A	Pieza en Y
5	PV 1/58	Grifo de trasiego
1	PR 1.5/0.7	Reductor
1	PB 45/0.7	Codo a 45 grados
1	PS 07/150	Tramo de tubería
1	PVE 07	Grifo
1	PB 90/07	Codo 90 grados
1	PVE 1A	Grifo
1	PT 1.5A	Pieza T simétrica
1	PB 90/1 A	Codo a 90 grados
3	PVL 1.5	Grifo para ventilar
1	PS 1.5/150	Tramo de tubería
1	PTU 1.5/1 A	Pieza T desigual
1	PS 1.5/0.7	Reductor
1	PS 07/100	Tramo de tubería

# DE PIEZAS	CODIGO	DESCRIPCION
2	PT 07	Pieza T simétrica
1	PED 07	Grifo con control manual
1	FB 07	Fuelle
1	PS 07/200	Tramo de tubería
1	PBR 4/3	Codo a 90 grados con reducción
1	PBR 6/3	Codo a 90 grados con reducción
1	PS 4/200	Tramo de tubería
2	VB 3	Fuelle para vacío
1	BE 7075	Cabeza de columna
2	BE 238 A	Cabeza de columna
1	TPG 1/140	Funda termométrica
1	PS 1/300	Tramo de tubería
1	PS 0.7/500	Tramo de tubería
1	PS 1/400	Tramo de tubería
1	PR 1.5/1	Reductor
1	PR 3/1	Reductor
1	PR 3/1.5	Reductor
2	PB 90/1 A	Codo a 90 grados
1	PB 90/2	Codo a 90 grados
1	PHC 07/5	Terminal para conectar manguera
3	PV 1.5/58	Grifo de trasiego
2	PHMC 1/75	Terminal para conectar manguera

# DE PIEZAS	CODIGO	DESCRIPCION
1	HEB 6	Intercambiador de calor
1	PLR 4	Junta perforada para relleno
101	FC 10	Anillos Raschig
1	TL 6	Redistribuidor
1	CA 6/2/1.5	Cabeza de columna
1	PHC 2/1	Terminal para conectar manguera

V. DISEÑO

A. Modificaciones y Justificaciones

Originalmente, el evaporador era alimentado por dos líneas de servicio: una de agua y otra de vapor. La de agua se podía usar como alimentación al evaporador (A) y como fluido frío en los condensadores (E), (F) y (H). El agua de retorno de los condensadores es deshechada a los canales subterráneos de descarga de agua.

El líquido a evaporar se calienta por medio de vapor. En el intercambiador de calor con serpentín (B), el proceso de evaporación, en el caso del agua es el siguiente: el agua es calentada en el intercambiador con serpentín (B), al calentarse, el agua empieza a ebullición y a evaporarse en el balón principal hacia el intercambiador, en el sentido horario debido al efecto termosifón, lo cual significa una mejor recirculación, sin necesidad de utilizar una bomba para ello y hace a su vez, que se produzca una evaporación completa del agua en un tiempo determinado.

Luego, el vapor de agua producido en el balón principal es separado del agua que arrastra en la columna empacada (D), la cual tiene en su interior como empaque "anillos" tipo Raschig; luego el vapor pasa por los condensadores (E) y (F) llegando a formar el producto final líquido que sale (a través de (G)) hacia los balones de almacenamiento (I).

Además, existía el sistema J que, probablemente, podía ser usado para una separación primaria de una mezcla vapor-líquido que se podía condensar en (H) o recircular adicionalmente; este fue eliminado del nuevo sistema para simplificarlo.

El sistema fue modificado para que funcionara como evaporador-cristalizador y así poder aprovechar la transparencia del vidrio al observar claramente los procesos de evaporación y cristalización.*

* En esta sección, la descripción en letras es para el sistema original (Fig. 4) y la de números para el sistema actual (Fig. 5).

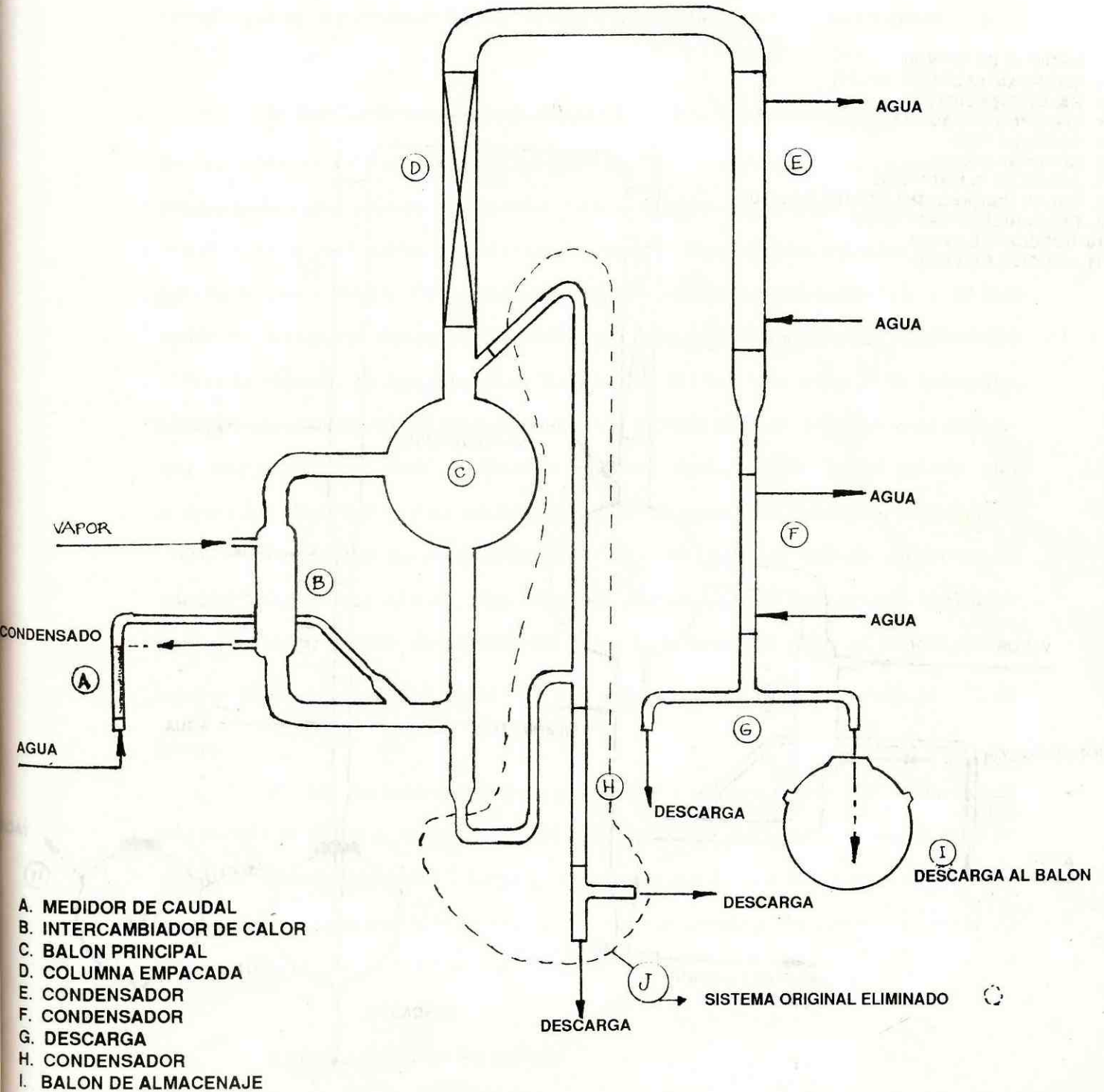
Se ensambló el nuevo sistema de la forma más sencilla posible para poder realizar estos procesos, con piezas que fueron eliminadas del sistema anterior, esto porque la mayoría de piezas son de vidrio y son tubos con medidas standard, comprados en el extranjero y de mucho valor.

Al sistema actual se le agregó otra línea de servicio: vacío en tubería de hierro galvanizado de $1/2''$; el cual fue conectado a una salida (10) con una válvula, entre los condensadores (5) y (6). Fue necesario agregar una trampa de condensado debido a que mucho líquido era aspirado hacia la bomba de vacío, por lo que hubo necesidad de poner un ramal del vacío en (1), para que el condensado fuera mantenido en el balón de almacenaje (7).

El balón de almacenamiento (8) es usado como una trampa de agua para evitar que el agua sea aspirada hacia la bomba de vacío y ésta se dañe. Se comprobó que en el punto (10) donde está la otra conexión del vacío, no es aspirada el agua hacia la bomba del vacío luego de colocar el otro ramal; por lo que la instalación era suficiente. Con el sistema de vacío se mejora la tasa de evaporación y se llevan a cabo con mayor rapidez los procesos de evaporación y cristalización, lo que es adecuado para las prácticas universitarias de operaciones unitarias. Se eliminó el sistema doble de salida de condensado y se cambió por uno simple y con un diámetro mayor, $1''$, en lugar del original, con el objeto de hacer más simple el trayecto del condensado hacia el balón y hacer que el vacío actúe de una forma más eficiente. Las entradas de vacío (10) y (11) tienen cada una, una válvula de bola y en la tubería hay un vacuómetro para medir la presión de vacío. Además, los balones (7) y (8) poseen válvulas o grifos (tres cada uno) para abrir y cerrar el paso de flujos. En la entrada de vacío (10) también hay un grifo de paso.

Los condensadores (5) y (6) fueron dejados en serie para formar así una mayor área de condensación. El sistema de evaporación propiamente dicho, quedó de una forma sencilla al suprimir el sistema J y cerrar el circuito ((1), (2), (3) y (9))

SISTEMA ORIGINAL



- A. MEDIDOR DE CAUDAL
- B. INTERCAMBIADOR DE CALOR
- C. BALON PRINCIPAL
- D. COLUMNA EMPACADA
- E. CONDENSADOR
- F. CONDENSADOR
- G. DESCARGA
- H. CONDENSADOR
- I. BALON DE ALMACENAJE

FIGURA 4

SISTEMA ACTUAL

1. MEDIDOR DE CAUDAL
2. INTERCAMBIADOR DE CALOR
3. BALON PRINCIPAL
4. COLUMNA EMPACADA
5. CONDENSADOR
6. CONDENSADOR
7. BALON DE ALMACENAJE
8. BALON USADO COMO TRAMPA DE AGUA
9. DESCARGA DE PRODUCTO
10. SUCCION DE VACIO
11. SUCCION DE VACIO

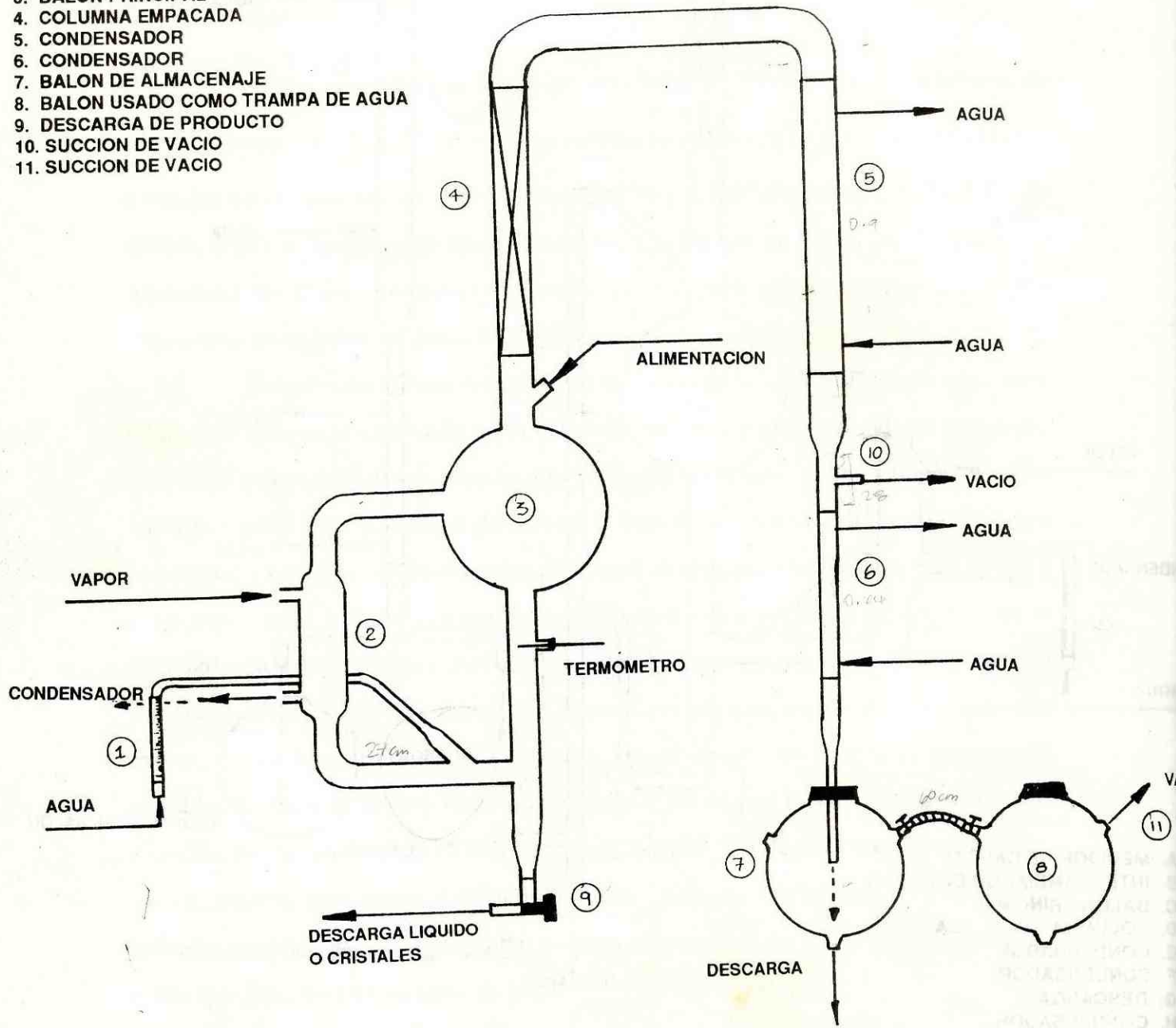


FIGURA 5

como lo muestra la Fig. 5. Es decir, que quedan las partes principales, como lo son el balón y el intercambiador con serpentín y se le colocó una descarga en (9) con una válvula que sirve para sacar líquido del sistema o cristales, si se va a cristalizar.

El sistema de agua circula en tubería de hierro galvanizado de $1/2''$ y antes de llegar al evaporador cuenta con un filtro en "Y", de carbón activado granular, que remueve del agua sólidos indeseables y carbonatos que podrían obstruir el flujo o reaccionar con los líquidos a usarse en el sistema. Presenta tres entradas de agua al sistema y una auxiliar. Dos entradas son: una para cada condensador (5) y (6) que tienen en su trayecto dos válvulas de bola, una para cada entrada a cada condensador y para la entrada de agua de alimentación. En (1) hay una válvula de asiento y, además, una entrada de agua auxiliar con una válvula de bola, a la que se le conecta una manguera para poder facilitar la limpieza, tanto interior como exterior del evaporador. También hay un medidor de caudal de agua en la entrada al sistema (1).

En la línea de entrada de vapor hay colocada una válvula reductora de presión y luego una válvula reguladora de presión con un manómetro indicador para graduar la presión de entrada del vapor al sistema. El vapor es conducido en tubería de hierro galvanizado de $1/2''$ con aislamiento de fibra de vidrio de $1''$ de grosor.

Al salir del intercambiador de calor con serpentín, dentro de la tubería hay una mezcla de vapor-condensado y para evitar el escape del vapor hay una trampa de vapor de "cubeta invertida" y luego la tubería termina en una salida para recolectar y medir el condensado. Además, se colocó un sistema de control general de temperatura, el cual nunca había sido usado.

C. Sistema eléctrico de control

Este es un sistema cerrado de control de retroalimentación ("*feedback*"), que significa que la variable a controlar, en este caso, la temperatura es medida y el

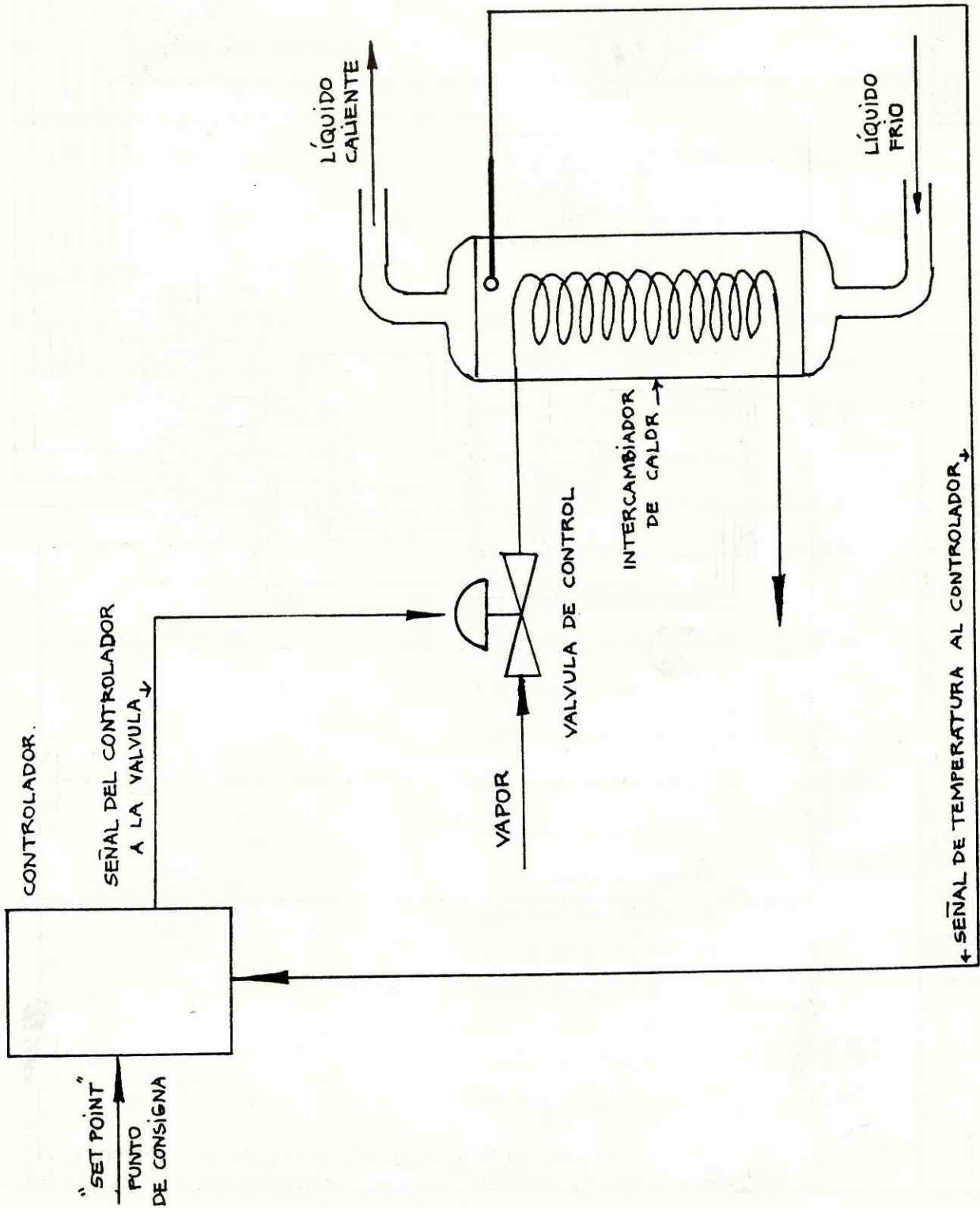


Fig. 6
Sistema cerrado de control retroalimentado ("Feedback")

Echelle

Date

27 06 83

Destiné

Ingenieur

Matière

Client

DEL VALLE 3E904

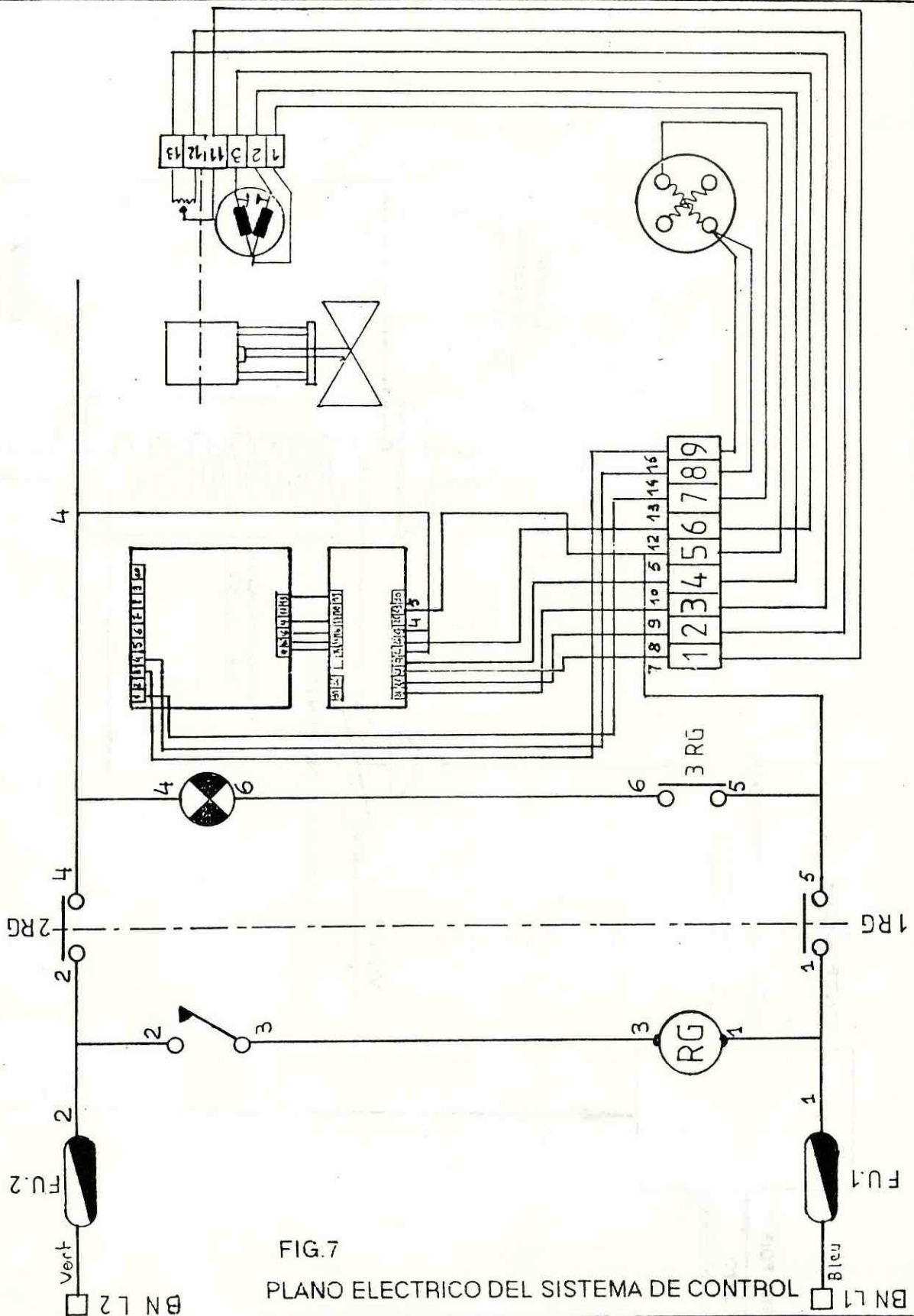


FIG. 7

PLANO ELECTRICO DEL SISTEMA DE CONTROL

REGULATION T6

B.E. 83067



L'ÉQUIPEMENT INDUSTRIEL EN VERRS SPÉCIAUX
 23, quai ALFRED SISLEY - 92390 VILLENEUVE LA GARENNE
 Tél : 752 - 36 - 80 - Télex 62 607

D.P. REG

D. Costos del equipo

En los costos del equipo se incluyen la compra de accesorios y materiales usados en el evaporador y el sistema de control.

INGRESOS

Financiamiento de la Universidad del Valle de Guatemala
Q1942.93

EGRESOS

Materiales eléctricos	Q186.45
Tubería y accesorios	Q102.02
Filtro de carbón activado	Q 48.00
Cerradura electromecánica de seguridad e indicador luminoso para el sistema de control	Q419.00
4 toneles plásticos para mezclas y almacenaje	Q200.00
3 Llaves mixtas (#10,12,13) para uso del evaporador	Q108.00
Válvulas de bola	Q 67.50
Aporte para compra de agitador eléctrico a usarse como equipo de premezcla para el evaporador (encargado Ing. Gil)	Q.750.00
Varios	Q 61.96

TOTAL EGRESOS: Q1942.93

TOTAL INGRESOS: Q1942.93

VI. RESULTADOS

A. Pruebas en el equipo

1. Calibración de Balones

a. Calibración del balón de evaporación

Distancia marcada entre		kg de agua
1	- 2	0.8
2	- 3	2.1
3	- 4	3.9
4	- 5	7.0
5	- 6	11.5
6	- 7	15.4
7	- 8	13.8
8	- 9	4.4
9	- 10	15.7
10	- 11	40.4
11	- 12	<u>44.1</u>
		159.1

2. Balances de masa y energía

Para los balances de masa y energía hay que tomar en cuenta lo siguiente:

Se asume que,

1. No hay pérdida de calor del evaporador hacia los alrededores.
2. La solución a evaporar se mezcla violentamente en el evaporador, lo que la hace una solución homogénea. Esta suposición es real en el caso de evaporadores de circulación natural, como en este caso.

3. El punto de ebullición de la solución es a la concentración final deseada y a la presión de vacío existente. Aquí no se toman en cuenta los efectos de cabeza hidráulica, debido a que en este evaporador tanto la profundidad del líquido como la aceleración son pequeñas.
4. El vapor producido como V, es vapor de agua puro a la temperatura de la solución hirviendo y a una presión de 5.84 psia.
5. El condensado formado, D, es un líquido saturado a la presión del vapor de agua. Tiene lugar después un subenfriado, pero se puede despreciar su contribución al flujo de calor.

Tabla 2: Datos reales para el balance de masa y energía en el evaporador.

# Prueba	Tiempo (h)	Presión de vacío (Bar)	Agua evaporada (kg)	Agua condensada (kg)	Volumen consumido (kg agua)
A	1	-0.61	15.2	26.3	12.4
B	1	-0.62	12.5	21.1	12.3
C	1	-0.60	11.9	19.3	11.7
D	1.25	-0.60	18.8	29.4	30.4
		(psia)	(lb)	(lb)	(lb agua)
A	1	5.85	33.44	57.86	27.28
B	1	5.70	27.50	46.42	27.06
C	1	5.99	26.18	42.24	25.74
D	1.25	5.99	41.36	64.68	66.88

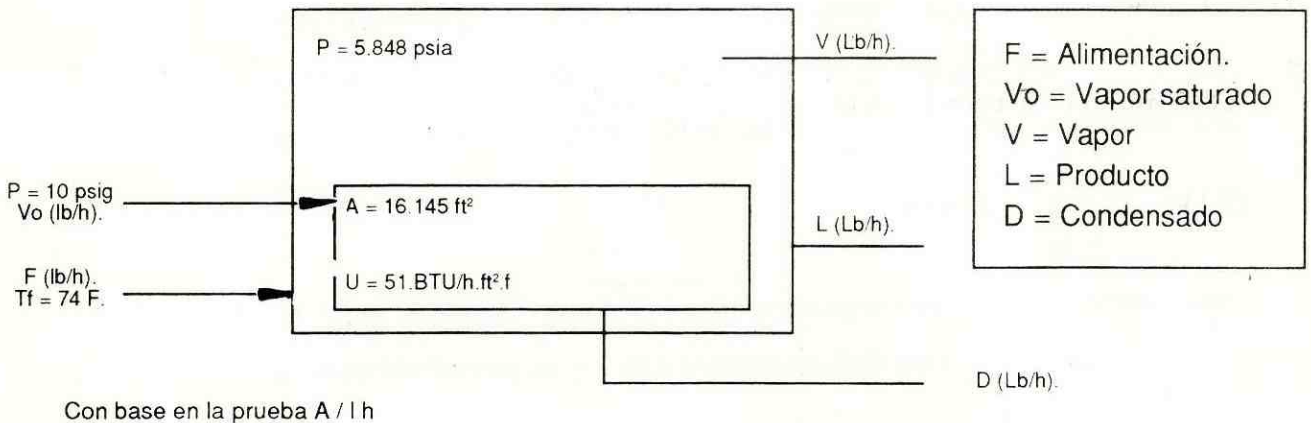
Cálculo de muestra (para A):

$$\frac{14.504 \text{ psig}}{1 \text{ Bar}} * -0.61 \text{ Bar} = -8.847 \text{ psi}$$

$$-8.847 \text{ psi} + 14.696 \text{ psi} = 5.848 \text{ psia.}$$

$$15.2 \text{ kg} * \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ lb}} = 33.44 \text{ lb}$$

BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA CON AGUA

**Balance total de masa:**

Base: 1 h

$$(1) \quad F + V_o = V + L + D$$

$$\& (1.1) \quad V_o = D$$

entonces sustituyendo los datos de tabla 2 en (1), tomando en cuenta (1.1), tenemos:

$$294.36 + 57.86 = 27.28 + 267.08 + 57.86$$

$$352.22 = 352.22$$

Balance total de energía:

$$(2) \quad (V_o)(\lambda_o) + F(h_f) = (V)(H_V) + (L)(h_L)$$

$$h_f: T = 73.4F \quad h_f = 41.43 \text{ BTU/lb}$$

$$\lambda_o: P_v = 10 \text{ psig} + 14.696 \text{ psig} = 24.696 \text{ psia}$$

donde,

 λ_o = calor latente de evaporación (BTU/lb).

 h_f = entalpía de alimentación (BTU/lb).

 H_v = entalpía del vapor (BTU/lb).

 H_L = entalpía del producto (BTU/lb).

$$T_v = 239.3 F$$

$$\lambda_{o, \text{ vap}} = 952.66 \text{ BTU/lb}$$

$$H_v: P = 5.848 \text{ psia}$$

$$T_{v, \text{ Vap}} = 168.95 F$$

$$H_V = 1133.78 \text{ BTU/lb.}$$

Los datos de entalpías y calor latente de evaporación fueron tomados de McCabe Apéndice 8.

$$h_L: P = 5.848 \text{ psia}$$

$$T_{L, \text{Liq}} = 168.95 \text{ F}$$

$$h_l = 136.85 \text{ BTU/lb.}$$

En el siguiente cuadro se resumen los datos calculados anteriormente:

F = 294.36 lb	Tf = 73.4 F	$h_{F \text{ liq}}$	=	41.43 BTU/lb
V _o = 57.86 lb	T _{v,o} = 239.3 F	$v_{o, \text{vap}}$	=	952.66 BTU/lb
V = 27.28 lb	T _v = 168.9 F	$h_{V \text{ vap}}$	=	1133.78 BTU/lb
L = 267.08 lb	T _l = 168.9 F	$h_{L \text{ liq}}$	=	136.85 BTU/lb
D = 57.86 lb	T _d = 125.6 F			

Sustituyendo datos en (2) tenemos:

$$\begin{aligned}
 (57.86) (952.66) + (294.36) (41.43) &= (27.28) (1133.78) + (267.08) (136.85) \\
 55,120.91 + 12,195.33 &= 30,929.52 + 36,549.90 \\
 67,216.24 &= 67,479.42 \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 99.6\% \\
 \text{(BTU)} &= \text{(BTU)}
 \end{aligned}$$

Ecuación de Transferencia de Calor:

$$(3) \quad (V_o) (\rho_o) = U (A) (\Delta T) = Q$$

$$U = 51.2 \text{ BTU/h.ft.F}$$

$$A = 16.145 \text{ ft}$$

donde,

U = Coeficiente global de transferencia de Calor (BTU/h.ft.F)

A = Area de Transferencia de Calor (ft)

T = Diferencia de Temperaturas

Q = Calor transferido (BTU/h).

sustituyendo datos en (3), tenemos:

$$\begin{aligned}
 (57.86 \text{ lb/h}) (952.66 \text{ BTU/lb}) &= (51.2 \text{ BTU/h.ft.F}) (16.145 \text{ ft}) (239.3 \text{ F} - 168.9 \text{ F}) \\
 55,120.91 \text{ BTU/h} &= 58,194.33 \text{ BTU/h} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 94.7\%
 \end{aligned}$$

$$\frac{\text{lb de vapor producido/h}}{\text{lb agua condensada / h}} = \frac{27.28 \text{ lb/h}}{57.86 \text{ lb /h}} = 0.47 \frac{\text{lb vapor}}{\text{lb agua condensada / h}}$$

**BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA CON CLORURO
DE SODIO (Na Cl)**

Datos:

Presión de vacío = -0.61 Bar = 5.84 psia.

tiempo = 1.9 h.

Agua evaporada = 27.1 kg = 59.62 lb.

Agua condensada = 45.5 kg = 100.10 lb

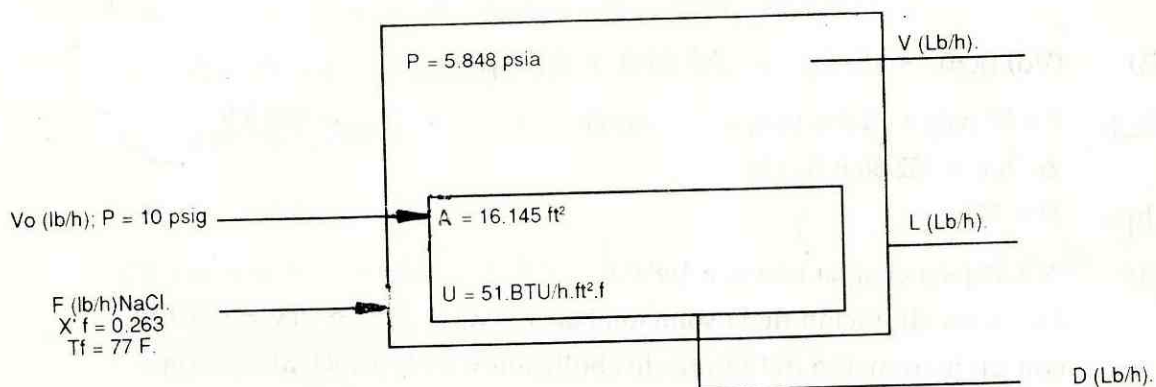
Volumen final = 102.8 kg = 226.50 lb.

Volumen inicial = 129.0 kg = 283.80 lb

Diferencia de volumen = 26.2 kg = 57.55 lb.

Temperatura ambiente = 77 F.

Presión del vapor = 10 psig.



Balance total de masa:

$$(1) \quad F + V_o = V + L + D$$

$$\& (1.1) \quad V_o = D$$

Sustituyendo en (1) y (1.1)

$$\begin{aligned} 283.8 + 100.1 &= 57.55 + 226.25 + 100.1 \\ 383.9 &= 383.9 \end{aligned}$$

Balance para el Cloruro de Sodio (NaCl):

$$(2) \quad (F)(X'f) = (L)(X'l)$$

donde,

$X'f$ = Concentración
inicial de NaCl=0.263

$X'l$ = Concentración final
de NaCl

Sustituyendo en (2),

$$\begin{aligned} (283.8)(0.263) &= (226.25)(X'l) \\ X'l &= 0.333 \end{aligned}$$

Balance total de energía:

$$(3) \quad (V_o)(\lambda_o) + (F)(h_f) = (V)(H_v) + (L)(h_L)$$

$$\begin{aligned} \lambda_o: P &= 10 \text{ psig} + 14.696 \text{ psig} = 24.696 \text{ psia} \\ &\& \lambda_o = 952.66 \text{ BTU/lb} \end{aligned}$$

$$T_{v_o} = 239.3 \text{ F}$$

$$h_f: T_f = 77 \text{ F}$$

$$H_v: \text{ A } 5.84 \text{ psia el agua hierve a } 168.9 \text{ F}$$

Punto de ebullición de la solución NaCl-H₂O al 33% \Rightarrow $T_v = 189.9 \text{ F}$
con un incremento del punto de ebullición = 21 F (BPR), ahora con

$$T_v = 189.9 \text{ F} \Rightarrow H_{v, \text{ vap}} = 1142 \text{ BTU/lb.}$$

$$h_L: T_l = 189.9 \text{ F}$$

Los datos de entalpías y calor latente de evaporación del agua fueron tomados de McCabe. Apéndice 8; el de incremento del punto de ebullición fue tomado de Perry. (Figura 11-23.)

En el siguiente cuadro se resumen los datos calculados anteriormente:

$$\begin{array}{ll}
 F = 283.8 \text{ lb} & T_f = 77.0 \text{ F} \\
 V_o = 100.1 \text{ lb} & T_{V_o} = 239.3 \text{ F} \quad \lambda_{o, \text{ vap}} = 952.66 \text{ BTU/lb} \\
 V = 57.55 \text{ lb} & T_v = 189.9 \text{ F} \quad H_{v, \text{ vap}} = 1142.00 \text{ BTU/lb} \\
 L = 226.25 \text{ lb} & T_l = 189.9 \text{ F} \\
 D = 100.1 \text{ lb} & T_d = 123.8 \text{ F}
 \end{array}$$

Para calcular las entalpías de la alimentación y el producto, debido a que no hay datos disponibles para salmueras saturadas de cloruro de sodio se hizo la siguiente aproximación:

$$(4) \quad H = m \cdot C_p (\Delta T)$$

y para encontrar el C_p se tomó en cuenta la ecuación de Kopp:

$$(5) \quad C_p = m_1 C_{p1} + m_2 C_{p2} + m_3 C_{p3} + \dots + m_n C_{p,n}$$

& C_p de NaCl (s) = 0.214 BTU/lb F

Entonces sustituyendo en (5), para la alimentación tenemos:

$$C_p = (0.737) (1.0) + (0.236) (0.214)$$

$$C_p = 0.793 \text{ BTU/lb} \cdot \text{F}$$

y para el producto:

$$C_p = (0.666) (1.0) + (0.333) (0.214)$$

$$C_p = 0.731 \text{ BTU/lb} \cdot \text{F}$$

Ahora sustituyendo estos dos datos en (4) tenemos:

$$H_f = (283.8 \text{ lb}) (0.793 \text{ BTU/lb} \cdot \text{F}) (77.0 \text{ F} - 73.4 \text{ F})$$

$$H_f = 810.19 \text{ BTU}$$

$$H_l = (226.25 \text{ lb}) (0.731 \text{ BTU/lb} \cdot \text{F}) (189.9 \text{ F} - 77.0 \text{ F})$$

$$H_l = 18,672.39 \text{ BTU}$$

Manual de operación

Este es un manual de uso general para el evaporador-cristalizador. Es bastante amplio para adaptarse a cualquier tipo de práctica.

- a. Asegurarse que las válvulas de entrada de vapor y vacío estén cerradas.
- b. Introducir el líquido o mezcla que se va a evaporar al balón principal, por la tubería abierta en la parte superior.
 - b1. Cerrar el sistema, colocando una válvula adecuada; cerrándola, apretando poco a poco cada uno de los tres tornillos de la brida (flange), como en la Fig. 3.
- c. Asegurarse que haya vapor en la caldera, y agua para el enfriamiento.
- d. Conectar la bomba de vacío.
- e. Conectar el controlador de temperatura, colocando el botón en posición de encendido.
- f. Fijar la temperatura deseada, con el botón de punto de consigna (Set Point). Tomar nota que el punto de consigna debe ser una temperatura mayor que el máximo punto de ebullición que se quiera alcanzar con la solución, para que la válvula permanezca abierta durante toda la operación.
- g. Abrir las válvulas de agua de enfriamiento para los condensadores, verificando que el agua tenga salida (en el desagüe) y su circulación sea normal.
 - g1. Abrir la llave de vapor hasta 10 psi.
- h. Abrir las llaves de vacío (totalmente abiertas)
- i. Controlar la temperatura, y si hay que modificarla, usar el controlador en manual para ello, variando el punto de consigna (Set Point).
 - i1. Medir el volumen de vapor condensado.
 - i2. Medir volumen de agua o líquido evaporado y al llenarse el balón de almacenamiento, si se desea continuar con la evaporación, hay que vaciarlo. Para ello, es necesario cerrar las llaves de vacío y luego sacar el líquido por la válvula

de abajo del balón y volver a abrir las llaves de vacío. Esto se debe hacer lo más rápido posible (todo el procedimiento).

- i3. Verificar lectura del vacuómetro.
- j. Al terminar la evaporación, cerrar las llaves de vapor, vacío y agua, y desconectar bomba de vacío.
 - j1. Sí se está cristalizando, no evaporar toda el agua del balón principal para evitar formación de costras y suciedad.
- k. Dejar enfriar la solución en el balón principal para evitar choque térmico (Aproximadamente 2 horas).
- l. Limpiar el evaporador interior y exteriormente con agua corriente, para mantenerlo en buen estado; con **CUIDADO DE NO MOJAR EL SISTEMA ELECTRICO. ESTO SE DEBE HACER LUEGO DE CADA PRACTICA, PARA EVITAR LA CORROSION DE LAS PARTES METALICAS DEL EQUIPO.**

VII. REGISTRO DEL EQUIPO

Nombre del equipo: Evaporador - Cristalizador de simple efecto.

Marca: E.I.V.S./ Corning

Fabricante: E.I.V.S./ Corning

Dirección: 23 Quai Alfred-Sisley 92390 Villeneuve-La -Garenne, Francia

Representante: CRISQUI; Plaza 6-26, Z 9

Departamento perteneciente: Química

Sección: Ingeniería Química

Costo (nuevo) : US\$22,500 (incluyendo sistema eléctrico de control)

Fecha recibido: 1981

Fecha instalado: 1983

Fecha rediseño: 1991

Fecha puesta en marcha: julio 1991

Uso actual: Evaporador-cristalizador

Ancho: 1.5 m

Area ocupada: 1.2 m²

Largo: 0.8 m

Volumen ocupado: 3.6 m³

Altura: 3.0 m

Peso actual aproximado: 270 kg (incluyendo la armazón)

Partes principales y accesorios en la armazón:

1 balón para evaporación de 50 litros

2 balones de almacenaje de 20 litros cada uno

1 intercambiador de calor de 1.5 m² de área

- 1 condensador de 0.5 m^2 de área
- 1 condensador de 0.2 m^2 de área
- 1 columna empacada con anillos tipo Raschig
- 1 medidor de caudal de vidrio
- accesorios varios
- 1 electroválvula
- 1 detector de temperatura

Piezas principales en bodega:

- 1 balón de 20 litros
- 1 condensador de 0.5 m^2 de área
- accesorios varios

Herramientas:

- Llave para ajuste de la estructura tipo Allen
- Llave #10 mixta (Stanley)
- Llave #12 mixta (Stanley)
- Llave #13 mixta (Stanley)

Motor:

de la electroválvula 220 V 1.1 W 0.09 A 50 Hz

VIII. CONCLUSIONES

- A. Se puso a funcionar el evaporador-cristalizador de la forma que se deseaba en los objetivos y, ya se está usando en prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias II.
- B. Se obtuvo cristales finos de Cloruro de Sodio (NaCl), a una concentración de la solución de 33% y en un tiempo promedio de 1.8 horas, a una presión de 5.84 psia. (-0.61 Bar de vacío).
- C. Se obtuvo una tasa promedio de evaporación de 30.3 lb (13.7 kg) de agua evaporada, por hora de operación.
- D. Se obtuvo una razón promedio de 0.61 libras de vapor producido por libra de agua condensada, por hora de operación.
- E. Se obtuvo también un consumo de vapor procedente de la caldera (promedio) de 61 libras, por hora de operación del evaporador.

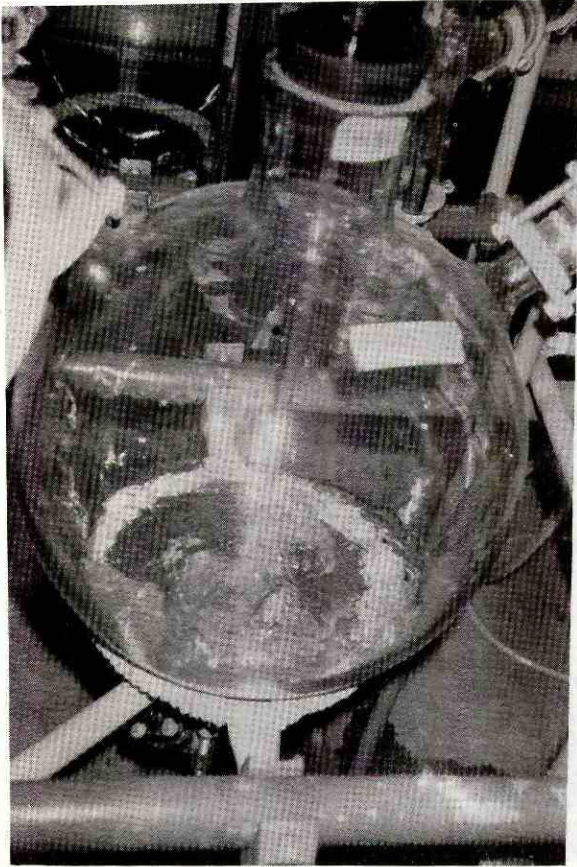
IX. RECOMENDACIONES

- Diseñar e instalar un sistema para trabajar en continuo, pero habría que diseñar antes varias prácticas que se adecuen al tipo de bomba a comprar, y diseñar también un tanque de mezcla para la preparación de la alimentación.

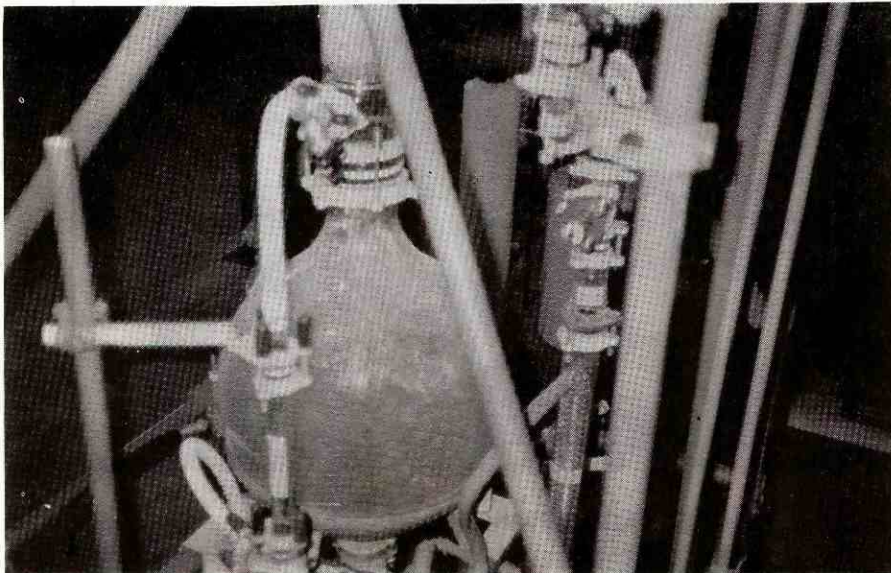
- Evaluar una forma alternativa para usar el sistema eléctrico de control en automático.

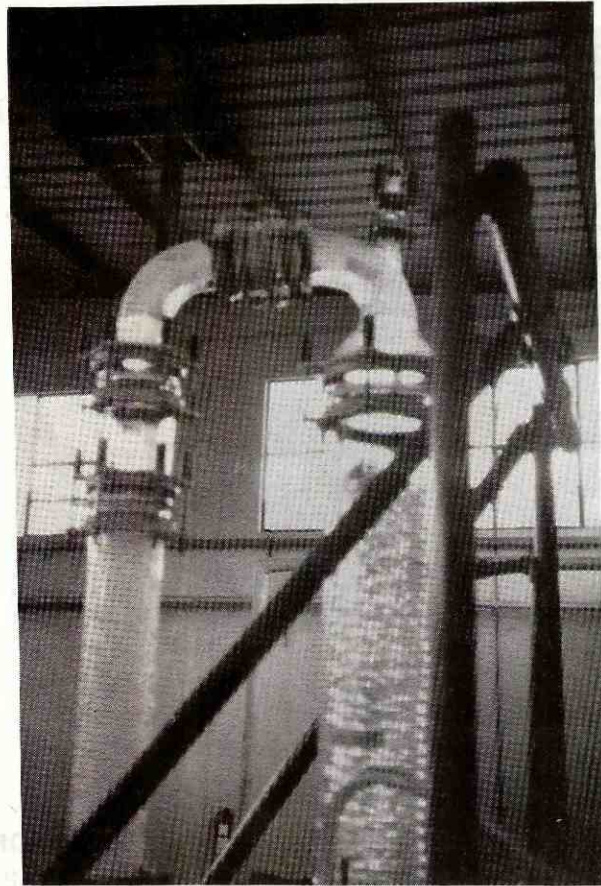
- Al adquirir nuevo equipo para el laboratorio, evaluar ventajas y desventajas de su diseño y construcción local versus su importación. Cuidar que tal equipo sea más bien de tipo industrial, a escala adecuada, que tipo laboratorio pequeño.

FOTOGRAFIAS DEL
EQUIPO MONTADO

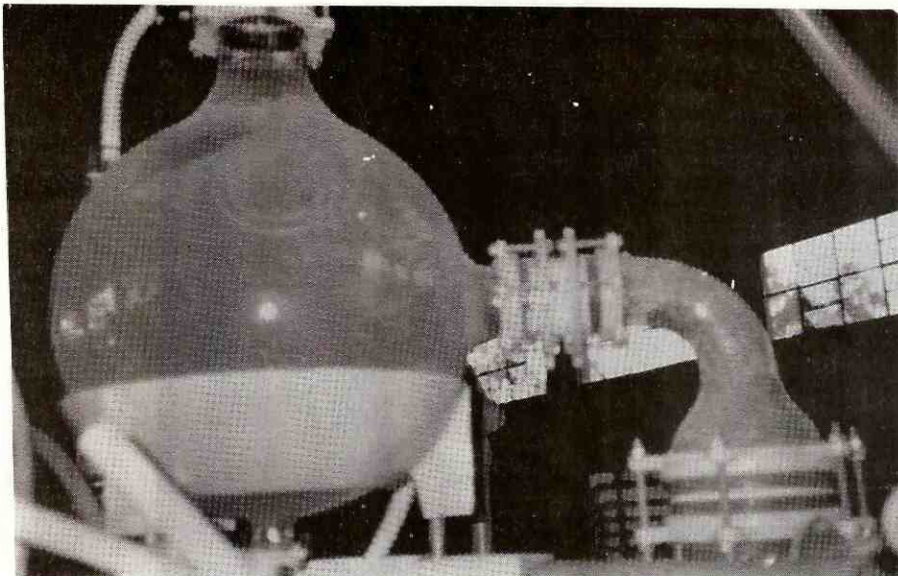


EL EVAPORADOR CRISTALIZADOR
TRABAJANDO CON NaCl





VISTA LATERAL DEL BALON PRINCIPAL



VISTA DEL CONDENSADOR PRINCIPAL (Derecha)
Y EL "EMPAQUE" DE LA TORRE DEL
EVAPORADOR (Izquierda)



X. BIBLIOGRAFIA

- Banforth, A.W. Industrial Crystallization. Mansell LTB, London England, 1961. Pp.260.
- Bautista, J. "Supervisión de la Instalación del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala". Guatemala, 1981 Pp. 90
- Bennett, C. & J. Meyers. Momentum, Heat & Mass Transfer. New York, U.S.A. McGraw-Hill. 1962. Pp.557.
- Bennett, R. "Matching Crystallizer to Material". Chemical Engineering. (New York, U.S.A.) 1984. Pp.119-127.
- Bhatia, M.V. Transfer Operations in Process Industries. Technomic Publishing Company. P.A. U.S.A. 1983. Pp. 276.
- Brennan, J.G. et.al. Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos. Zaragoza, España. Edit. Acribia, 1970. Trad. José Alemán Pp. 421.
- Clarke, L. & R. Davidson. Manual for Process Engineering Calculations. 2nd. ed. New York, U.S.A. McGraw-Hill Book Company. 1962. Pp. 492.
- Foust, A. et.al. Principles of Unit Operations. New York, U.S.A. John Wiley & Sons. 1960. Pp. 768.
- Ginkell, S. & D. L. Olander. "Stick to the Basics of Pilot Plant Design". Chemical Engineering Progress. January, 1991. Pp. 27-41.
- Himmelblau, D. M. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. México, D.F. Cía. Editorial Continental, S.A. 1974. Traducción Antonio Eroles. Pp. 583.
- Kaufmann, D.W. Sodium Chloride. Reinhold Publishing Corporation. New York, U.S.A. 1960. Pp. 407.
- L'Equipment Industriel En Verres Speciaux & Corning Process Systems. Evaporador de Simple Efecto. La-Garenne, Francia. 1978.
- McAdams, W.H. Heat Transmission. 3rd. Ed. New York, U.S.A. McGraw-Hill Book Company. 1954. Pp. 532.
- McCabe, W.L. et. al. Unit Operations of Chemical Engineering. 4th. Ed. New York, U.S.A. McGraw-Hill Book Company. 1985. Pp. 960.

- Mehra, D.K. "Selecting Evaporators" Chemical Engineering. 1986.
Pp. 56-72.
- Mullin, S.W. Crystallization. Butterworths & Company.
London, England. 1961. pp. 266.
 - Nisenfeld, A.E. Industrial Evaporators. Instrument Society of America.
North Carolina, U.S.A. 1985. Pp. 189.
 - Perry, R.H. & D. W. Green. Chemical Engineer's Handbook. 6th. Ed.
New York, U.S.A. McGraw-Hill Book Company. 1985. Pp. 2336
 - Peters, M.S. & K.D. Timerhaus. Plant Design & Economics for Chemical
Engineers. 3rd. Ed. McGraw-Hill Book Company. New York,
U.S.A. 1980. Pp. 973.
 - Siemens. "Auxiliares de Mando y Señalización". Equipo Eléctrico
Industrial. Siemens A.G. Guatemala, 1988.
 - Treyball, R. Mass Transfer Operations. New York, U.S.A. McGraw-Hill
Book Company. 1955. Pp.666.
 - White,H. Introduction to Industrial Chemistry. New York, U.S.A.
John Wiley & Sons. 1986. Pp. 146.

ANEXOS

Tablas de vapor

(Propiedades termodinámicas del agua)

Fuente de Información: Combustion Engineering, Inc.

Presión absoluta = presión atmosférica - vacío.

Las columnas de vacío y barométrica pueden corregirse a mercurio a 32°F restando $0.00009 \times (t - 32) \times$ la altura de la columna, donde t es la temperatura de la columna en °F.

1 plg de mercurio a 32°F = 0.4912 lb/plg².

Ejemplo:

La lectura del barómetro es de 30.17 plg a 70°F. La lectura de la columna de vacío es de 28.26 plg a 80°F. Presión en lb = $(30.17 - 0.00009 \times 38 \times 30.17) - (28.26 - 0.00009 \times 48 \times 28.26) = 1.93$ plg de mercurio a 32°F.

Temperatura de saturación (según la tabla) = 100°F.

TABLA C.1. VAPOR SATURADO: TABLA DE TEMPERATURAS

Temp. °Fahr. t	Presión absoluta		Volumen específico			Entalpía		
	lb/plg ² p	plg Hg 32°F	Líqu. sat. v _l	Evap. v _g	Vapor sat. v _g	Líqu. sat. h _f	Evap. h _{fg}	Vapor sat. h _g
32	0.0886	0.1806	0.01602	3305.7	3305.7	0	1075.1	1075.1
34	0.0961	0.1957	0.01602	3060.4	3060.4	2.01	1074.9	1076.0
36	0.1041	0.2120	0.01602	2836.6	2836.6	4.03	1072.9	1076.9
38	0.1126	0.2292	0.01602	2632.2	2632.2	6.04	1071.7	1077.7
40	0.1217	0.2478	0.01602	2445.1	2445.1	8.05	1070.5	1078.6
42	0.1315	0.2677	0.01602	2271.8	2271.8	10.06	1069.3	1079.4
44	0.1420	0.2891	0.01602	2112.2	2112.2	12.06	1068.2	1080.3
46	0.1532	0.3115	0.01602	1965.5	1965.5	14.07	1067.1	1081.2
48	0.1652	0.3364	0.01602	1829.9	1829.9	16.07	1065.9	1082.0
50	0.1780	0.3624	0.01602	1704.9	1704.9	18.07	1064.8	1082.9
52	0.1918	0.3905	0.01603	1588.4	1588.4	20.07	1063.6	1083.7
54	0.2063	0.4200	0.01603	1482.4	1482.4	22.07	1062.5	1084.6
56	0.2219	0.4518	0.01603	1383.5	1383.5	24.07	1061.4	1085.5
58	0.2384	0.4854	0.01603	1292.7	1292.7	26.07	1060.2	1086.3
60	0.2561	0.5214	0.01603	1208.1	1208.1	28.07	1059.1	1087.2
62	0.2749	0.5597	0.01604	1129.7	1129.7	30.06	1057.9	1088.0
64	0.2949	0.6004	0.01604	1057.1	1057.1	32.06	1056.8	1088.9
66	0.3162	0.6438	0.01604	989.6	989.6	34.06	1055.7	1089.8
68	0.3388	0.6898	0.01605	927.0	927.0	36.05	1054.5	1090.6
70	0.3628	0.7387	0.01605	868.9	868.9	38.05	1053.4	1091.5
72	0.3883	0.7906	0.01606	814.9	814.9	40.04	1052.3	1092.3
74	0.4153	0.8456	0.01606	764.7	764.7	42.04	1051.2	1093.2
76	0.4440	0.9040	0.01607	718.0	718.0	44.03	1050.1	1094.1
78	0.4744	0.9659	0.01607	674.4	674.4	46.03	1048.9	1094.9
80	0.5067	1.032	0.01607	633.7	633.7	48.02	1047.8	1095.8
82	0.5409	1.101	0.01608	595.8	595.8	50.02	1046.6	1096.6
84	0.5772	1.175	0.01608	560.4	560.4	52.01	1045.5	1097.5
86	0.6153	1.253	0.01609	527.6	527.6	54.01	1044.4	1098.4
88	0.6555	1.335	0.01609	497.0	497.0	56.00	1043.2	1099.2
90	0.6980	1.421	0.01610	468.4	468.4	58.00	1042.1	1100.1
92	0.7429	1.513	0.01611	441.7	441.7	59.99	1040.9	1100.9
94	0.7902	1.609	0.01611	416.7	416.7	61.98	1039.8	1101.8
96	0.8403	1.711	0.01612	393.2	393.2	63.98	1038.7	1102.7
98	0.8930	1.818	0.01613	371.3	371.3	65.98	1037.5	1103.5
100	0.9487	1.932	0.01613	350.8	350.8	67.97	1036.4	1104.4
102	1.0072	2.051	0.01614	331.5	331.5	69.96	1035.2	1105.2
104	1.0689	2.176	0.01614	313.5	313.5	71.96	1034.1	1106.1
106	1.1338	2.308	0.01615	296.5	296.5	73.95	1033.0	1107.0
108	1.2020	2.447	0.01616	280.7	280.7	75.94	1032.0	1107.9

v = volumen específico, pies³/lb h = entalpía, Btu/lb

TABLA C.1. (Continuación)

Temp. °Fahr.	Presión absoluta		Volumen específico			Entalpía		
	lb/plg ² <i>p</i>	plg Hg 32°F	Liq. sat. <i>v_f</i>	Evap. <i>v_{fg}</i>	Vapor sat. <i>v_g</i>	Liq. sat. <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Vapor sat. <i>h_g</i>
110	1.274	2.594	0.01617	265.7	265.7	77.94	1030.9	1108.8
112	1.350	2.749	0.01617	251.6	251.6	79.93	1029.7	1109.6
114	1.429	2.909	0.01618	238.5	238.5	81.93	1028.6	1110.5
116	1.512	3.078	0.01619	226.2	226.2	83.92	1027.5	1111.4
118	1.600	3.258	0.01620	214.5	214.5	85.92	1026.4	1112.3
120	1.692	3.445	0.01620	203.45	203.47	87.91	1025.3	1113.2
122	1.788	3.640	0.01621	193.16	193.18	89.91	1024.1	1114.0
124	1.889	3.846	0.01622	183.44	183.46	91.90	1023.0	1114.9
126	1.995	4.062	0.01623	174.26	174.28	93.90	1021.8	1115.7
128	2.105	4.286	0.01624	165.70	165.72	95.90	1020.7	1116.6
130	2.221	4.522	0.01625	157.55	157.57	97.89	1019.5	1117.4
132	2.343	4.770	0.01626	149.83	149.85	99.89	1018.3	1118.2
134	2.470	5.029	0.01626	142.59	142.61	101.89	1017.2	1119.1
136	2.603	5.300	0.01627	135.73	135.75	103.88	1016.0	1119.9
138	2.742	5.583	0.01628	129.26	129.28	105.88	1014.9	1120.8
140	2.887	5.878	0.01629	123.16	123.18	107.88	1013.7	1121.6
142	3.039	6.187	0.01630	117.37	117.39	109.88	1012.5	1122.4
144	3.198	6.511	0.01631	111.88	111.90	111.88	1011.3	1123.2
146	3.363	6.847	0.01632	106.72	106.74	113.88	1010.2	1124.1
148	3.536	7.199	0.01633	101.82	101.84	115.87	1009.0	1124.9
150	3.716	7.566	0.01634	97.18	97.20	117.87	1007.8	1125.7
152	3.904	7.948	0.01635	92.79	92.81	119.87	1006.7	1126.6
154	4.100	8.348	0.01636	88.62	88.64	121.87	1005.5	1127.4
156	4.305	8.765	0.01637	84.66	84.68	123.87	1004.4	1128.3
158	4.518	9.199	0.01638	80.90	80.92	125.87	1003.2	1129.1
160	4.739	9.649	0.01639	77.37	77.39	127.87	1002.0	1129.9
162	4.970	10.12	0.01640	74.00	74.02	129.88	1000.8	1130.7
164	5.210	10.61	0.01642	70.79	70.81	131.88	999.7	1131.6
166	5.460	11.12	0.01643	67.76	67.78	133.88	998.5	1132.4
168	5.720	11.65	0.01644	64.87	64.89	135.88	997.3	1133.2
170	5.990	12.20	0.01645	62.12	62.14	137.89	996.1	1134.0
172	6.272	12.77	0.01646	59.50	59.52	139.89	995.0	1134.9
174	6.565	13.37	0.01647	57.01	57.03	141.89	993.8	1135.7
176	6.869	13.99	0.01648	54.64	54.66	143.90	992.6	1136.5
178	7.184	14.63	0.01650	52.39	52.41	145.90	991.4	1137.3
180	7.510	15.29	0.01651	50.26	50.28	147.91	990.2	1138.1
182	7.849	15.98	0.01652	48.22	48.24	149.92	989.0	1138.9
184	8.201	16.70	0.01653	46.28	46.30	151.92	987.8	1139.7
186	8.566	17.44	0.01654	44.43	44.45	153.93	986.6	1140.5
188	8.944	18.21	0.01656	42.67	42.69	155.94	985.3	1141.3
190	9.336	19.01	0.01657	40.99	41.01	157.95	984.1	1142.1
192	9.744	19.84	0.01658	39.38	39.40	159.95	982.8	1142.8
194	10.168	20.70	0.01659	37.84	37.86	161.96	981.5	1143.5
196	10.605	21.59	0.01661	36.38	36.40	163.97	980.3	1144.3
198	11.057	22.51	0.01662	34.98	35.00	165.98	979.0	1145.0
200	11.525	23.46	0.01663	33.65	33.67	167.99	977.8	1145.8
202	12.010	24.45	0.01665	32.37	32.39	170.01	976.6	1146.6
204	12.512	25.47	0.01666	31.15	31.17	172.02	975.3	1147.3
206	13.031	26.53	0.01667	29.99	30.01	174.03	974.1	1148.1
208	13.568	27.62	0.01669	28.88	28.90	176.04	972.8	1148.8
210	14.123	28.75	0.01670	27.81	27.83	178.06	971.5	1149.6
212	14.696	29.92	0.01672	26.81	26.83	180.07	970.3	1150.4
215	15.591		0.01674	25.35	25.37	186.10	968.3	1151.4
220	17.188		0.01677	23.14	23.16	188.14	965.2	1153.3
225	18.915		0.01681	21.15	21.17	193.18	961.9	1155.1
230	20.78		0.01684	19.371	19.388	198.22	958.7	1156.9
235	22.80		0.01688	17.761	17.778	203.28	955.3	1158.6
240	24.97		0.01692	16.307	16.324	208.34	952.1	1160.4
245	27.31		0.01696	15.010	15.027	213.41	948.7	1162.1
250	29.82		0.01700	13.824	13.841	218.48	945.3	1163.8

v = volumen específico, pies³/lb h = entalpía, Btu/lb

TABLA C.1. (Continuación)

Temp. °Fahr t	Presión absoluta		Volumen específico			Entalpía		
	lb/plg ² p	plg Hg 32°F	Líqu. sat. v_f	Evap. v_{fg}	Vapor sat. v_g	Líqu. sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor sat. h_g
255	32.53		0.01704	12.735	12.752	223.56	942.0	1165.6
260	35.43		0.01708	11.754	11.771	228.65	938.6	1167.3
265	38.54		0.01713	10.861	10.878	233.74	935.3	1169.0
270	41.85		0.01717	10.053	10.070	238.84	931.8	1170.6
275	45.40		0.01721	9.313	9.330	243.94	928.2	1172.1
280	49.20		0.01726	8.634	8.651	249.06	924.6	1173.7
285	53.25		0.01731	8.015	8.032	254.18	921.0	1175.2
290	57.55		0.01735	7.448	7.465	259.31	917.4	1176.7
295	62.13		0.01740	6.931	6.948	264.45	913.7	1178.2
300	67.01		0.01745	6.454	6.471	269.60	910.1	1179.7
305	72.18		0.01750	6.014	6.032	274.76	906.3	1181.1
310	77.68		0.01755	5.610	5.628	279.92	902.6	1182.5
315	83.50		0.01760	5.239	5.257	285.10	898.8	1183.9
320	89.65		0.01765	4.897	4.915	290.29	895.0	1185.3
325	96.16		0.01771	4.583	4.601	295.49	891.1	1186.6
330	103.03		0.01776	4.292	4.310	300.69	887.1	1187.8
335	110.31		0.01782	4.021	4.039	305.91	883.2	1189.1
340	117.99		0.01788	3.771	3.789	311.14	879.2	1190.3
345	126.10		0.01793	3.539	3.557	316.38	875.1	1191.5
350	134.62		0.01799	3.324	3.342	321.64	871.0	1192.6
355	143.58		0.01805	3.126	3.144	326.91	866.8	1193.7
360	153.01		0.01811	2.940	2.958	332.19	862.5	1194.7
365	162.93		0.01817	2.768	2.786	337.48	858.2	1195.7
370	173.33		0.01823	2.607	2.625	342.79	853.8	1196.6
375	184.23		0.01830	2.458	2.476	348.11	849.4	1197.5
380	195.70		0.01836	2.318	2.336	353.45	844.9	1198.4
385	207.71		0.01843	2.189	2.207	358.80	840.4	1199.2
390	220.29		0.01850	2.064	2.083	364.17	835.7	1199.9
395	233.47		0.01857	1.9512	1.9698	369.56	831.0	1200.6
400	247.25		0.01864	1.8446	1.8632	374.97	826.2	1201.2
405	261.67		0.01871	1.7445	1.7632	380.40	821.4	1201.8
410	276.72		0.01878	1.6508	1.6696	385.83	816.6	1202.4
415	292.44		0.01886	1.5630	1.5819	391.30	811.7	1203.0
420	308.82		0.01894	1.4806	1.4995	396.78	806.7	1203.5
425	325.91		0.01902	1.4031	1.4221	402.28	801.6	1203.9
430	343.71		0.01910	1.3303	1.3494	407.80	796.5	1204.3
435	362.27		0.01918	1.2617	1.2809	413.35	791.2	1204.6
440	381.59		0.01926	1.1973	1.2166	418.91	785.9	1204.8
445	401.70		0.01934	1.1367	1.1560	424.49	780.4	1204.9
450	422.61		0.01943	1.0796	1.0990	430.11	774.9	1205.0
455	444.35		0.0195	1.0256	1.0451	435.74	769.3	1205.0
460	466.97		0.0196	0.9745	0.9941	441.42	763.6	1205.0
465	490.43		0.0197	0.9262	0.9459	447.10	757.8	1204.9
470	514.70		0.0198	0.8808	0.9006	452.84	751.9	1204.7
475	539.90		0.0199	0.8379	0.8578	458.59	745.9	1204.5
480	566.12		0.0200	0.7972	0.8172	464.37	739.8	1204.2
485	593.28		0.0201	0.7585	0.7786	470.18	733.6	1203.8
490	621.44		0.0202	0.7219	0.7421	476.01	727.3	1203.3
495	650.59		0.0203	0.6872	0.7075	481.90	720.8	1202.7
500	680.80		0.0204	0.6544	0.6748	487.80	714.2	1202.0
505	712.19		0.0206	0.6230	0.6436	493.8	707.5	1201.3
510	744.55		0.0207	0.5932	0.6139	499.8	700.6	1200.4
515	777.96		0.0208	0.5651	0.5859	505.8	693.6	1199.4
520	812.68		0.0209	0.5382	0.5591	511.9	686.5	1198.4
525	848.37		0.0210	0.5128	0.5338	518.0	679.2	1197.2
530	885.20		0.0212	0.4885	0.5097	524.2	671.9	1196.1
535	923.45		0.0213	0.4654	0.4867	530.4	664.4	1194.8
540	962.80		0.0214	0.4433	0.4647	536.6	656.7	1193.3

v = volumen específico pies³/lb h = entalpía, Btu/lb

TABLA C.1. (Continuación)

Temp. °Fahr t	Presión absoluta		Volumen específico			Entalpía		
	lb/plg ² p	plg Hg 32°F	Líqu. sat. v _f	Evap. v _{fg}	Vapor sat. v _g	Líqu. sat. h _f	Evap. h _{fg}	Vapor sat. h _g
545	1003.6		0.0216	0.4222	0.4438	542.9	648.9	1191.8
550	1045.6		0.0218	0.4021	0.4239	549.3	640.9	1190.2
555	1088.8		0.0219	0.3830	0.4049	555.7	632.6	1188.3
560	1133.4		0.0221	0.3648	0.3869	562.2	624.1	1186.3
565	1179.3		0.0222	0.3472	0.3694	568.8	615.4	1184.2
570	1226.7		0.0224	0.3304	0.3528	575.4	606.5	1181.9
575	1275.7		0.0226	0.3143	0.3369	582.1	597.4	1179.5
580	1326.1		0.0228	0.2989	0.3217	588.9	588.1	1177.0
585	1378.1		0.0230	0.2840	0.3070	595.7	578.6	1174.3
590	1431.5		0.0232	0.2699	0.2931	602.6	568.8	1171.4
595	1486.5		0.0234	0.2563	0.2797	609.7	558.7	1168.4
600	1543.2		0.0236	0.2432	0.2668	616.8	548.4	1165.2
605	1601.5		0.0239	0.2306	0.2545	624.1	537.7	1161.8
610	1661.6		0.0241	0.2185	0.2426	631.5	526.6	1158.1
615	1723.4		0.0244	0.2068	0.2312	638.9	515.3	1154.2
620	1787.0		0.0247	0.1955	0.2202	646.5	503.7	1150.2
625	1852.4		0.0250	0.1845	0.2095	654.3	491.5	1145.8
630	1919.8		0.0253	0.1740	0.1993	662.2	478.8	1141.0
635	1989.0		0.0256	0.1638	0.1894	670.4	465.5	1135.9
640	2060.3		0.0260	0.1539	0.1799	678.7	452.0	1130.7
645	2133.5		0.0264	0.1441	0.1705	687.3	437.6	1124.9
650	2208.8		0.0268	0.1348	0.1616	696.0	422.7	1118.7
655	2286.4		0.0273	0.1256	0.1529	705.2	407.0	1112.2
660	2366.2		0.0278	0.1167	0.1445	714.4	390.5	1104.9
665	2448.0		0.0283	0.1079	0.1362	724.5	372.1	1096.6
670	2532.4		0.0290	0.0991	0.1281	734.6	353.3	1087.9
675	2619.2		0.0297	0.0904	0.1201	745.5	332.8	1078.3
680	2708.4		0.0305	0.0810	0.1115	757.2	310.0	1067.2
685	2800.4		0.0316	0.0716	0.1032	770.1	284.5	1054.6
690	2895.0		0.0328	0.0617	0.0945	784.2	254.9	1039.1
695	2992.7		0.0345	0.0511	0.0856	801.3	219.1	1020.4
700	3094.1		0.0369	0.0389	0.0758	823.9	171.7	995.6
705	3199.1		0.0440	0.0157	0.0597	870.2	77.6	947.8
705.34*	3206.2		0.0541	0	0.0541	910.3	0	910.3

* Temperatura crítica

v = Volumen específico pies³/lb

h = Entalpía, Btu/lb