



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

EVAPORACIÓN A SIMPLE Y DOBLE EFECTO, EN EL “EQUIPO PARA
ESTUDIO DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO” DEL
LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE
QUÍMICA DE LA UNAM

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

QUE PRESENTA:

EDGAR LAGUNA SALAS

DIRECTOR DE TESIS

DR. ANTONIO VALIENTE BARDERAS



MÉXICO D.F.

OCTUBRE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios “Porque tú mismo produjiste mis riñones; me tuviste cubierto en resguardo en el vientre de mi madre. Te elogiare porque de manera que inspira temor estoy maravillosamente hecho. Tus obras son maravillosas, como bien percibe mi alma. Mis huesos no estuvieron escondidos de ti cuando fui hecho en secreto, cuando fui tejido en las partes más bajas de la tierra. Tus ojos vieron hasta mi embrión, y en tu libro todas sus partes estaban escritas, [...]” (Salmos 139: 13-16).

Gracias al Dr. Antonio Valiente Barderas por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo. Y todos aquellos profesores que intervinieron en mi educación profesional ya que me ayudaron a superarme.

Y en especial agradezco a mi familia por su amor y apoyo incondicional. Gracias por confiar en mí, son mi motivación e inspiración.

Más que mil palabras que abundan en elogios y versos, prefiero agradecerles a mis padres con hechos y por ende les dedico esta obra.

!!!GRACIAS A TODOS!!



RESUMEN

La tesis gira en torno a la evaporación, que es una operación de transferencia de calor utilizada para concentrar un sólido disuelto en un líquido. Y se puede llevar a cabo la Operación Unitaria de Evaporación en dos formas diferentes la de contacto directo y la de contacto indirecto.

Para el desarrollo de la tesis se utilizó el método de contacto indirecto, que es la transferencia de calor que se hace a través de las paredes de tubos metálicos que separan el medio de calentamiento de la disolución, previniendo el mezclado. Estos equipos se llaman Evaporadores.

El equipo que se utilizó fue "El Evaporador Modelo: PS-EV-202 Serie: EH-1005-035" ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química, con la especificación de "Equipo para el estudio de un evaporador de doble efecto". Del cual no se tiene protocolos para el desarrollo de prácticas experimentales, por su reciente adquisición.

El Evaporador antes mencionado, fue empleado para experimentar el proceso de Evaporación. Primero se empleó un evaporador del equipo, lo cual permitió el estudio de la evaporación a simple efecto a presión atmosférica y después la evaporación a simple efecto a vacío.

Para cada caso de la experimentación se hizo una con agua y otra con agua-azúcar. En el caso especial donde el Evaporador se somete a vacío, es porque el vacío provoca en los líquidos o en su defecto disoluciones, que disminuya su punto de ebullición lo cual suele traer dos beneficios, primero el ahorro de vapor, lo que se traduce en ahorro de energía y segundo que el soluto si es orgánico no se pierda o descomponga.

Posteriormente se utiliza los dos Evaporadores del equipo, para el estudio de la Evaporación a doble efecto en sus diversos arreglos (A Contracorriente, Cruzado y Paralelo). Para los casos a doble efecto no se hizo a vacío, ya que el equipo producía un sifón en el evaporador y se generaban reflujos.

A que destacar que cada arreglo de Evaporación a doble efecto tiene sus propias características, las cuales se pueden traducir en ahorro de energía, aumento de producción o en su defecto detectar cual es el arreglo que consume más recursos. Pero para descubrir las características de cada arreglo y que cálculos nos llevan a esas conclusiones lo invito a echarle un vistazo a esta publicación

Al final se hizo un compendio de todos los experimentos, los cuales se sometieron a su tratamiento matemático, para poder analizar y comprender la Operación de la Evaporación. Con todo esto se cumple el motivo de ampliar los conocimientos de los alumnos de la carrera de Ingeniería Química y acercarlos a la industria por medio de la experimentación y manipulación de un equipo industrial.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS GENERALES.....	17
OBJETIVOS PARTICULARES.....	17
HIPÓTESIS.....	19
CAPITULO 1.....	21
EVAPORACIÓN A SIMPLE EFECTO Y TEORIA	
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EMPLEADO.....	39
1.1 EXPERIMENTACIÓN 1.....	45
EVAPORACIÓN A SIMPLE EFECTO (AGUA)	
1.2 EXPERIMENTACIÓN 2.....	59
EVAPORACIÓN A SIMPLE EFECTO (AGUA Y VACIO)	
1.3 EXPERIMENTACIÓN 3.....	73
EVAPORACIÓN A SIMPLE EFECTO (AZÚCAR)	
1.4 EXPERIMENTACIÓN 4.....	87
EVAPORACIÓN A SIMPLE EFECTO (AZÚCAR Y VACIO)	
CAPITULO 2.....	101
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO Y TEORIA	
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EMPLEADO.....	105
2.1 EXPERIMENTACIÓN 5.....	111
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO ARREGLO A CONTRACORRIENTE (AGUA)	
2.2 EXPERIMENTACIÓN 6.....	125
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO ARREGLO A CONTRACORRIENTE (AZÚCAR)	
2.3 EXPERIMENTACIÓN 7.....	139
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO ARREGLO CRUZADO (AGUA)	
2.4 EXPERIMENTACIÓN 8.....	155
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO ARREGLO CRUZADO (AZÚCAR)	



2.5 EXPERIMENTACIÓN 9	171
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO ARREGLO EN PARALELO (AGUA)	
2.6 EXPERIMENTACIÓN 10	185
EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO ARREGLO EN PARALELO (AZÚCAR)	
CONCLUSIONES	199
RECOMENDACIONES	201
BIBLIOGRAFÍA	203
APÉNDICE A	205
NOMENCLATURA	



ÍNDICE DE TABLAS DE MATERIA Y ENERGÍA

TABLA 01) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AGUA).....	57
TABLA 02) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AGUA - VACIO).....	71
TABLA 03) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AZÚCAR).....	85
TABLA 04) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AZÚCAR - VACIO).....	99
TABLA 05) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO A CONTRACORRIENTE (AGUA).....	124
TABLA 06) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO A CONTRACORRIENTE (AZÚCAR).....	138
TABLA 07) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO A CRUZADO (AGUA).....	153
TABLA 08) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO A CRUZADO (AZÚCAR).....	169
TABLA 09) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO EN PARALELO (AGUA).....	184
TABLA 10) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO EN PARALELO (AZÚCAR).....	198



LISTA DE ESQUEMAS

Fig. 1.- Esquema de un evaporador sencillo¹.

Fig. 2.- Esquema de un evaporador de tubos horizontales¹.

Fig. 3.- Esquemas de un evaporador de tubos verticales¹.

Fig. 4.- Evaporador de tubo vertical con cambiador de calor^{XV}.

Fig. 5.-Evaporador con circulación forzada y superficie de calentamiento horizontal^{XV}.

Fig. 6.-Evaporador de circulación forzada y tubo vertical^{XV}.

Fig. 7.-Evaporador de tubo horizontal y circulación forzada^{XV}.

Fig. 8.-Evaporador de circulación forzada y tubo inclinado (Minimiza la excesiva altura en grandes sistemas)^{XV}.

Fig. 9.-Evaporador de circulación forzada y película ascendente descendente^{XV}.

Fig. 10.-Evaporador de película descendente con cambiador de calor montado formando un todo^{XV}.

Fig. 11.-Evaporador de película descendente con cambiador de calor montado externamente^{XV}.

Fig. 12.-Evaporador de película ascendente y tubo vertical largo^{XV}.

Fig. 13.-Evaporador con sección de precalentamiento y película ascendente-descendente^{XV}.

Fig. 14.-Evaporador con sección de precalentamiento y película ascendente-descendente con circulación forzada^{XV}.

Fig. 15.-Evaporador de película ascendente con un condensador de superficie de tubo vertical^{XV}.

Fig. 16.-Esquema de un evaporador sencillo¹.

Fig. 17.-Evaporador concéntrico ascendente forzado y con separador.

Fig. 18.-Diagramas de Duhring¹.

Fig. 19.-Calores de disolución de soluciones reales¹.

Fig. 20.-Capacidades caloríficas de soluciones reales¹.

Fig. 21.-Entalpías de soluciones reales¹.

Fig.-43 Evaporadores múltiples trabajando a contracorriente¹.

Fig.-44 Evaporadores múltiples trabajando en paralelo¹.



INTRODUCCIÓN

El motivo de la tesis es ampliar los conocimientos de los alumnos de la carrera de Ingeniería Química y acercarlos a la industria por medio de la experimentación y manipulación de un equipo industrial. Este equipo es "El Evaporador Modelo: PS-EV-202 Serie: EH-1005-035" ubicado en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química desde hace 3 años.

La Facultad de Estudios Superiores Zaragoza tiene excelentes profesores los cuales fundamentan la teoría en los alumnos. Como exalumno de La Facultad de Estudios Superiores Zaragoza sé que el conocimiento que adquirí relacionado con la Ingeniería Química está bien fundamentado. Creo que todas las materias son muy importantes, pero en lo personal las que dejaron huella fueron (Balance de Masa y Energía, Métodos Numéricos, Flujo de Fluidos, Transferencia de Calor, Termodinámica Química, Transferencia de Masa, Ingeniería de Reactores, Ingeniería de procesos, Dinámica Control de Procesos, Ingeniería de Proyectos y Todos los Laboratorios y Talleres de Proyectos).

Pero lo que más me llamó la atención fue que cada semestre que sucedía al anterior, reforzaba los conocimientos previamente adquiridos y se aumentaba la dificultad gradualmente.

Aunque la teoría es muy importante, pienso que la práctica también es igual de importante. El calcular dos bombas centrífuga en serie y/o paralelo es difícil mientras los motores retumban al proporcionar la energía necesaria para transportar un fluido, o ¿qué tal el calcular la transferencia de calor de un intercambiador mientras se aguanta una quemada producida por la distracción? Mejor aún el operar un equipo como "El Evaporador Modelo: PS-EV-202 Serie: EH-1005-035", y manejar sus múltiples variables y donde solo hay un operador el error suele presentarse con mayor frecuencia, "pero no importan las dificultades siempre saltará nuestro ingenio mexicano". Todo lo anterior forja a un ingeniero y fusiona la teoría con la práctica.

La utilización de equipos industriales o equipos que emulen procesos es muy limitada en La Facultad de Estudios Superiores Zaragoza e inclusive el servicio de vapor es intermitente. Pero por otro lado, la Facultad de Química en específico el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química tiene una buena gama de equipos funcionales que, a mi parecer, exceden por mucho la demanda de alumnos que los operan, y el servicio de vapor a principios del 2012 a la fecha es más regular.



Cada Facultad tiene sus puntos buenos y por ello es deseable crear sus puntos vínculos entre La FES-Z y La FQ, para poder generar ingenieros con un perfil superior a cualquier ingeniero producido por una facultad individual. Los beneficios son grandes ya que además de conocer los profesores en su Facultad también conocerán a los de la otra Facultad así el alumno aprenderá más y con diferentes formas de trabajo; se desarrollará algo de competitividad lo cual aumentará cantidad y calidad del trabajo realizado por el alumno y para finalizar también desarrollará más amistades que en conjunto le ayudarán a conseguir empleo.

El equipo "Evaporador Modelo: PS-EV-202 Serie: EH-1005-035" de la Facultad de Química de la UNAM se instaló en el Laboratorio de Ingeniería Química y los profesores y técnicos del laboratorio ajustaron y adaptaron al equipo para las pruebas iniciales.

Se escogió la estancia corta (Enero-2010) como una ocasión perfecta para que los estudiantes pudieran probar el Evaporador. La especificación del Evaporador es "Equipo para el estudio de un evaporador de doble efecto". Lo que significó que los estudiantes manipularon el equipo a simple y doble efecto.

Parte de la experimentación se llevó a cabo en la estancia corta del "PROYECTO PAPIME SOBRE EVAPORACIÓN. OPERACIONES UNITARIAS" que se llevó a cabo del 07 de junio al 02 de julio del 2010. Y luego en el Servicio Social del programa "GENERAL EN DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA" realizado del 13 de septiembre del 2010 al 22 de marzo del 2011, ambos bajo la supervisión directa de Antonio Valiente Barderas.

Durante mi estancia corta que duró 4 semanas pude convivir y trabajar en el evaporador con cinco compañeros de la carrera de IQ pero de diferente Facultad. En este período, tan corto, nos tuvimos que organizar para poder manipular el equipo y sacar un número limitado de corridas para simple y doble efecto.

Al finalizar la estancia corta dado que éramos varios los que estábamos manipulando el evaporador, cada uno se especializó en un área específica del equipo. Estas áreas consistían más bien en tareas específicas del equipo, como checar, revisar y capturar las temperaturas del equipo, checar, revisar y capturar las presiones del equipo, controlar el flujo del vapor, controlar el flujo de agua de enfriamiento, controlar el flujo de proceso. Después se juntaban los datos para poder realizar los cálculos convenientes.

Posteriormente, como el proceso de Evaporación me intrigó, me motivó a prestar mi Servicio Social en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química en el evaporador antes mencionado. Durante el intersemestre pasaba de 8:00am a 5:00pm trabajando en el equipo. Cuando estaba en clases mi horario era flexible para poder asistir al Servicio de dos a tres veces por semana y así transcurrió del 13-09-2010 al 22-03-2011.



Lo primero a lo que me enfrenté fue a manipular solo el equipo, lo cual fue uno de los retos más interesantes. Con ingenio, mucha concentración y una serie de experimentos fallidos, como el olvidar capturar algún parámetro, como la temperatura, presión y flujo, me obligaba a repetir la experimentación. Pero al final adquirí la habilidad de operar el equipo correctamente.

Como es de esperarse, es un proceso nada fácil. Un inconveniente fue el vapor ya que pese a que se me autorizaba el vapor y que los fogoneros eran amables, uno de ellos, el del turno de la mañana, se accidentó lo que limitó un poco mi acceso al servicio. Otros problemas surgidos fueron las fugas en la tubería, fracturas en partes plásticas de la tubería que no aguantaban la presión. Lo bueno es que las reparaciones no tardaban más de 3 días hábiles. Sin contar que cuando no fallaba nada tenía que esperar entre media y una hora en lo que el vapor llegara y calentará el equipo; más otros 30 o 45 minutos en los que estabilizaba el equipo y al final de la jornada se enfría el equipo lentamente para evitar un choque térmico. Cuando se hicieron corridas con solución azucarada la línea de proceso se lavaba con agua.

Pero pese a esos inconvenientes y algunos otros, las prácticas se llevaron a cabo y se presentó el informe de servicio social y creo que el resultado mostró un panorama general satisfactorio.

Tiempo después, la pasión que se formó en torno al proceso de evaporación no desapareció lo que me impulsó para desarrollar un material práctico, teórico y didáctico para el beneficio de los alumnos de la carrera que tanto aprecio.

Tuve que invertir más tiempo para hacer más experimentos y para mejorar los experimentos que tenían muchas inconsistencias. También, por los que les faltaban algunos datos o simplemente para hacer experimentos que en su debido tiempo no pude hacer. Posteriormente tras acabar la teoría y práctica me puse a hacer la tesis escrita.

La crisis me orilló a conseguir trabajo pero para poder acabar la tesis escrita decidí hacer una práctica profesional en Comisión Nacional del Agua(CONAGUA), lo que me permitió desarrollarme laboralmente y concretar esta tesis de ingeniería Química.



OBJETIVOS GENERALES

- El desarrollo de un material práctico, teórico y didáctico que permita al estudiante de la carrera de Ingeniería Química el estudio de la evaporación a simple y doble efecto.
- Operar el equipo "El Evaporador Modelo: PS-EV-202 Serie: EH-1005-035" en sus diversos arreglos que se pueden presentar tanto en simple como doble efecto. Y que también incluye sus diferentes condiciones de presión tales como presión atmosférica y a vacío.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Que los alumnos de la carrera de Ingeniería Química puedan desarrollar prácticas de la Operación Unitaria de "Evaporación" con mayor facilidad al consultar esta tesis.
- Identificar el arreglo en el evaporador, con mayor eficiencia tanto en la economía, como en la concentración, incluyendo el ahorro de energía.
- Investigar si el uso del vacío se justifica con el ahorro de energía y si aumenta la concentración en todos los arreglos.
- Investigar qué arreglo en el evaporador con condiciones de vacío es más conveniente de usar.



HIPÓTESIS

- En mayor o menor grado el alumno puede sacarle provecho a este material con el apoyo de los profesores, que dejan investigar temas relacionados con ciertos procesos o en su defecto en el estudio y análisis de alguna Operación Unitaria (Ej. Evaporación).
- Los arreglos en múltiples efectos suelen tener una mayor producción, en este caso los arreglos con mayor ahorro de energía y concentración son los de doble efecto y de entre ellos el que cumple en mayor grado el ahorro de energía y mayor concentración de azúcar es el arreglo en paralelo.
- Probablemente el uso del vacío se justifica en mayor grado, cuando la solución dentro del sistema es o tiene componentes orgánicos que suelen tener su punto de ebullición muy cerca de su punto de descomposición.
- El arreglo a doble efecto sometido a vacío, que tiene una mayor economía y concentración, es el arreglo a doble efecto en paralelo.

CAPITULO 1

EVAPORACIÓN A SIMPLE EFECTO





TEORÍA

EVAPORACIÓN

Evaporación es una operación de transferencia de calor utilizada para concentrar un sólido disuelto en un líquido. En esta operación la disolución se pone a la temperatura de ebullición de manera que el líquido se volatilice y deje al sólido más concentrado en la solución remanente. Para lograr eso, se suministra calor a la solución y se separan los vapores formados.

La evaporación es quizás una de las operaciones unitarias más antiguas empleadas por el hombre, pues casi con la operación de las primeras culturas comenzó la obtención de sal a partir de la evaporación de agua marina, proceso que aún se sigue utilizando. La obtención del azúcar impulsó el desarrollo de aparatos llamados evaporadores o tachos. En la industria alimentaria es frecuente que se necesite eliminar parte del solvente que se encuentra en ciertos alimentos líquidos

Los equipos empleados para tal efecto se llaman evaporadores, estos pueden adoptar formas muy diversas. Una clasificación primaria los dividiría en evaporadores de contacto **directo** y de contacto **indirecto**. En la actualidad se emplea la evaporación para concentrar ciertas sales o sustancias y para mejorar el sabor de las comidas.

Los factores básicos que afectan a la evaporación son:

- a) La rapidez con que se transfiere el calor.
- b) La cantidad de calor requerido para evaporar.
- c) La temperatura máxima permisible del líquido.
- d) La presión a la que se lleva a cabo la evaporación.
- e) Los posibles cambios en el producto concentrado, tanto químicos como físicos que afectan la calidad nutritiva y sensorial.
- f) La elevación en el punto de ebullición de la solución que se da sobre todo en las soluciones muy concentradas.

Para lograr la evaporación se requiere transferir calor ya sea mediante la radiación solar o mediante otro medio calentante (gases de combustión, vapor). En los evaporadores de contacto indirecto, la transferencia de calor se hace a través de las paredes de tubos metálicos que separan el medio de calentamiento de la disolución, previniendo el mezclado. Estos últimos evaporadores son los más usados pues evitan la contaminación de la disolución.

Para lograr una operación más eficiente se suele hacer vacío en el equipo de evaporación, lográndose que la ebullición se efectúe a temperaturas más bajas y previniendo la descomposición de los materiales orgánicos.



El medio de calentamiento más usual es el vapor de agua que cede su calor latente de condensación. El cálculo de los coeficientes de transferencia de calor para esta operación se complica por el hecho de que las soluciones en ebullición presentan diversos patrones de flujo. En general en la evaporación se puede tener la ebullición llamada nucleada, (formada por numerosas burbujas que se desprenden de la superficie agitando la solución o la ebullición pelicular en la que se forma una película gaseosa pegada a los tubos calentantes. El punto de ebullición de la solución que se evapora es muy importante y está regido por la presión de trabajo y por la concentración de la solución que aumenta la temperatura de ebullición

Con frecuencia la ebullición se emplea junto con la cristalización, fenómeno que se da cuando la solución se sobresatura...

En esta operación unitaria se tienen dos fenómenos principales; la transferencia de calor y la separación del disolvente evaporado del seno del líquido.

Tipos de evaporadores

Evaporadores calentados por vapor o evaporadores sencillos

Consisten en recipientes semiesféricos provistos con un doble fondo para la circulación del *vapor* y se utilizan en procesos intermitentes y para bajas producciones. Pueden ser abiertos o cerrados según que se trabaje a la presión atmosférica o al vacío. Se utilizan en la industria cervecera, preparación de ciertas proteínas, leche condensada, jugos de frutos, etc. En general se emplea el vacío para evitar la alteración de los productos delicados. En algunos casos para acelerar la operación van dotados de agitadores. El doble fondo o chaqueta puede ser sustituido por serpentines.

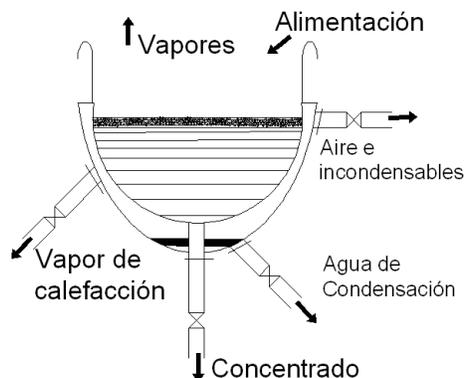


Fig. 1.- Esquema de un evaporador sencillo



Tipos de evaporadores

A continuación se muestran de forma esquematizada distintos tipos de evaporadores que pueden encontrarse en la industria.

Evaporadores tubulares horizontales. El empleo de haces de tubos horizontales, verticales o inclinados obedece a la necesidad de aumentar la superficie de calefacción sin aumentar demasiado el volumen del aparato. Los primeros evaporadores tubulares fueron los horizontales. Se emplean para soluciones poco viscosas y que no depositen sales o incrustaciones ya que su principal inconveniente es la limpieza. Los tubos de estos evaporadores son de 7/8 a 1.25 pulgadas de diámetro con longitudes que van de 4 a 12 pies.

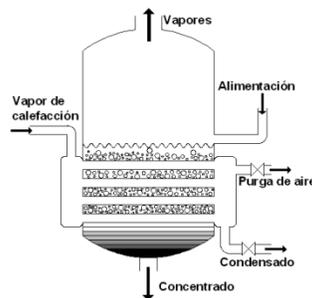


Fig. 2.- Esquema de un evaporador de tubos horizontales.

Los evaporadores de tubos verticales pueden ser de tubos cortos o largos los que por su mayor rendimiento han desplazado a los horizontales. Uno de los evaporadores más empleado es el de calandria. Consiste en un cuerpo cilíndrico en cuya parte inferior lleva el haz de tubos formando la cámara de calefacción con dos placas perforadas a cuyos agujeros se acoplan los tubos por donde circula el líquido a concentrar. Los tubos se calientan exteriormente con vapor de agua. Para favorecer las corrientes de convección, el haz de tubos se interrumpe por el centro instalando un tubo de mayor diámetro. Por el que desciende la solución más concentrada. Los tubos cortos suelen tener tubos de 2.25 a 3 pulgadas de diámetro y longitudes de 2.5 a 6 pies de largo.

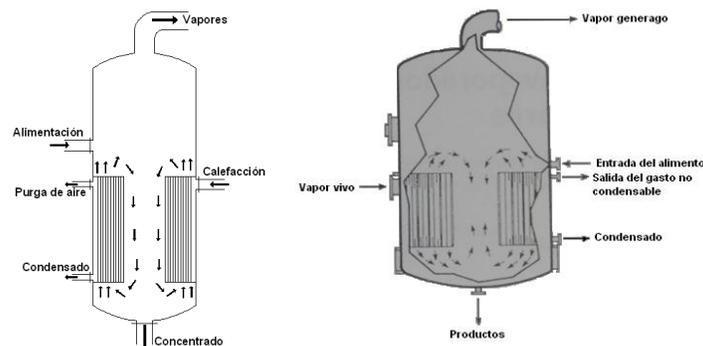


Fig. 3.- Esquemas de un evaporador de tubos verticales.

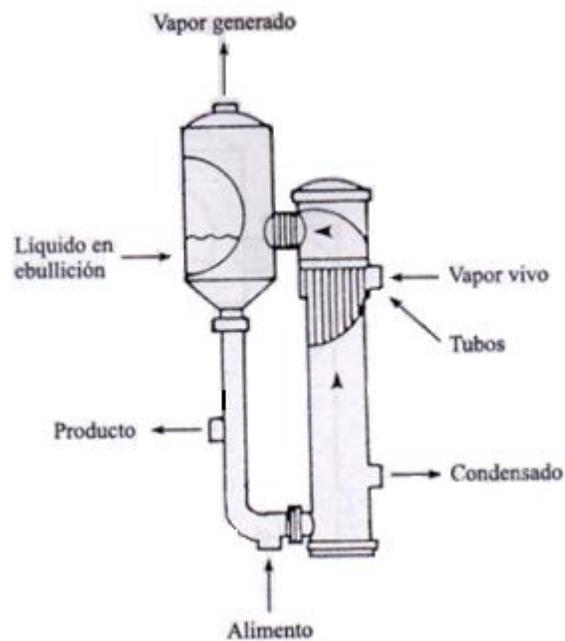


Fig. 4.- Evaporador de tubo vertical con cambiador de calor.

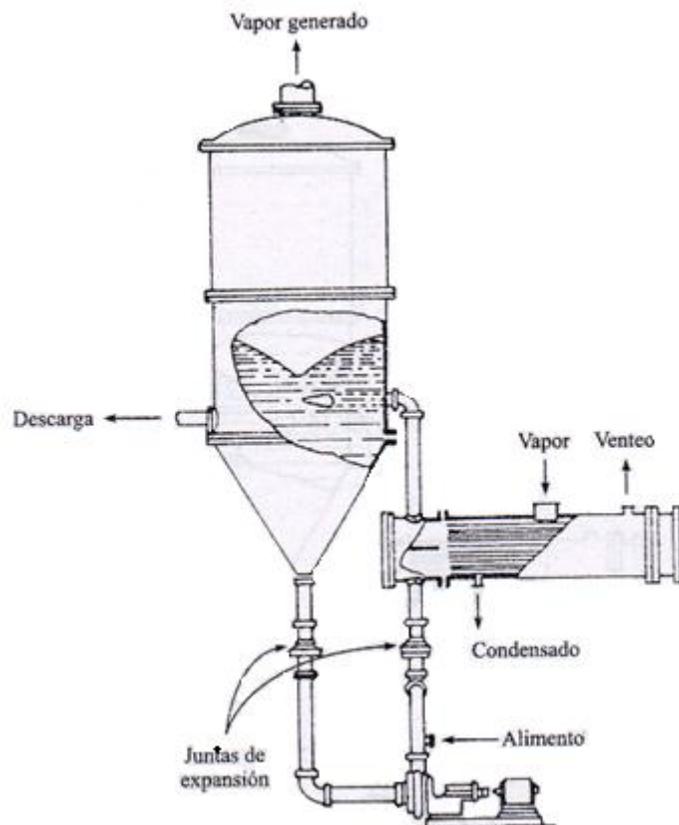


Fig. 5.-Evaporador con circulación forzada y superficie de calentamiento horizontal.

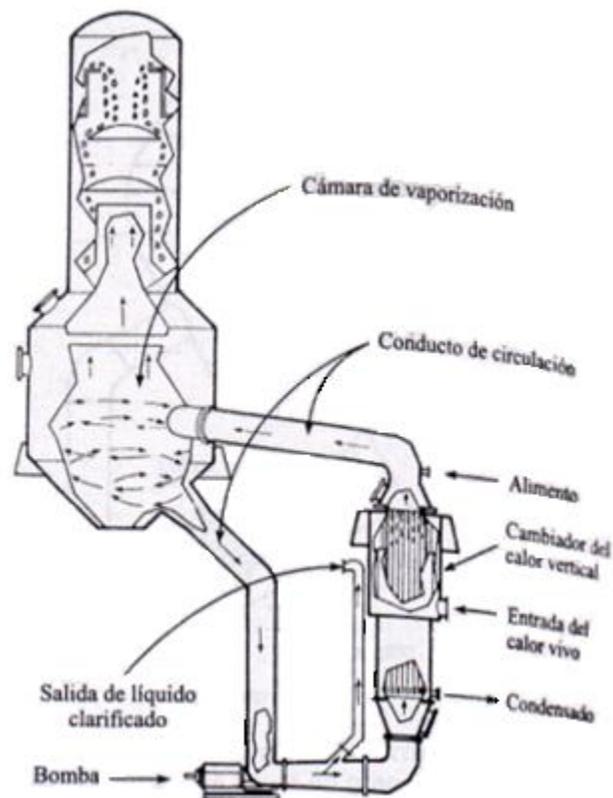


Fig. 6.-Evaporador de circulación forzada y tubo vertical.

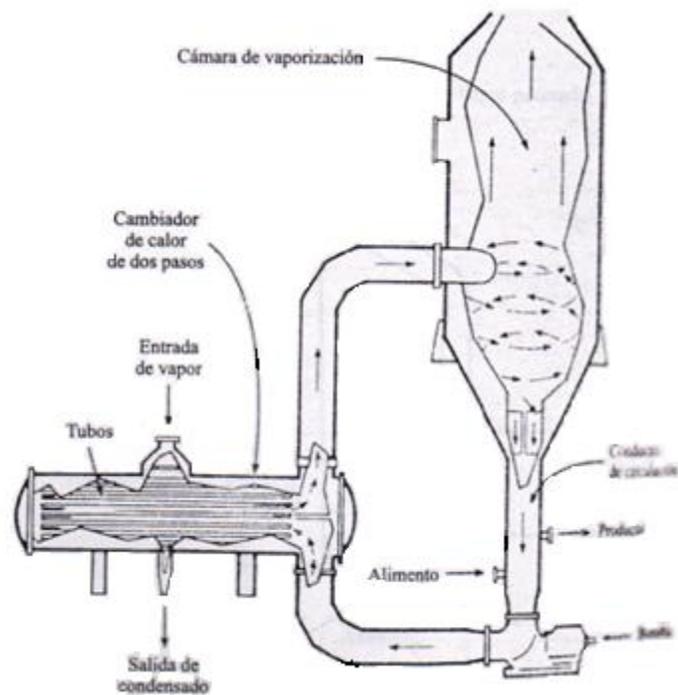


Fig. 7.-Evaporador de tubo horizontal y circulación forzada.

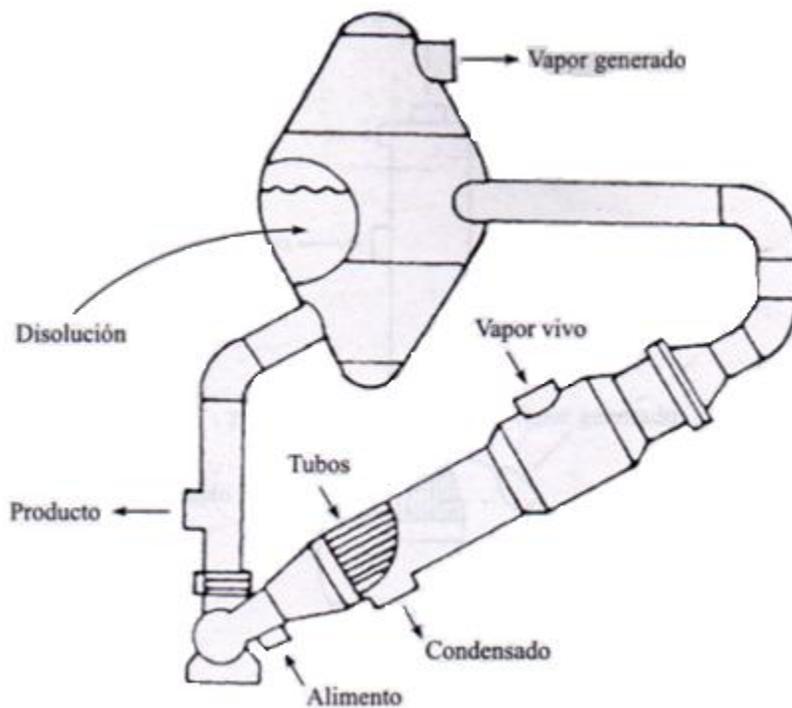


Fig. 8.-Evaporador de circulación forzada y tubo inclinado (Minimiza la excesiva altura en grandes sistemas).

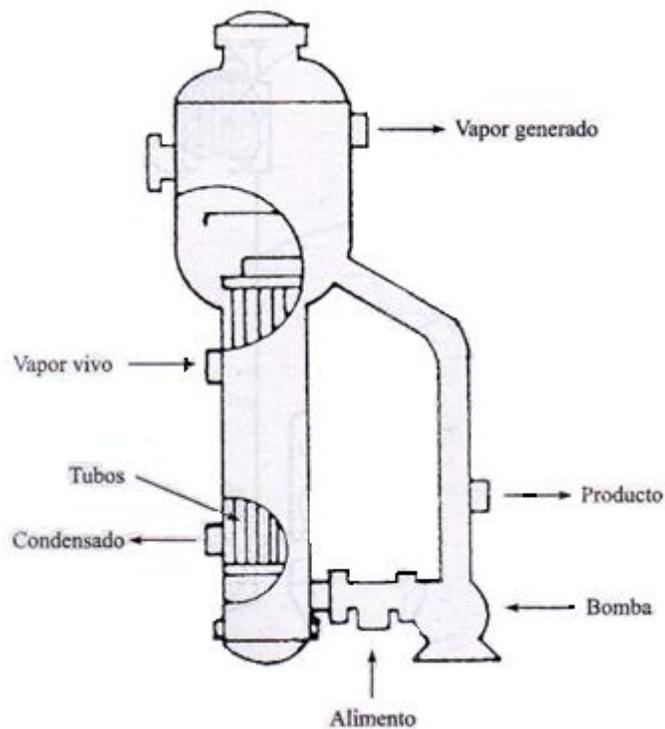


Fig. 9.-Evaporador de circulación forzada y película ascendente descendente.

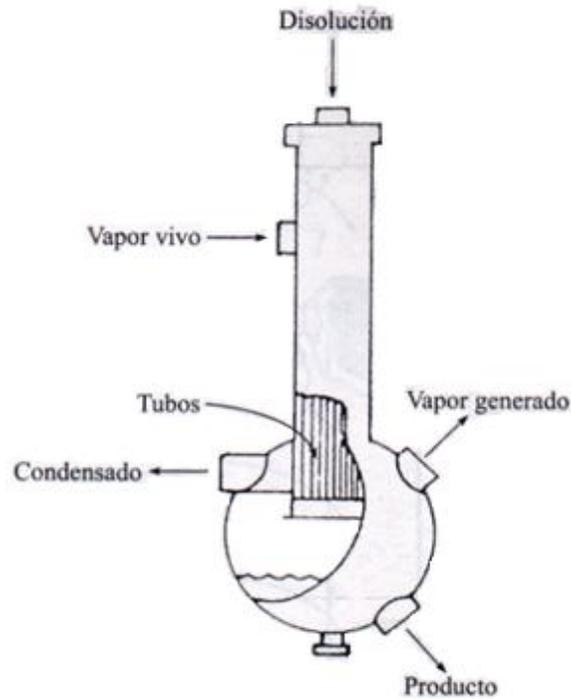


Fig. 10.-Evaporador de película descendente con cambiador de calor montado formando un todo.

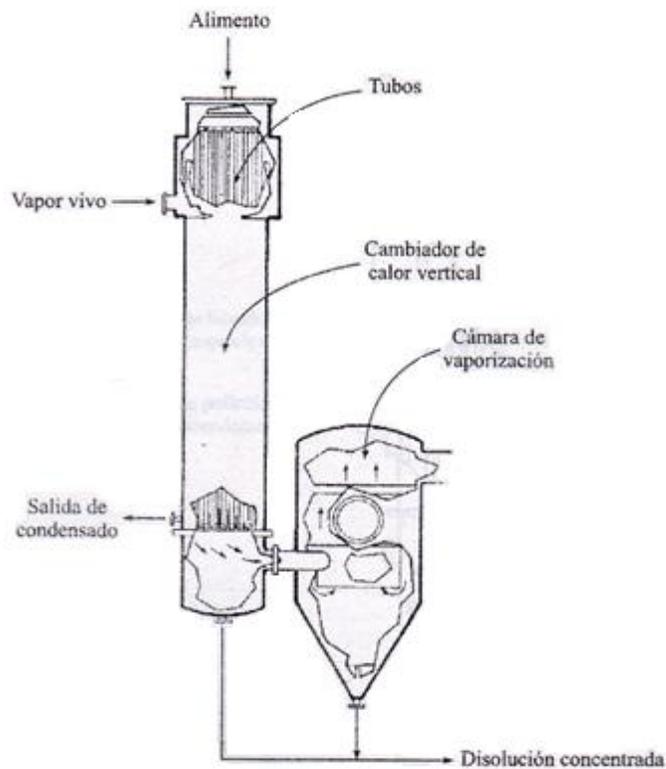


Fig. 11.-Evaporador de película descendente con cambiador de calor montado externamente.

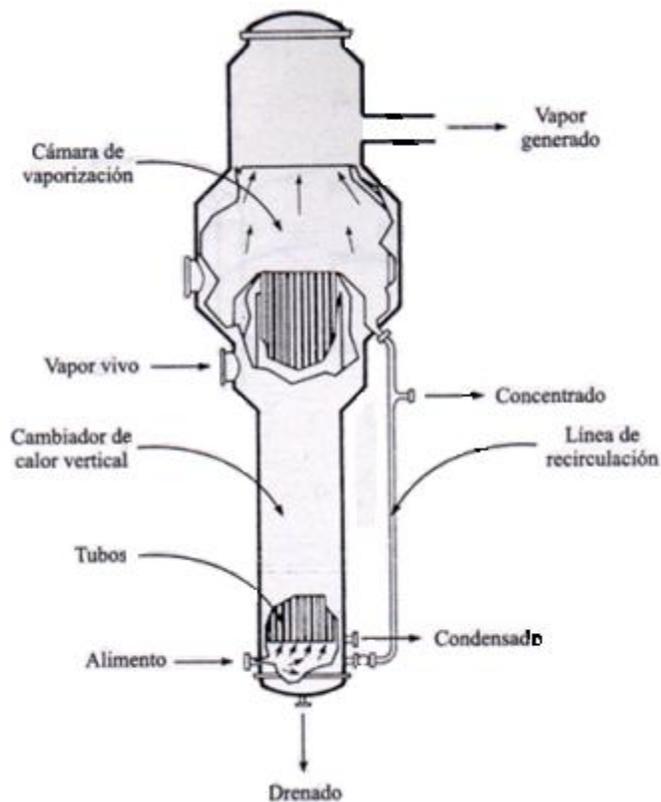


Fig. 12.-Evaporador de película ascendente y tubo vertical largo.

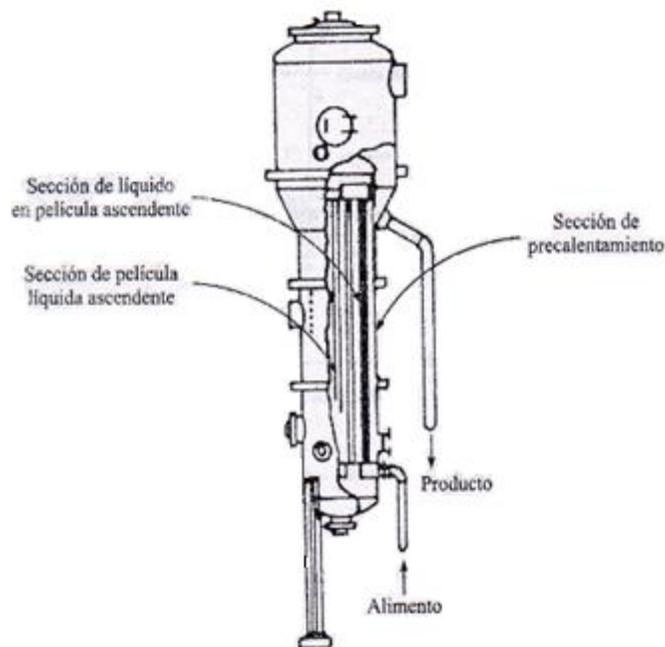


Fig. 13.-Evaporador con sección de precalentamiento y película ascendente-descendente.

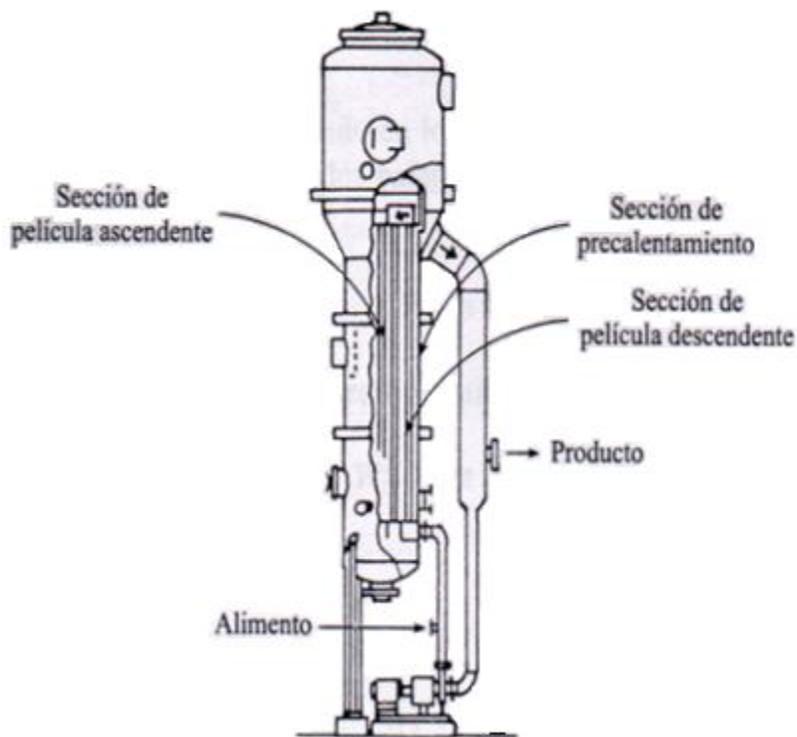


Fig. 14.-Evaporador con sección de precalentamiento y película ascendente-descendente con circulación forzada.

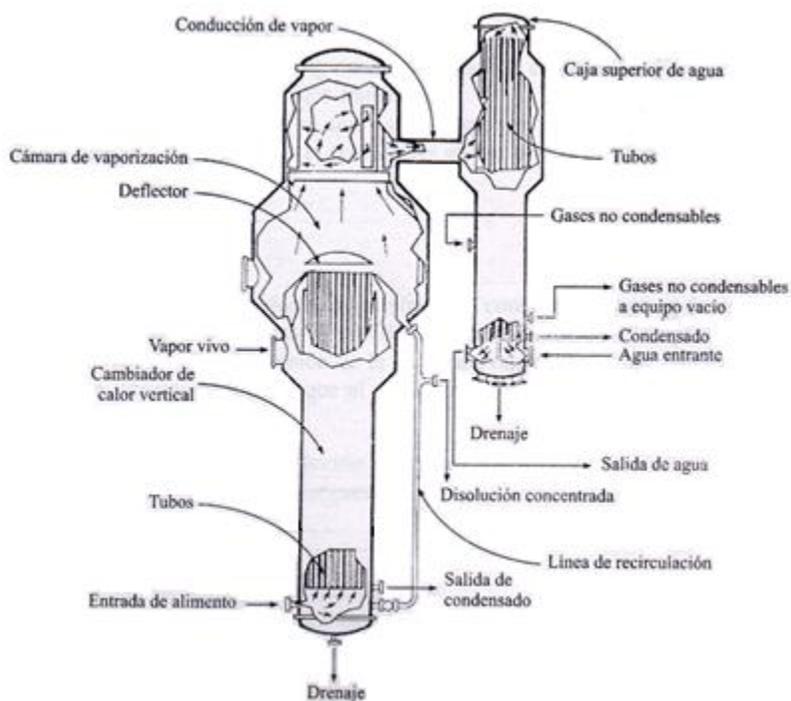


Fig. 15.-Evaporador de película ascendente con un condensador de superficie de tubo vertical



Balance general de un evaporador

Con el fin de entender el funcionamiento del equipo de evaporación con más facilidad proporciono dos esquemas de un equipo de evaporación, en el primero se muestra el esquema de un evaporador que se encuentra comúnmente en los libros de texto, en el segundo esquema presento el esquema del evaporador con el cual se trabajara para hacer las practicas.

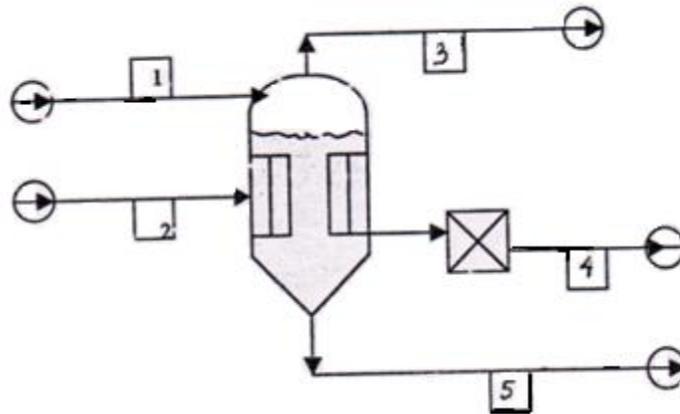


Fig. 16.-Esquema de un evaporador sencillo.

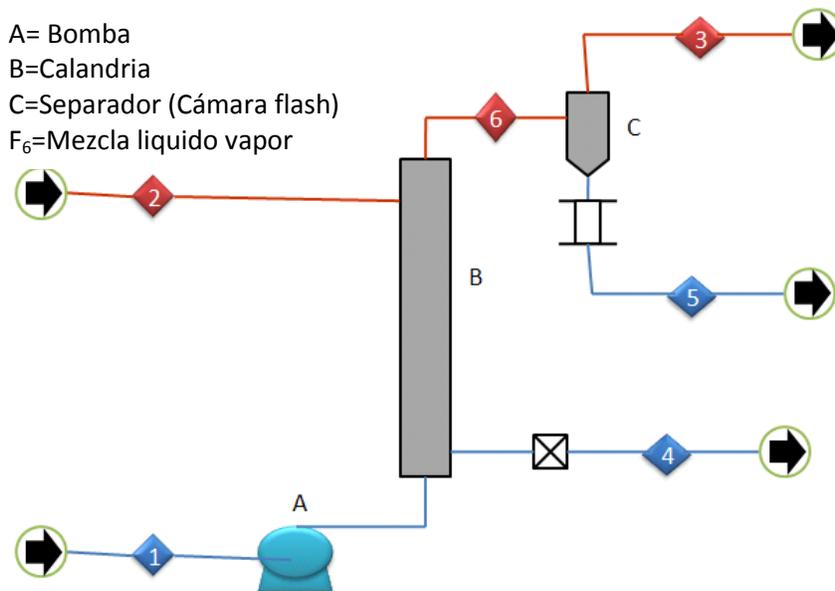


Fig. 17.-Evaporador concéntrico ascendente forzado y con separador.



Los datos siguientes son los mismos para el balance de los dos esquemas.

L_1 =Solución diluida
 G_2 =Vapor de calentamiento.
 G_3 =Líquido evaporado.
 L_5 =Solución concentrada
 L_4 =Vapor condensado

Para un evaporador de contacto indirecto las corrientes de vapor y de disolución no se mezclan por lo que:

$L_1 = G_3 + L_5$ Balance total
 $L_1 x_1^s = L_5 x_5^s$ Balance de sólidos
 $G_2 = L_4$

Balances de energía

$L_1 H_1 + G_2 H_2 = G_3 H_3 + L_4 H_4 + L_5 H_5$
 $G_2 (H_2 - H_4) = G_3 H_3 + L_5 H_5 - L_1 H_1$

Para las soluciones ideales, aquellas que no presentan un calor de disolución, las entalpías H_1 y H_5 dependen de las características de las disoluciones y en general son iguales a $H = C_p \Delta T$.

Las entalpías H_2 y H_4 corresponden al vapor de calentamiento entrante y al condensado (líquido saturado saliente) proveniente de la condensación del vapor y se obtienen de las tablas de vapor de agua.

La entalpia H_3 corresponde a los vapores formados a partir de la disolución y es función de la presión a la que opera el sistema. En el caso de numerosas soluciones acuosas en las que no se presenta una elevación en el punto de ebullición la temperatura de ebullición corresponde a la del agua sujeta a la presión de evaporación.

Muchas soluciones no son ideales y presentan una elevación en su punto de ebullición y un calor de disolución. Para encontrar la elevación en el punto de ebullición en la práctica se hace uso de la regla de Dühring, según la cual si se gráfica el punto de ebullición de una solución frente a la temperatura de ebullición del disolvente, los puntos correspondientes a la misma concentración caerán sobre una recta.

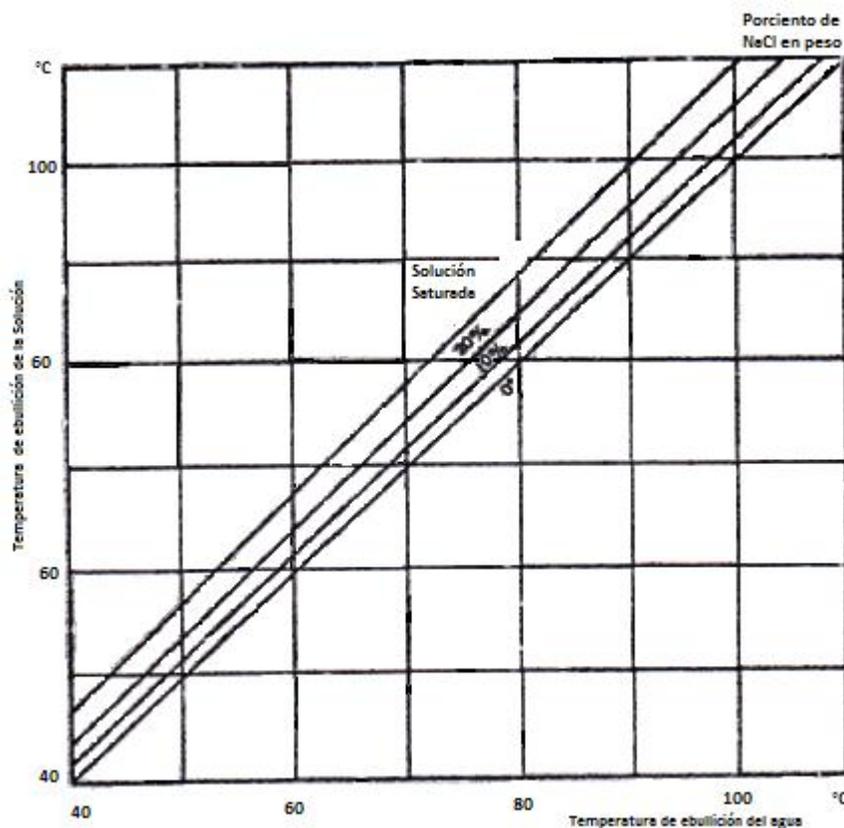


Fig. 18.-Diagramas de Duhring

La mayoría de las soluciones no presentan mucho calor de disolución, esto es cierto con las soluciones orgánicas tales como el azúcar, papel y sal. Sin embargo, el ácido sulfúrico o la sosa cáustica y el cloruro de calcio tiene mucho calor de disolución. Cuando se quieren encontrar las entalpías de esas disoluciones se necesita adicionar el calor de disolución al calor sensible y al latente. Estas disoluciones como se indicó anteriormente presentan además una gran elevación en su punto de ebullición.

Si al mezclarse dos líquidos o dos disoluciones se desprende o absorbe calor, se dice que hay un calor de disolución. El cambio de entalpia que se produce al mezclar dos líquidos a la misma temperatura se denomina calor de disolución.

El calor integral estándar de disolución se define como el cambio en la entalpia de un sistema cuando una mol de un soluto se disuelve en n moles de disolvente manteniendo la temperatura a 25 ° C y 1 atm de presión. El valor numérico del calor integral de disolución depende del número de moles de disolvente. El calor integral de disolución se acerca a un máximo a dilución infinita, este valor límite se conoce como calor integral de disolución infinita.



Los calores de disolución, se obtienen experimentalmente, y por lo general se presentan en forma de graficas como la que se muestra a continuación:

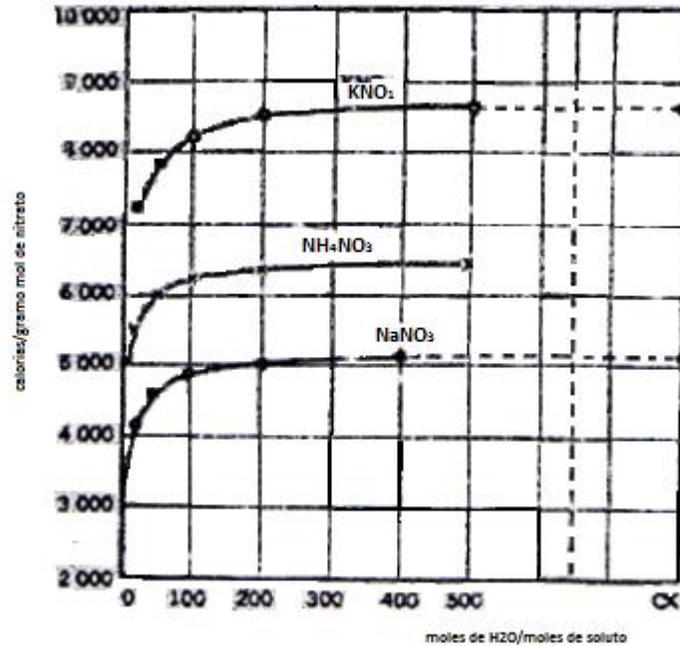


Fig. 19.-Calores de disolución de soluciones reales.

$$\tilde{H}_{disolucion} = \tilde{x}_1 \tilde{H}_1 + \tilde{x}_2 \tilde{H}_2 + \tilde{x}_2 \Delta \tilde{H}_D$$

En donde:

\tilde{H}_1 =entalpia del disolvente a T Y P

\tilde{H}_2 =entalpia del soluto a T y P

$\Delta \tilde{H}_D$ =entalpia de disolución por mol de soluto.

La capacidad calorífica para las soluciones ideales se puede obtener por:

$$C_{p_{mezcla}} = C_{p_1} x_1 + C_{p_2} x_2 + C_{p_3} x_3 + \text{etc.}$$

Sin embargo para las soluciones no ideales la ecuación anterior no puede emplearse.

En ciertas disoluciones en las que un sólido inorgánico está disuelto en agua, los calores específicos de la mezcla se pueden obtener a partir de graficas del tipo siguiente:

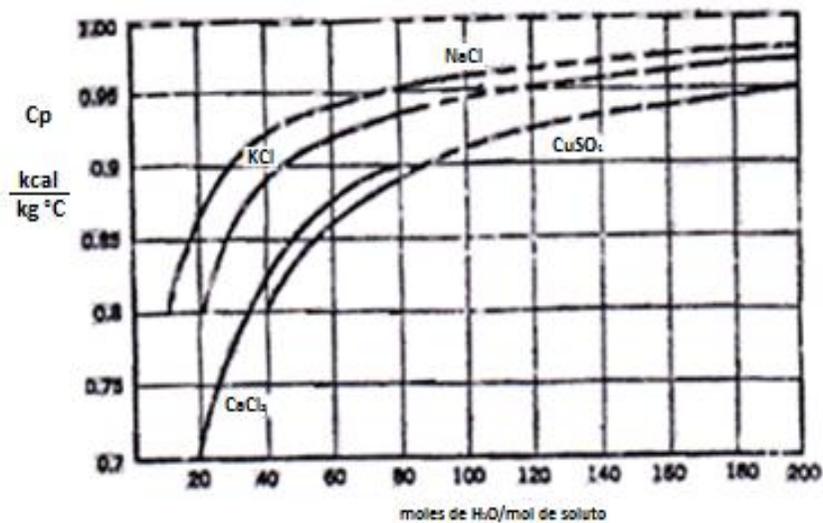


Fig. 20.-Capacidades caloríficas de soluciones reales.

Como el cálculo de las entalpías de las disoluciones que presentan calores de mezcla es tedioso, los ingenieros suelen utilizar los diagramas de entalpia concentración para mezclas binarias. En tales gráficas las entalpías por unidad de peso de disolución se grafican contra la concentración para una serie de temperaturas a presión constante.

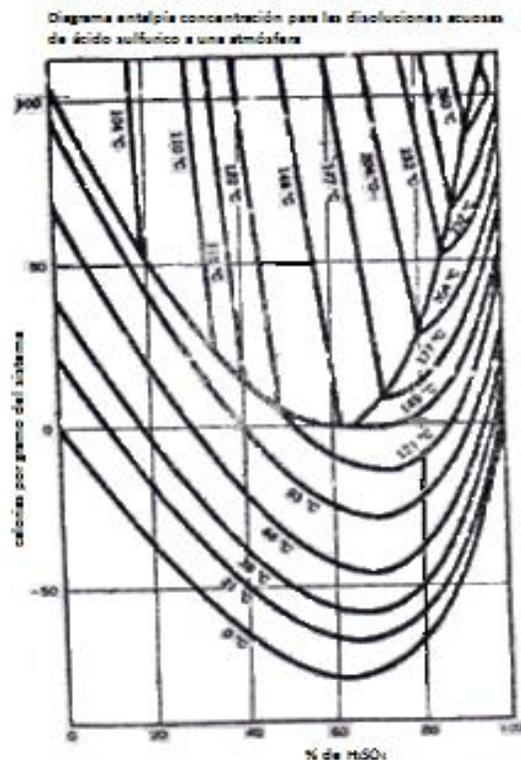


Fig. 21.-Entalpías de soluciones reales.



Con el uso de tales diagramas, los cálculos de mezclado y evaporación son simples y rápidos, requiriéndose solo el uso adecuado de los mismos. *En los apéndices de los libros se muestran diagramas de entalpias de disolución, capacidades caloríficas de soluciones no ideales y diagramas de entalpia-concentración.*

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La capacidad de estos sistemas puede obtenerse por medio de balances de materia y energía.

La cantidad de calor transferido al evaporador por el vapor es:

$$Q = UA (T_v - T_e) = G\lambda$$

En donde U es el coeficiente total de transferencia de calor, A el área de transferencia de calor del evaporador, T_v la temperatura de condensación del vapor y T_e la temperatura de ebullición de la disolución concentrada que se sale del evaporador.

Las variables que afectan la transferencia de calor son la viscosidad del fluido, ya que al evaporarse parte del fluido la consistencia de este cambia y con ello los coeficientes de transferencia de calor. Al eliminarse el agua también aumenta la concentración de sólidos en la solución, lo que puede provocar un aumento en el punto de ebullición, cosa que reduciría la transferencia de calor. Los productos salen a la temperatura de ebullición de la disolución concentrada.

En la tabla siguiente se presentan algunos coeficientes típicos de transferencia de calor.

Evaporadores de tubos largos verticales	Kcal/hm ² °C
Circulación natural	1000 a 3000
Circulación forzada	2000 a 10000
Evaporadores de tubos cortos	
Tubos horizontales	1000 a 2000
Tipo calandria	730 a 2500
Evaporadores de serpentín	1000 a 2000
Evaporadores de película agitada 1 cps	2000
Evaporadores de película agitada 100 cps	1500
Evaporadores de película agitada 10000 cps	600

Para tubos cortos verticales (evaporador de calandria) y con soluciones ideales La ecuación recomendada es:



$$U = \frac{30\Delta T^{0.69} u^{0.53}}{\mu^{0.25}}$$

en donde ΔT está en $^{\circ}\text{C}$, u en m/h ; μ en kg/hm

Para tubos cortos verticales con sosa caustica

$$U = \frac{200\Delta T^{0.56}}{\mu^{0.25}}$$

U en $\text{BTU/hft}^{2}\text{F}$; μ en cp y ΔT en $^{\circ}\text{F}$.

Para evaporadores de canasta

$$U = \frac{375\Delta T^{0.22} Pr^{0.4}}{(Vg - Vl)^{0.1}}$$

Para tubos largos

$$U = \frac{490D^{0.57} u^{\frac{3.6}{L}}}{\mu^{0.25}\Delta T^{0.1}}$$

D en pulgadas, u en pies/s , L longitud de los tubos en pies y la viscosidad del líquido en lb/h ft : Se emplea para tubos hasta de 8 pies de largo y velocidades de 2 a 8 pies/s . ΔT en $^{\circ}\text{F}$.

Para tubos largos con circulación forzada se puede usar la ecuación siguiente para obtener el hi .

$$\frac{hiDi}{k} = 0.0278 \left(\frac{Du\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{Cp\mu}{k} \right)^{0.4}$$



DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EMPLEADO

“EQUIPO PARA ESTUDIO DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO”

MODELO: PS-EV-202-UNAM A4

SERIE: EH-1005-035



Fig. 22.-EQUIPO DE EVAPORACIÓN

Este es el equipo principal donde se realizó la experimentación, el cual interconecta varios equipos y aparatos de medición, por medio de una tubería que facilita los diversos arreglos de evaporación que se ilustran en cada experimento.

El flujo del fluido de proceso se controla y direcciona por medio de Válvulas bola como se observa en la (Fig. 23). Con el fin de tener el arreglo que se desee.

Los servicios como agua de enfriamiento y vapor son manipulados por medio de Válvulas de control a la entrada del equipo como se observa en la (Fig. 24).



Fig. 23.- Válvula de bola



Fig. 24.- Válvula de control



A diferencia de las Válvulas bolas que cierran o abren el flujo de un jalón las Válvulas de control, como su nombre lo dice permiten la manipulación de un fluido con mayor precisión.

Dentro del equipo en la línea de vapor hay Válvulas bolas y dado que el vapor es peligroso en grado máximo. Se instalaron varios aparatos de seguridad en la entrada del equipo los cuales garantizan la seguridad del equipo, el laboratorio y sobretodo del operador.

En primera instancia se encuentra un divisor de corriente el cual libera el vapor en exceso por una vía alterna (ver fig. 25).

En segunda instancia se encuentra la Válvula de control autoaccionada la cual regula el paso del vapor automáticamente teniendo en cuenta los valores que marca el manómetro correspondiente (ver fig. 26).

Después sigue la Válvula de seguridad para vapor la cual se utiliza en circunstancias donde puede surgir un aumento de presión en un proceso como falla en el funcionamiento de Válvulas, funcionamiento incorrecto en un sistema de automatización, entrada anormal de calor en el proceso, corte de energía o incendio.

Las Válvulas de Seguridad son necesarias en cualquier situación de riesgo de aumento de presión que pueda ocurrir y en este caso se tiene la Válvula de seguridad para vapor (ver fig. 27) con una presión máxima de operación 21.1 kg/cm².

El vapor no nada más debe ser seguro sino que también tiene que estar limpio de condensado para que la tubería no se oxide y no pierda calor el sistema por culpa del condensado. Y esto se logra con la trampa termodinámica (ver fig. 28).



Fig. 25.- Divisor de corriente



Fig. 26.- Válvula de control auto accionada



Fig. 27.- Válvula de seguridad para vapor



Fig. 28.- Trampa termodinámica



Otra trampa es la tipo flotador y termostato, que se instalaron a la salida del evaporador en el flujo de vapor.

Las trampas tipo flotador son especialmente diseñadas para mantener el espacio de vapor libre de condensado, estas trampas se ajustan automáticamente a cualquier variación de condensado (ver fig. 29)

Otro instrumento que aporta lo suyo en la limpieza del vapor es la trampa de vapor la cual tiene la función de quitar el óxido al vapor ya que el óxido puede dañar internamente los equipos que conforman el evaporador, la trampa se puede ver en la (fig. 30).

Aparatos que integran el equipo de evaporación.

Se tienen dos evaporadores iguales, son concéntricos y miden poco más de 1.5m, además están aislados con fibra de vidrio y una capa de aluminio.

El flujo de proceso va a contracorriente del flujo de vapor y se puede ver el evaporador en la fig. 31.

Los evaporadores están conectados a un recipiente cilíndrico y que termina con forma cónica en el cual se lleva a cabo la separación de fases (vapor y líquido), también está aislado con fibra de vidrio y cubierto con una capa de aluminio (ver fig. 32).

Debajo de cada separador se encuentra un recipiente para observar el concentrado de la disolución y poder sacar muestras.

Es muy útil para observar lo que está pasando dentro del proceso y además facilita el manejo de las bombas dosificadoras para someter el sistema a un régimen permanente (ver fig. 33)



Fig. 29.- Trampa tipo flotador



Fig. 30.- Trampa de vapor



Fig. 31.- Evaporador



Fig. 32.- Separador



El equipo tiene tres bombas dosificadoras, la primera se encarga de mandar el flujo por el primer evaporador y las dos siguientes se ubican a la salida de los dos separadores después del recipiente para muestrear y se encargan de mandar el flujo a su recipiente correspondiente.



Fig. 33.- Recipiente de muestreo

Las bombas dosificadoras tienen un flujo máximo de 20 L/h, la ventaja con la bomba centrífuga es que la dosificadora no importa si se queda sin líquido ya que no se quema y no cavita. La desventaja es que el flujo que maneja es muy poco y se puede observar en la fig. 34.



Fig. 34.- Bomba dosificadora

El sistema se alimenta con un tanque de 20L y se usan también para almacenar concentrado y condensado de la disolución, pero para la recolección del condensado de vapor se usa cubetas (ver fig. 35).

Para una corrida o para el uso de vacío son útiles los tanques esféricos de vidrio que están instalados en el equipo con capacidad de 10L (ver fig. 36).



Fig. 35.- tanques de almacenamiento

El equipo cuenta con un condensador que permite recuperar el flujo de vapor que se separó de la disolución y mide aproximadamente 1.9m y puede manejar caudales grandes lo que permite un buen condensado (ver fig. 37).

Para generar vacío el equipo dispone una bomba de vacío de 1/5 hp lo que provoca un vacío con fuerza suficiente (ver fig. 38).



Fig. 36.- Tanques para concentrado y condensado

El equipo cuenta con un panel de control el cual después de prender los switches que alimentan la corriente eléctrica, se conecta el equipo, se prende el panel de control el cual controla el encendido y apagado de las bombas dosificadoras y de la bomba de vacío, pero algo más importante es que tiene pantallas que muestran la temperatura del sistema (fig. 39)



Fig. 37.- Condensador



Fig. 38.- Bomba de vacío



Fig. 39.- Panel de Control.

Para finalizar hablaré de los instrumentos de medición que posee el equipo. Los primeros son los termopares que se encuentran dentro del equipo y está conformado de dos varillas de diferente material y calibradas lo que da como resultado una medición muy exacta y el valor obtenido lo podemos obtener en el panel de controles y para saber dónde se encuentran los termopares ver la fig. 40. Los siguientes instrumentos miden la presión y se llaman manómetros, los cuales se pueden leer en diferentes unidades (kg/cm^2 o lb/in^2) suelen estar a la entrada y salida de los evaporadores y el condensador, su lectura debe ser perpendicular a la posición del manómetro (ver fig. 41). Por último los rotámetros que tienden a ser los más inexactos entre más chicos sean y sus flujos más grandes, pero si el rotámetro es grande y el flujo regular se puede tener buenos resultado como el rotámetro del agua de enfriamiento a la entrada del condensador (ver fig. 42).



Fig. 40.- Termopar



Fig. 41.- Manómetro

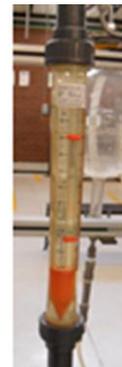


Fig. 42.- Rotámetro



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Agua)

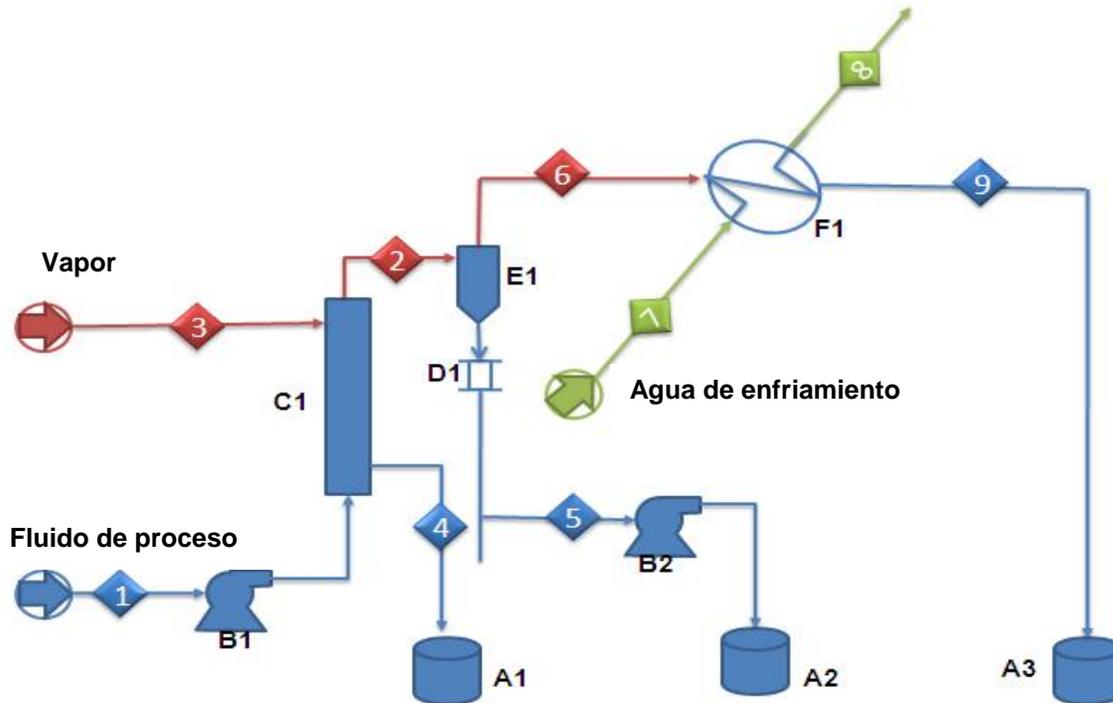


Fig.-1.1 Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Agua)

Flecha roja = Vapor
Flecha azul = Fluido de proceso
Flecha verde = Agua de enfriamiento

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor
A2 = Recipiente recolector de concentrado
A3 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado

C1 = EVAPORADOR 1
D1 = Recipiente para el muestreo

E1 = Separador
F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



Fig.-1.2



c) Fig.-1.4



b) Fig.-1.3



e) Fig.-1.6



d) Fig.-1.5



- 2) En el panel de control se procede a encender las bombas dosificadoras 1 y 2 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Simple Efecto Agua).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de el visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 180 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-1.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2



kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.

- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-1.8 Tanque de alimentación



Fig.-1.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a simple efecto, efectúe 5 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 4 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.

Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a simple efecto (agua)

CORRIDA 1									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	26.36	97.44				92.56	15.96	54.3	20.7
P (kgf/cm ²)		0.19167	1.88333	1.85					
F(L/h)				19.8	10.5		180	180	14.4
C (%)									
H (l)									



CORRIDA 2									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	25.5	97.46				92.54	16.04	50.82	21.24
P (kgf/cm ²)		0.2	1.905	1.9					
F(L/h)				13.8	9		180	180	12
C (%)									
H ()									

CORRIDA 3									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	23	97.5				92.54	16.16	52.58	21.86
P (kgf/cm ²)		0.2	1.93	1.92					
F(L/h)				17.7273	8.86364		180	180	11.4545
C (%)									
H ()									

CORRIDA 4									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	21.9	97				92.5	16.34	52.28	22.68
P (kgf/cm ²)		0.195	1.93	1.89					
F(L/h)				16.5714	11.7143		180	180	11.7143
C (%)									
H ()									

CORRIDA 5									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	21.22	97.04				92.5	16.6	51	23.5
P (kgf/cm ²)		0.19	1.91	1.9					
F(L/h)				17.1818	10.3636		180	180	11.1818
C (%)									
H ()									

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.72 está bien considerando las condiciones a las que operó el equipo, además el calor transferido fue poco más de 90% y lo más importante es que para ser de simple efecto se esperaba menos.

En la experiencias 1 (corrida 4) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 01.

Para ilustrar el proceso de cálculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrán tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$



$$P_{a2} = \left(0.195 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 0.9914 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.93 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 2.7264 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.89 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 2.6864 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

Balance de materia

$$\rho_{Agua} = 1 \left[\frac{g}{ml}\right], \left[\frac{kg}{l}\right]$$

Entrada = salida

$$T_a=21.0^\circ C \quad \rho_{Agua} = 0.99802$$

$$F_{L1} = F_{L5} + F_{L9}$$

$$T_b=22.0^\circ C \quad \rho_{Agua} = 0.99780$$

F_{L1} = Concentrado + Destilado

$$T_1=21.9^\circ C \quad \rho_{Agua} = 0.99782$$

$$F_{L1} = 11.714 \text{ L/h} + 11.714 \text{ L/h}$$

$$F_{L1} = 23.428 \text{ L/h}$$

Nota: Para la densidad se saca datos de tablas o en su defecto se interpola.

$$M_1 = 23.428 \text{ L/h} * 0.99782 \text{ kg/l} = 23.37692 \text{ kg/h}$$

Quando es un líquido la temperatura y la entalpia son casi iguales y de esta deducción sacamos los siguientes valores.

$$H_1 = 21.9 \text{ kcal/kg}$$

$$H_8 = 52.28 \text{ kcal/kg}$$

$$H_7 = 16.34 \text{ kcal/kg}$$

$$H_9 = 22.68 \text{ kcal/kg}$$

Con los datos experimentales y con ayuda de tablas o banco de datos se puede calcular los demás valores.

$$P_1 = ?$$

$$T_a=21.0^\circ C$$

$$P_a= 2.485kPa$$

$$T_b=22.0^\circ C$$

$$P_b= 2.642kPa$$

$$T_1=21.9^\circ C$$

$$P_1= 2.626kPa$$

$$P_1 = 2.626kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP}\right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa}\right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}}\right) = 0.0267 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_1 = 0.0267 \text{ kg/cm}^2$$



$P_6 = ?$

$T_a = 92^\circ\text{C}$

$P_a = 75.61\text{kPa}$

$T_b = 93^\circ\text{C}$

$P_b = 78.49\text{kPa}$

$T_6 = 92.5^\circ\text{C}$

$P_6 = 77.05\text{kPa}$

$$P_6 = 77.05\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.7878 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$P_6 = 0.7878 \text{ kg/cm}^2$

$P_7 = ?$

$T_a = 16^\circ\text{C}$

$P_a = 1.817\text{kPa}$

$T_b = 17^\circ\text{C}$

$P_b = 1.936\text{kPa}$

$T_7 = 16.34^\circ\text{C}$

$P_7 = 1.8574\text{kPa}$

$$P_7 = 1.8574\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0189 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$P_7 = 0.0189 \text{ kg/cm}^2$

$P_8 = ?$

$T_a = 52^\circ\text{C}$

$P_a = 13.61\text{kPa}$

$T_b = 53^\circ\text{C}$

$P_b = 14.29\text{kPa}$

$T_8 = 52.28^\circ\text{C}$

$P_8 = 13.8004\text{kPa}$

$$P_8 = 13.80\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.1406 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$P_8 = 0.1406 \text{ kg/cm}^2$

$P_9 = ?$

$T_a = 22^\circ\text{C}$

$P_a = 2.642\text{kPa}$

$T_b = 23^\circ\text{C}$

$P_b = 2.808\text{kPa}$

$T_9 = 22.68^\circ\text{C}$

$P_9 = 2.754\text{kPa}$



$$P_9 = 2.754kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.028 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_9 = 0.028 \text{ kg/cm}^2$$

Por las líneas de flujo del DFP y por el balance de masa se puede hacer esta suposición.

$$F_{V6} = F_{L9} \quad F_{V6} = 11.71L/h$$

$$T_6 = T_5 = 92.5^\circ\text{C}$$

Para la corriente 5, como esta en fase liquido su entalpia es igual a su temperatura

$$T_5 = H_5 = 92.5 \quad \rho_{\text{Agua}} = 1 \left[\frac{g}{ml} \right], \left[\frac{kg}{l} \right]$$

$$T_a = 90^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{Agua}} = 0.96534$$

$$T_b = 95^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{Agua}} = 0.96192$$

$$T_5 = 92.5^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{Agua}} = 0.96363$$

$$M_5 = 11.71 \text{ L/h} * 0.96363 \text{ kg/l} = 11.2841 \text{ kg/h}$$

Para la corriente 6, aquí la fase es vapor y se saca de tablas de vapor.

$$T_a = 92^\circ\text{C} \quad H_{\text{vapor}} = 2663.4\text{kJ/kg}$$

$$T_b = 93^\circ\text{C} \quad H_{\text{vapor}} = 2665.0\text{kJ/kg}$$

$$T_6 = 92.5^\circ\text{C} \quad H_{6\text{vapor}} = 2664.2\text{kJ/kg}$$

$$H_{6\text{vapor}} = 2664.2\text{kJ/kg} = H_{6\text{vapor}} = 636.759\text{kcal/kg}$$

Para la corriente 2, cálculo de la entalpia con la presión absoluta.

$$P_2 = 0.9914 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 97.296kPa$$

$$P_2 = 97.296kPa \approx (\text{Tabla}) 97.76kPa$$

$$H_{2\text{vapor}} = 2674.4\text{kJ/kg}$$



$$H_{2 \text{ vap}} = 2674.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 639.197 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$H_{2 \text{ vapor}} = 639.197 \text{kcal/kg}$$

Para la corriente 3, cálculo de la T, ρ, M y H si consideramos su presión absoluta y que $F_{V3}=F_{L4}$, $F_{V3}=16.57 \text{L/h}$

$$P_3 = 2.7264 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 267.570 \text{kPa}$$

$$P_a = 254.35 \text{kPa}$$

$$T_a = 128^\circ \text{C}$$

$$P_b = 270.13 \text{kPa}$$

$$T_b = 130^\circ \text{C}$$

$$P_3 = 267.57 \text{Pa}$$

$$T_3 = 129.67^\circ \text{C}$$

$$P_a = 254.35 \text{kPa}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2717.2 \text{kJ/kg}$$

$$P_b = 270.13 \text{kPa}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2719.9 \text{kJ/kg}$$

$$P_3 = 267.570 \text{Pa}$$

$$H_{3 \text{ vapor}} = 2719.4 \text{kJ/kg}$$

$$H_{3 \text{ vap}} = 2719.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 649.96 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Para la densidad en este caso la obtuve de una grafica y no de tablas.

$$\left(58.5 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{kg}}{2.2046 \text{lb}} \right) * \left(\frac{1 \text{ft}^3}{28.32 \text{l}} \right) = 0.9369 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_3 = 16.57 \text{ L/h} * 0.9369 \text{ kg/l} = 15.52 \text{kg/h}$$

Para la corriente 4, cálculo de la T, ρ, M y su entalpia considerando que se encuentra en estado líquido.

$$P_4 = 2.6864 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 263.64 \text{kPa}$$



$$P_a = 254.35 \text{ kPa}$$

$$T_a = 128^\circ\text{C}$$

$$P_a = 270.13 \text{ kPa}$$

$$T_b = 130^\circ\text{C}$$

$$P_4 = 263.64 \text{ kPa}$$

$$T_4 = 129.17^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Agua}} = \left(59 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}\right) * \left(\frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lb}}\right) * \left(\frac{1 \text{ ft}^3}{28.32 \text{ l}}\right) = 0.9449 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_4 = 16.57 \text{ L/h} * 0.9449 \text{ kg/l} = 15.6585 \text{ kg/h}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_9}{M_4} = \frac{11.6837}{15.6585} = 0.7461$$

Calor dado en el evaporador

$$Q = M_3(H_3 - H_4)$$

$$Q = 15.524 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(649.96 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 129.17 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right)$$

$$Q = 8084.743 \text{ Kcal/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_8 (H_8 - H_7)$$

$$Q_q = 177.6528 \text{ kg/h} * (52.28 \text{ Kcal/kg} - 16.34 \text{ Kcal/kg})$$

$$Q_q = 6384.84 \text{ kca/h}$$

Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q = UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0 = \pi D_0 L$$



A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0 = \pi \cdot 0.031 \text{m} \cdot 1.49 \text{m} = 0.145 \text{m}^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 \cdot \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}} =$ diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{8084.743 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145 \text{m}^2 \cdot (129.6^\circ\text{C} - 92.5^\circ\text{C})} = 1502.87 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}}$$



TABLA 01) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AGUA)

Corriente	1	2	3	4
	Liquido	Vapor	Vapor	Liquido
T (°C)	21.9	97	129.67	129.17
P (kg/cm ²)	0.0267	0.9914	2.7264	2.6864
F (L/h)	23.428	-----	16.57	16.57
ρ (kg/l)	0.9978	-----	0.9369	0.9449
M (kg/h)	23.37	-----	15.5249	15.6585
C %	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	21.94	639.197	649.967	129.17

Corriente	5	6	7	8	9
	Liquido	Vapor	Liquido	Liquido	Liquido
T (°C)	92.5	92.5	16.34	52.28	22.68
P (kg/cm ²)	0.7878	0.7878	0.0189	0.1466	0.028
F (L/h)	11.71	11.71	180	180	11.71
ρ (kg/l)	0.96363	0.96363	0.998991	0.98696	0.99776
M (kg/h)	11.2841	11.2841	179.8038	177.6528	11.6837
C %	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	92.5	636.759	16.34	52.28	22.68



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Agua-Vacío)

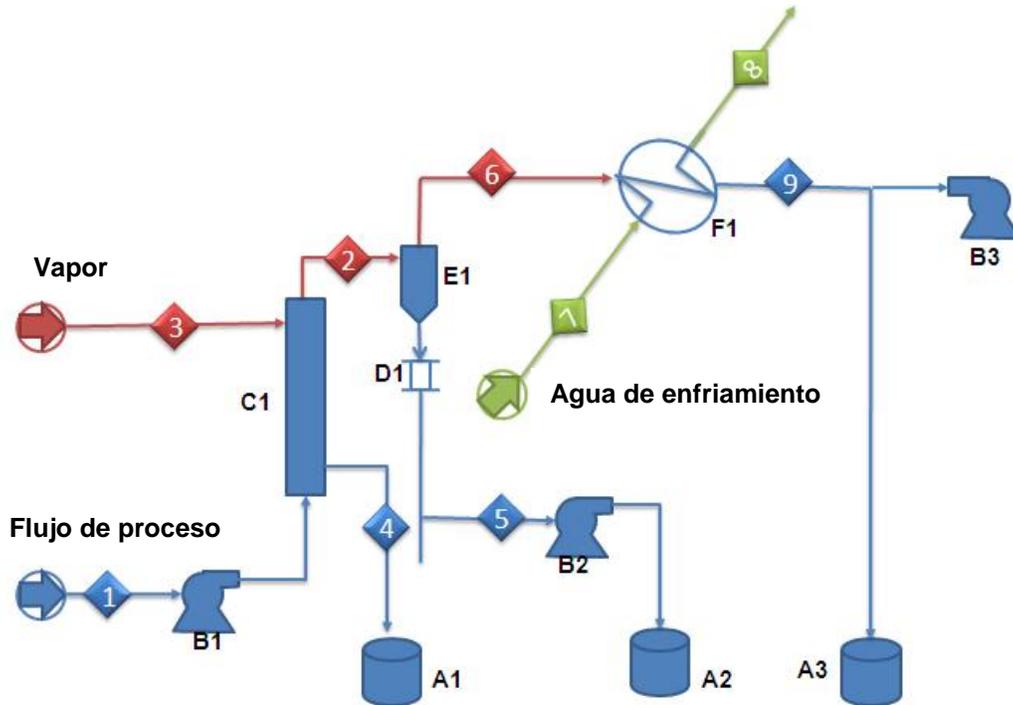


Fig.-2.1 Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Agua-Vacío)

Flecha roja = Vapor

Flecha azul = Fluido de proceso

Flecha verde = Agua de enfriamiento

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor

A2 = Recipiente recolector de concentrado

A3 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso

B2 = Bomba Dosificadora del concentrado

B3 = Bomba de Vacío

C1 = EVAPORADOR 1

D1 = Recipiente para el muestreo

E1 = Separador

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente

Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



a) Fig.-2.2



b) Fig.-2.4



c) Fig.-2.3



e) Fig.-2.6



d) Fig.-2.5



- 2) En el panel de control se procede a encender las bombas dosificadoras 1 y 2 y de vacío 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Simple Efecto Agua-Vacío).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de el visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 280 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas (dosificadoras) manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-2.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) La bomba de vacío la encendí 5 min antes de cada corrida y al inicio de la misma cerré el sistema (cerrar la válvulas inferiores de los tanques esféricos).



Fig.-2.8 Bomba de Vacío

- 11) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-2.9 Tanque de alimentación



Fig.-2.10 Tanques de almacenamiento esféricos

- 12) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos



RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a simple efecto (Agua - Vacío), efectúe 3 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 3 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.

Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a simple efecto (Agua - Vacío)

CORRIDA 1 (Agua - vacío)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	20.8	96.4				91.48	16.8	51.6	23.6
$P (kgf/cm^2)$		0.165	1.9	1.91					
$F(L/h)$				17.14286	10.85714		180	180	11.71429
$C (\%)$									
$H ()$									

CORRIDA 2 (Agua - vacío)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	18.96667	88.73333				77.45	16.18333	42.43333	23.3
$P (kgf/cm^2)$		-0.0543	1.434167	1.408333					
$F(L/h)$				14.52	15.936		280	280	18.24
$C (\%)$									
$H ()$									

CORRIDA 3 (40mmhg de vacío)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	19.5	89.61667				76.95	16.23333	41.93333	35.08333
$P (kgf/cm^2)$		-0.0679	1.48	1.483333					
$F(L/h)$				18.48	16.68		280	280	13.584
$C (\%)$									
$H ()$									

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.773 está bien considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 90% y lo más importante es que para ser de simple efecto se esperaba menos.

En la experiencias 2 (corrida 3) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 02.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.



Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(-0.0679 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.7285 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.48 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.276 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.48 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.276 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Balance de materia

$$\rho_{\text{Agua}} = 1 \left[\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right], \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right]$$

Entrada = salida

$$T_a = 19.0^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Agua}} = 0.9984$$

$$F_{L1} = F_{L5} + F_{L9}$$

$$T_b = 20.0^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Agua}} = 0.9982$$

F_{L1} = Concentrado + Destilado

$$T_1 = 19.5^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Agua}} = 0.9983$$

$$F_{L1} = 16.68 \text{ L/h} + 13.58 \text{ L/h}$$

$$F_{L1} = 30.26 \text{ L/h}$$

Nota: Para la densidad se saca datos de tablas o en su defecto se interpola.

$$M_1 = 30.26 \text{ L/h} * 0.9983 \text{ kg/l} = 30.20 \text{ kg/h}$$

Quando es un líquido la temperatura y la entalpia son casi iguales y de esta deducción sacamos los siguientes valores.

$$H_1 = 19.54 \text{ kcal/kg}$$

$$H_8 = 41.93 \text{ kcal/kg}$$

$$H_7 = 16.23 \text{ kcal/kg}$$

$$H_9 = 35.08 \text{ kcal/kg}$$

Con los datos experimentales y con ayuda de tablas o banco de datos se puede calcular los demás valores.

$$P_1 = ?$$

$$T_a = 19.0^\circ\text{C}$$

$$P_a = 2.196 \text{ kPa}$$

$$T_b = 20.0^\circ\text{C}$$

$$P_b = 2.337 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 19.5^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 2.2665 \text{ kPa}$$



$$P_1 = 2.2665kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.0230 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_1 = 0.0230 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_6 = ?$$

$$T_a = 76^\circ\text{C}$$

$$P_a = 40.19kPa$$

$$T_b = 77^\circ\text{C}$$

$$P_b = 41.89kPa$$

$$T_6 = 76.95^\circ\text{C}$$

$$P_6 = 41.805kPa$$

$$P_6 = 41.805kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.4259 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_6 = 0.42597 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_7 = ?$$

$$T_a = 16^\circ\text{C}$$

$$P_a = 1.817kPa$$

$$T_b = 17^\circ\text{C}$$

$$P_b = 1.936kPa$$

$$T_7 = 16.23^\circ\text{C}$$

$$P_7 = 1.844kPa$$

$$P_7 = 1.844kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.0187 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_7 = 0.0187 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_8 = ?$$

$$T_a = 41^\circ\text{C}$$

$$P_a = 7.777kPa$$

$$T_b = 42^\circ\text{C}$$

$$P_b = 8.198kPa$$

$$T_8 = 41.93^\circ\text{C}$$

$$P_8 = 8.168kPa$$

$$P_8 = 8.1685kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.0832 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_8 = 0.08323 \text{ kg/cm}^2$$



$$P_9 = ? \quad P_9 = 0.0575 \text{ kg/cm}^2$$

$$T_a = 35^\circ\text{C} \quad P_a = 5.622 \text{ kPa}$$

$$T_b = 36^\circ\text{C} \quad P_b = 5.940 \text{ kPa}$$

$$T_9 = 35.08^\circ\text{C} \quad P_9 = 5.647 \text{ kPa}$$

$$P_9 = 5.647 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0575 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Por las líneas de flujo del DFP y por el balance de masa se puede hacer esta suposición.

$$F_{V6} = F_{L9} \quad F_{V6} = 13.5 \text{ L/h}$$

$$T_6 = T_5 \quad T_5 = 76.95^\circ\text{C}$$

Para la corriente 5, como esta en fase liquido su entalpia es igual a su temperatura

$$T_5 = H_5 = 76.95 \text{ kcal/kg} \quad \rho_{\text{Agua}} = 1 \left[\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right], \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right]$$

$$T_a = 76^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{Agua}} = 0.97489$$

$$T_b = 77^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{Agua}} = 0.97183$$

$$T_5 = 76.95^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{Agua}} = 0.97369$$

$$M_5 = 16.68 \text{ L/h} * 0.97369 \text{ kg/l} = 16.2411 \text{ kg/h}$$

Para la corriente 6, aquí la fase es vapor y se saca de tablas de vapor.

$$T_a = 76^\circ\text{C} \quad H_{\text{vapor}} = 2637.1 \text{ kJ/kg}$$

$$T_b = 77^\circ\text{C} \quad H_{\text{vapor}} = 2638.7 \text{ kJ/kg}$$

$$T_6 = 76.95^\circ\text{C} \quad H_{6\text{vapor}} = 2638.62 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{6\text{vapor}} = 2638.62 \text{ kJ/kg} = H_{6\text{vapor}} = 630.646 \text{ kcal/kg}$$

Para la corriente 2, cálculo de la entalpia con la presión absoluta.

$$P_2 = 0.7285 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right) = 71.495 \text{ kPa}$$



$$P_2 = 71.495 \text{ kPa}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2660.92 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{2 \text{ vap}} = 2660.92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 635.975 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$H_{2 \text{ vapor}} = 635.975 \text{ kcal/kg}$$

Para la corriente 3, cálculo de la T, ρ, M y H si consideramos su presión absoluta y que $F_{V3} = F_{L4}$, $F_{V3} = 16.57 \text{ L/h}$

$$P_3 = 2.276 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right) = 223.368 \text{ kPa}$$

$$P_a = 211.45 \text{ kPa}$$

$$T_a = 122^\circ \text{C}$$

$$P_b = 225.04 \text{ kPa}$$

$$T_b = 124^\circ \text{C}$$

$$P_3 = 223.36 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 123.7^\circ \text{C}$$

$$P_a = 211.45 \text{ kPa}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2708.8 \text{ kJ/kg}$$

$$P_b = 225.04 \text{ kPa}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2711.6 \text{ kJ/kg}$$

$$P_3 = 223.36 \text{ Pa}$$

$$H_{3 \text{ vapor}} = 2711.26 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{3 \text{ vap}} = 2711.26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 647.989 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Para la densidad en este caso la obtuve de una grafica y no de tablas.

$$\left(59 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lb}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ft}^3}{28.32 \text{ l}} \right) = 0.94499 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_3 = 18.48 \text{ L/h} * 0.9499 \text{ kg/l} = 17.4634 \text{ kg/h}$$

Para la corriente 4, cálculo de la T, ρ, M y su entalpia considerando que se encuentra en estado liquido.



$$P_4 = 2.276 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 223.368kPa$$

$$P_a = 211.45kPa \quad T_a = 122^\circ C$$

$$P_a = 225.04kPa \quad T_b = 124^\circ C$$

$$P_4 = 223.368kPa \quad T_4 = 123.7^\circ C$$

$$\rho_{Agua} = \left(59 \frac{lb}{ft^3} \right) * \left(\frac{1kg}{2.2046 lb} \right) * \left(\frac{1 ft^3}{28.32 l} \right) = 0.9449 \frac{kg}{l}$$

$$M_4 = 18.48 L/h * 0.9449 kg/l = 17.4634kg/h$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_9}{M_4} = \frac{13.4993}{17.4634} = 0.7730$$

Calor dado por el evaporador

$$Q = M_3 (H_3 - H_4)$$

$$Q = 17.4634 \frac{kg}{h} * \left(647.9896 \frac{kcal}{kg} - 123.7 \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$Q = 9155.879 Kcal/h$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_8 (H_8 - H_7)$$

$$Q_q = 277.6072kg/h * (41.93Kcal/kg - 16.23Kcal/kg)$$

$$Q_q = 7134.50kca/h$$



Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q=UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0=\pi D_0L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0=\pi*.031m*1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{9155.879 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (123.7^\circ C - 89.6^\circ C)} = 1851.73 \frac{\text{kcal}}{m^2^\circ C h}$$



TABLA 02) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AGUA - VACIO)

Corriente	1	2	3	4
	Liquido	Vapor	Vapor	Liquido
T (°C)	19.5	89.6	123.7	123.7
P (kg/cm ²)	0.0230	0.7285	2.276	2.276
F (L/h)	30.26	-----	18.48	18.48
ρ (kg/l)	0.9983	-----	0.94499	0.9449
M (kg/h)	30.20	-----	17.4634	17.4634
C %	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	19.54	635.975	647.9896	123.7

Corriente	5	6	7	8	9
	Liquido	Vapor	Liquido	Liquido	Liquido
T (°C)	76.95	76.95	16.23	41.93	35.08
P (kg/cm ²)	0.4259	0.4259	0.0187	0.08323	0.05754
F (L/h)	16.68	13.58	280	280	13.58
ρ (kg/l)	0.97369	0.97369	0.99893	0.99149	0.99406
M (kg/h)	16.2411	13.2227	279.70	277.6072	13.4993
C %	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	76.95	630.646	16.23	41.93	35.08



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Azúcar)

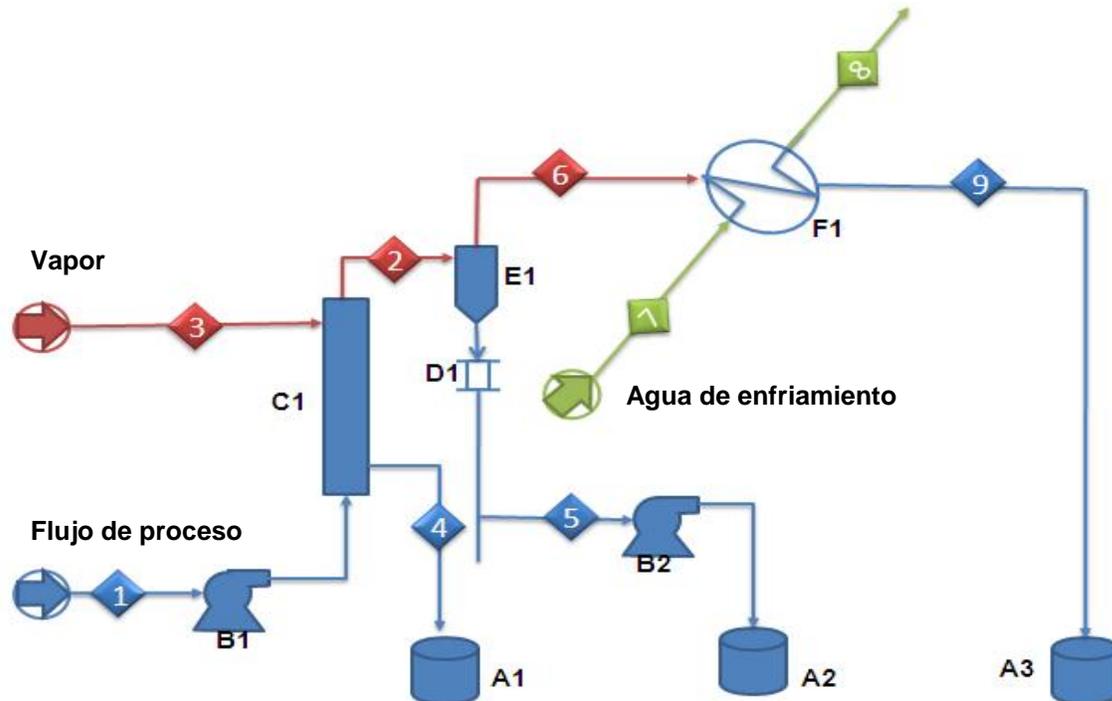


Fig.-3.1 Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Azúcar)

Flecha roja = Vapor
Flecha azul = Fluido de proceso
Flecha verde = Agua de enfriamiento

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor
A2 = Recipiente recolector de concentrado
A3 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado

C1 = EVAPORADOR 1
D1 = Recipiente para el muestreo

E1 = Separador
F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



a) Fig.-3.2



b) Fig.-3.4



c) Fig.-3.3



e) Fig.-3.6



d) Fig.-3.5



- 2) En el panel de control se procede a encender las bombas dosificadoras 1 y 2 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Simple Efecto Azúcar).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de él visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 280 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua-azúcar).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-3.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2



kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.

- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-3.8 Tanque de alimentación



Fig.-3.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos
- 12) También cada 5 min tomaba muestras de concentrado para posteriormente sacar el % peso con el refractómetro.

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a simple efecto, efectúe 3 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 2 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a simple efecto (azúcar)

CORRIDA 1 (Azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	19.4	97.38				92.62	16.78	41.82	23.26
P (kgf/cm ²)		0.2	1.83	1.83					
F(L/h)				17.55	12		280	280	12
C (%)									
H (l)									

CORRIDA 2 (Azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	19.64	96.86				92.54	17	39.88	23.74
P (kgf/cm ²)		0.2	1.84	1.825					
F(L/h)				18.3	12		280	280	11.1
C (%)									
H (l)									

CORRIDA 3 (Azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΣT (°C)	34.6	97.14				92.6	17.14	41.06	24.48
P (kgf/cm ²)		0.2	1.86	1.85					
F(L/h)				15.27273	9.272727		280	280	10.90909
C (%)									
H (l)									

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.65 está bien considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 80% y lo más importante es que para ser de simple efecto se esperaba menos.

En la experiencias 3 (corrida 2) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 03.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Balance de azúcar

$$F_{L1} = F_{L9} + F_{L5} = 11.1 \frac{l}{h} + 12 \frac{l}{h} = 23.1 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L9}}{F_{L4}} = \frac{11.1 \frac{l}{h}}{18.3 \frac{l}{h}} = 0.6065 = 60\%$$



Teniendo la ecuación $F_{L1}(x_1) = F_{L5}(x_5)$ se generan dos ecuaciones en una se tiene constante F_{L5} y en la otra se mantiene x_5 .

$$23.1 \frac{l}{h} (0.05) = 12 \frac{l}{h} (x_5) \quad x_5 = 0.096$$

$$23.1 \frac{l}{h} (0.05) = F_{L5} \quad (0.1)F_{L5} = 11.55 \frac{l}{h}$$

Tomo la ecuación que tiene como constante x_5 ya que opino que la refractometría es más exacta que la medición con rotámetro.

Con respecto a lo anterior cambiamos $F_{L5} = 12 \text{ L/h}$ a $F_{L5} = 11.55 \text{ L/h}$ para buscar F_{L9} y checar la economía.

$$F_{L1} = F_{L9} + F_{L5}F_{L9} = F_{L1} - F_{L5} \quad F_{L9} = 23.1 \frac{l}{h} - 11.55 \frac{l}{h} = 11.55 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L9}}{F_{L4}} = \frac{11.55 \frac{l}{h}}{18.3 \frac{l}{h}} = 0.63 = 63\%$$

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.2 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.996 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.84 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.636 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.825 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.621 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

Calcular corriente 1

$$P_1 = ?$$

$$T_a = 19.0^\circ\text{C}$$

$$P_a = 2.196 \text{ kPa}$$

$$T_b = 20.0^\circ\text{C}$$

$$P_b = 2.337 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 19.64^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 2.286 \text{ kPa}$$



$$P_1 = 2.286kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.023 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_1 = 0.023 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 23.1 \frac{l}{h} * 0.998 \frac{kg}{l} = 23.05 \frac{kg}{h}$$

$$T_1 \approx H_{1Liq} = 19.64 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_a = 96^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2669.7 \text{ kJ/kg}$$

$$T_b = 97^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2671.3 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 = 96.86^\circ\text{C}$$

$$H_{2\text{vapor}} = 2671.0 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{2\text{vap}} = 2671.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 638.38 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2\text{vapor}} = 638.38 \text{ kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 2.636 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 258.69kPa$$

$$P_a = 254.35kPa$$

$$T_a = 128^\circ\text{C}$$

$$P_b = 270.13kPa$$

$$T_b = 130^\circ\text{C}$$

$$P_3 = 258.69Pa$$

$$\underline{T_3 = 128.5^\circ\text{C}}$$

$$P_a = 254.35kPa$$

$$H_{\text{vapor}} = 2717.2 \text{ kJ/kg}$$

$$P_b = 270.13kPa$$

$$H_{\text{vapor}} = 2719.2 \text{ kJ/kg}$$

$$P_3 = 258.69Pa$$

$$H_{\text{vapor}} = 2717.7 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{3\text{vap}} = 2717.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 649.54 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$M_3 = F_{V3} * \rho_3$$

$$M_3 = 18.3 \text{ L/h} * 0.958 \text{ kg/l} = 17.531 \text{ kg/h}$$



Calcular corriente 4

$$P_4 = 2.621 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 257.22kPa$$

$$P_a = 254.35kPa$$

$$T_a = 128^\circ C$$

$$P_a = 270.13kPa$$

$$T_b = 130^\circ C$$

$$P_4 = 257.22kPa$$

$$\underline{T_4 = 128.3^\circ C}$$

Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla ($100^\circ C$).

$$\rho_{Agua4} = 0.958 kg/l$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 18.3 L/h * 0.958 kg/l = 17.531 kg/h$$

$$H_{4liq} = 128.3 Kcal/kg$$

Calcular corriente 5

La $T_5 = T_6 = 92.54^\circ C$ ya que las dos corrientes se encuentran en equilibrio.

$$P_5 = ?$$

$$T_a = 92^\circ C$$

$$P_a = 75.61kPa$$

$$T_b = 93^\circ C$$

$$P_b = 78.49kPa$$

$$T_5 = 92.54^\circ C$$

$$P_5 = 77.165kPa$$

$$P_5 = 77.165kPa \left(\frac{1000Pa}{1kPa} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.786 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_5 = 0.786 kg/cm^2$$

$$T_5 \approx H_5 = 92.54 Kcal/kg$$

$$M_5 = F_{L5} * \rho_5$$

$$\rho_{Aguatbla} = 0.96366 \frac{kg}{l}$$

$$M_5 = 11.55 L/h * 0.963 kg/l = 11.12 kg/h$$



Calcular corriente 6

La P_{abs6} es igual a la P_{abs5}

$$P_6 = 0.7862 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{L9} = F_{V6} = 11.55 \text{ L/h}$$

$$T_a = 92^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2663.4 \text{ kJ/kg}$$

$$T_b = 93^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2665.0 \text{ kJ/kg}$$

$$T_6 = 92.54^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2664.2 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{6\text{vapor}} = 2664.2 \text{ kJ/kg} = H_{6\text{vapor}} = 636.75 \text{ kcal/kg}$$

$$M_6 = F_{V6} * \rho_6$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.96366 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_6 = 11.55 \text{ L/h} * 0.963 \text{ kg/l} = 11.12 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 7

$$P_7 = ?$$

$$T_7 = 17^\circ\text{C}$$

$$P_7 = 1.936 \text{ kPa}$$

$$P_7 = 1.936 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.01972 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_7 = 0.01972 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.998 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_7 = F_{L7} * \rho_7$$

$$M_7 = 280 \text{ L/h} * 0.998 \text{ kg/l} = 279.44 \text{ kg/h}$$

$$T_7 \approx H_7 = 17 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 8

$$P_8 = ?$$

$$T_a = 39^\circ\text{C}$$

$$P_a = 6.991 \text{ kPa}$$

$$T_b = 40^\circ\text{C}$$

$$P_b = 7.375 \text{ kPa}$$

$$T_8 = 39.88^\circ\text{C}$$

$$P_8 = 7.328 \text{ kPa}$$



$$P_8 = 7.328kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.07466 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_8 = 0.07466 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.992 \frac{kg}{l}$$

$$M_8 = F_{L8} * \rho_8$$

$$M_8 = 280 \text{ L/h} * 0.992 \text{ kg/l} = 277.76 \text{ kg/h}$$

$$T_8 \approx H_8 = 39.88 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 9

$$P_9 = ?$$

$$T_a = 23^\circ\text{C}$$

$$P_a = 2.808 \text{ kPa}$$

$$T_b = 24^\circ\text{C}$$

$$P_b = 2.982 \text{ kPa}$$

$$T_9 = 23.74^\circ\text{C}$$

$$P_9 = 2.936 \text{ kPa}$$

$$P_9 = 2.936kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.0299 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_9 = 0.0299 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.997 \frac{kg}{l}$$

$$M_9 = F_{L9} * \rho_9$$

$$M_9 = 11.55 \text{ L/h} * 0.997 \text{ kg/l} = 11.51 \text{ kg/h}$$

$$T_9 \approx H_9 = 23.74 \text{ Kcal/kg}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_9}{M_4} = \frac{11.51}{17.53} = 0.6565$$

Calor dado

$$Q = M_3 (H_3 - H_4)$$

$$Q = 17.5314 \frac{kg}{h} * \left(649.54 \frac{kcal}{kg} - 128.3 \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$Q = 9138.066 \text{ Kcal/h}$$



Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_8 (H_8 - H_7)$$

$$Q_q = 277.76 \text{kg/h} * (39.88 \text{Kcal/kg} - 17 \text{Kcal/kg})$$

$$Q_q = 6355.14 \text{kca/h}$$

Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q = UA\Delta T$$

Calculo del Área $A_0 = \pi D_0 L$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0 = \pi * .031 \text{m} * 1.49 \text{m} = 0.145 \text{m}^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{9138.066 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145 \text{m}^2 * (128.5^\circ\text{C} - 96.86^\circ\text{C})} = 1991.818 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{C h}}$$



TABLA 03) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AZÚCAR)

Corriente	1	2	3	4
	Liquido	Vapor	Vapor	Liquido
T (°C)	19.64	96.86	128.5	128.3
P (kg/cm ²)	0.023	0.996	2.636	2.621
F (L/h)	23.1	-----	18.3	18.3
ρ (kg/l)	0.998	-----	0.958	0.958
M (kg/h)	23.05	-----	17.5314	17.5314
C %	5	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	19.64	638.38	649.54	128.3

Corriente	5	6	7	8	9
	Liquido	Vapor	Liquido	Liquido	Liquido
T (°C)	92.54	92.54	17	39.88	23.74
P (kg/cm ²)	0.7862	0.7862	0.0197	0.0746	0.0299
F (L/h)	11.55	11.55	280	280	11.55
ρ (kg/l)	0.963	0.963	0.998	0.992	0.997
M (kg/h)	11.1226	11.1226	279.44	277.76	11.51
C %	10	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	92.54	636.75	17	39.88	23.74



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Azúcar -Vacío)

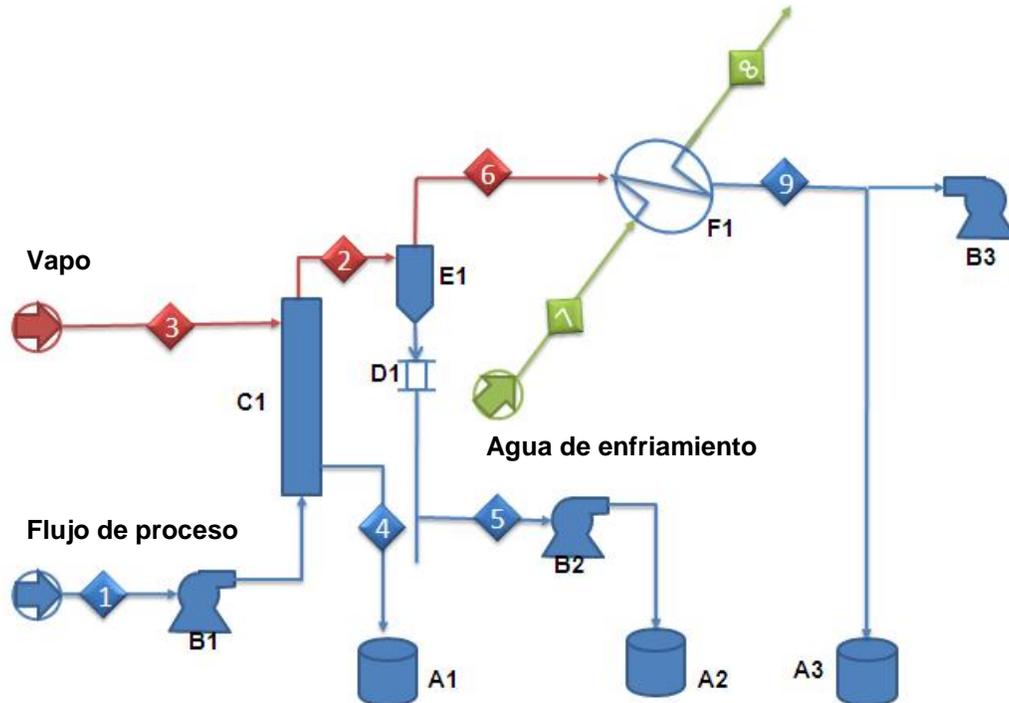


Fig.-4.1 Sistema de Evaporador a Simple Efecto (Azúcar-Vacío)

Flecha roja = Vapor

Flecha azul = Fluido de proceso

Flecha verde = Agua de enfriamiento

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor

A2 = Recipiente recolector de concentrado

A3 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso

B2 = Bomba Dosificadora del concentrado

B2 = Bomba de Vacío

C1 = EVAPORADOR 1

D1 = Recipiente para el muestreo

E1 = Separador

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente

Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

- 1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

- a) Levantar la palanca de los fusibles.
- b) Conectar el enchufe del equipo.
- c) Levantar los switches.
- d) Encender el interruptor general.



Fig.-4.2

- e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



Fig.-4.4



Fig.-4.3



Fig.-4.6



Fig.-4.5



- 2) En el panel de control se procede a encender las bombas dosificadoras 1 y 2 y de vacío 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Simple Efecto Azúcar-Vacío).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de el visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 180 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua-azúcar).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas (dosificadoras) manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-4.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundo el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm^2 teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) La bomba de vacío la encendí 5 min antes de cada corrida y al inicio de la misma cerré el sistema (cerrar la válvulas inferiores de los tanques esféricos).



Fig.-4.8 Bomba de Vacío

- 11) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-4.9 Tanque de alimentación



Fig.-4.10 Tanques de almacenamiento esféricos

- 12) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos



RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a simple efecto (Azúcar - Vacío), efectúe4 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 2 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.

Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a simple efecto (Azúcar - Vacío)

CORRIDA 1 (con vacío azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	15.42	89.08				77.86	16.12	39.98	21.78
$P (kgf/cm^2)$		-0.1359	1.74	1.74					
$F(L/h)$				19.8	21		180	180	13.2
$C (\%)$									
$H ()$									

CORRIDA 2 (con vacío con azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	16.04	87.62				75	16.14	40.26	20.74
$P (kgf/cm^2)$		-0.1359	1.72	1.72					
$F(L/h)$				17.4	18.6		180	180	10.8
$C (\%)$									
$H ()$									

CORRIDA 3 (con vacío azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	30.28	90.98				77.74	16.62	44.7	54.42
$P (kgf/cm^2)$		0	1.924	1.924					
$F(L/h)$				21.3	17.7		180	180	18
$C (\%)$									
$H ()$									

CORRIDA 4 (con vacío con azúcar)									
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Sigma T (^{\circ}C)$	34.56	80.46				75.86	16.84	32.34	29.34
$P (kgf/cm^2)$		-0.3533	0.41	0.41					
$F(L/h)$				13.5	39.6		180	180	10.5
$C (\%)$									
$H ()$									

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.733 esta bien considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 80% y lo más importante es que para ser de simple efecto se esperaba menos.

En la experiencias 4 (corrida 2) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 04.



Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Balance de azúcar

$$F_{L1} = F_{L9} + F_{L5} = 10.8 \frac{l}{h} + 18.6 \frac{l}{h} = 29.4 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L9}}{F_{L4}} = \frac{10.8 \frac{l}{h}}{17.4 \frac{l}{h}} = 0.6206 = 62\%$$

Teniendo la ecuación $F_{L1}(x_1) = F_{L5}(x_5)$ se generan dos ecuaciones en una se tiene constante F_{L5} y en la otra se mantiene x_5 .

$$29.4 \frac{l}{h} (0.035) = 18.6 \frac{l}{h} (x_5) \quad x_5 = 0.055$$

$$29.4 \frac{l}{h} (0.035) = F_{L5} (0.06) \quad F_{L5} = 17.15 \frac{l}{h}$$

Tomo la ecuación que tiene como constante x_5 ya que opino que la refractometría es más exacta que la medición con rotámetro.

Con respecto a lo anterior cambiamos $F_{L5} = 18.6 \text{ L/h}$ a $F_{L5} = 17.15 \text{ L/h}$ para buscar l_9 y checar la economía.

$$F_{L1} = F_{L9} + F_{L5} \quad F_{L9} = F_{L1} - F_{L5} \quad F_{L9} = 29.4 \frac{l}{h} - 17.15 \frac{l}{h} = 12.25 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L9}}{F_{L4}} = \frac{12.25 \frac{l}{h}}{17.4 \frac{l}{h}} = 0.7040 = 63\%$$

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(-0.1359 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.6605 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_{a3} = \left(1.72 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 2.5164 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.72 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 2.5164 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

Calcular corriente 1

$$P_1 = ?$$

$$T_a = 16.0^\circ C$$

$$P_a = 1.817kPa$$

$$T_b = 17.0^\circ C$$

$$P_b = 1.936kPa$$

$$T_1 = 16.04^\circ C$$

$$P_1 = 1.821kPa$$

$$P_1 = 1.8217kPa \left(\frac{1000Pa}{1kPa}\right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa}\right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}}\right) = 0.0185 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_1 = 0.0185 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 29.4 \frac{l}{h} * 0.9989 \frac{kg}{l} = 29.3676 \frac{kg}{h}$$

$$T_1 \approx H_{1Liq} = 16.04 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_a = 87^\circ C$$

$$H_{\text{vapor}} = 2655.3kJ/kg$$

$$T_b = 88^\circ C$$

$$H_{\text{vapor}} = 2656.9kJ/kg$$

$$T_2 = 87.62^\circ C$$

$$H_{2\text{vapor}} = 2656.4kJ/kg$$

$$H_{2\text{vap}} = 2656.4 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ}\right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal}\right) = 634.8955 \frac{kcal}{kg}$$

$H_{2\text{vapor}} = 634.895kcal/kg$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.



Calcular corriente 3

$$P_3 = 2.51.64 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 246.96kPa$$

$$P_a = 239.33kPa$$

$$T_a = 126^\circ C$$

$$H_{vapor} = 2714.4kJ/kg$$

$$P_b = 254.35kPa$$

$$T_b = 128^\circ C$$

$$H_{vapor} = 2717.2kJ/kg$$

$$P_3 = 246.96Pa$$

$$T_3 = 127.01^\circ C$$

$$H_{vapor} = 2715.8kJ/kg$$

$$H_{3\ vapor} = 2715.8 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 649.09 \frac{kcal}{kg}$$

$$M_3 = F_{V3} * \rho_3$$

$$M_3 = 17.4 L/h * 0.958 kg/l = 16.6692kg/h$$

Calcular corriente 4

$$P_4 = 2.5164 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 246.9611kPa$$

$$P_4 = 246.96kPa$$

$$T_4 = 127^\circ C$$

Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{Agu4} = 0.958kg/l$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 17.4 L/h * 0.958 kg/l = 16.6692kg/h$$

$$H_{4liq} = 127 Kcal/kg$$

Calcular corriente 5

La $T_5 = T_6 = 75^\circ C$ ya que las dos corrientes se encuentran en equilibrio.

$$P_5 = ?$$

$$T_5 = 75^\circ C$$

$$P_5 = 38.55kPa$$

$$P_5 = 38.55kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.3928 \frac{kg}{cm^2}$$



$$P_5 = 0.3928 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.9748 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_5 = F_{L5} * \rho_5$$

$$M_5 = 17.15 \text{ L/h} * 0.9748 \text{ kg/l} = 16.7178 \text{ kg/h}$$

$$T_5 \approx H_5 = 75 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 6

La P_{abs6} es igual a la P_{abs5}

$$P_6 = 0.3928 \text{ kg/cm}^2$$

$$T_6 = 75^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2635.4 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{6\text{vapor}} = 2635.4 \text{ kJ/kg} = H_{6\text{vapor}} = 629.876 \text{ kcal/kg}$$

$$L_6 = L_6 = 12.25 \text{ L/h}$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.9748 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_6 = F_{V6} * \rho_6$$

$$M_6 = 12.25 \text{ L/h} * 0.9748 \text{ kg/l} = 11.94 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 7

$$P_7 = ?$$

$$T_7 = 16.14^\circ\text{C}$$

$$P_7 = 1.833 \text{ kPa}$$

$$P_7 = 1.833 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0186 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_7 = 0.0186 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.998 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_7 = F_{L7} * \rho_7$$

$$M_7 = 180 \text{ L/h} * 0.998 \text{ kg/l} = 179.802 \text{ kg/h}$$

$$T_7 \approx H_7 = 16.14 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 8

$$P_8 = ?$$

$$T_8 = 40.26^\circ\text{C}$$

$$P_8 = 7.479 \text{ kPa}$$

$$P_8 = 7.479 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0762 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_8 = 0.0762 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.992 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_8 = F_{L8} * \rho_8$$

$$M_8 = 180 \text{ L/h} * 0.992 \text{ kg/l} = 178.57 \text{ kg/h}$$

$$T_8 \approx H_8 = 40.26 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 9

$$P_9 = ?$$

$$T_9 = 20.74^\circ\text{C}$$

$$P_9 = 2.446 \text{ kPa}$$

$$P_9 = 2.446 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0249 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_9 = 0.0249 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.998 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_9 = F_{L9} * \rho_9$$

$$M_9 = 12.25 \text{ L/h} * 0.998 \text{ kg/l} = 12.22 \text{ kg/h}$$

$$T_9 \approx H_9 = 20.74 \text{ Kcal/kg}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_9}{M_4} = \frac{12.22}{16.66} = 0.7334$$

Calor dado por el evaporador

$$M_3(H_3 - H_4) = Q$$

$$16.6692 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(649.043 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 127 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = Q$$

$$Q = 8702.872 \text{ kcal/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_8 (H_8 - H_7)$$

$$Q_q = 178.578 \text{ kg/h} * (40.26 \text{ Kcal/kg} - 20.74 \text{ Kcal/kg})$$

$$Q_q = 3485.84 \text{ kcal/h}$$



Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q=UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0=\pi D_0L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0=\pi*0.031m*1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{8702.872 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (127^\circ C - 87.6^\circ C)} = 1523.34 \frac{\text{kcal}}{m^2 \cdot ^\circ C \cdot h}$$



TABLA 04) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A SIMPLE EFECTO (AZÚCAR - VACIO)

Corriente	1	2	3	4
	Liquido	Vapor	Vapor	Liquido
T (°C)	16.04	87.62	127.01	127
P (kg/cm ²)	0.0185	0.6605	2.5164	2.5164
F (L/h)	29.4	-----	17.4	17.4
ρ (kg/l)	0.9989	-----	0.958	0.958
M (kg/h)	29.3976	-----	16.6692	16.6692
C %	3.5	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	16.04	634.89	649.046	127

Corriente	5	6	7	8	9
	Liquido	Vapor	Liquido	Liquido	Liquido
T (°C)	75	75	13.14	40.26	20.74
P (kg/cm ²)	0.3928	0.3928	0.0186	0.0762	0.0249
F (L/h)	17.15	12.25	180	180	12.25
ρ (kg/l)	0.9748	0.9798	0.9989	0.9921	0.9980
M (kg/h)	16.7178	11.9413	179.80	178.57	12.22
C %	6	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	75	629.876	16.14	40.29	20.74

CAPITULO 2

EVAPORACIÓN A DOBLE EFECTO





EVAPORACIÓN EN MÚLTIPLES EFECTOS

Los vapores que salen del evaporador llevan consigo una cantidad importante de calor que puede emplearse en otro aparato similar, en el que suele tratarse también la misma disolución. Esta asociación es lo que suele llamarse evaporación a doble, triple o múltiple efecto según el número de aparatos reunidos. La circulación de la solución a concentrar puede hacerse en forma directa, en contracorriente o mixta.

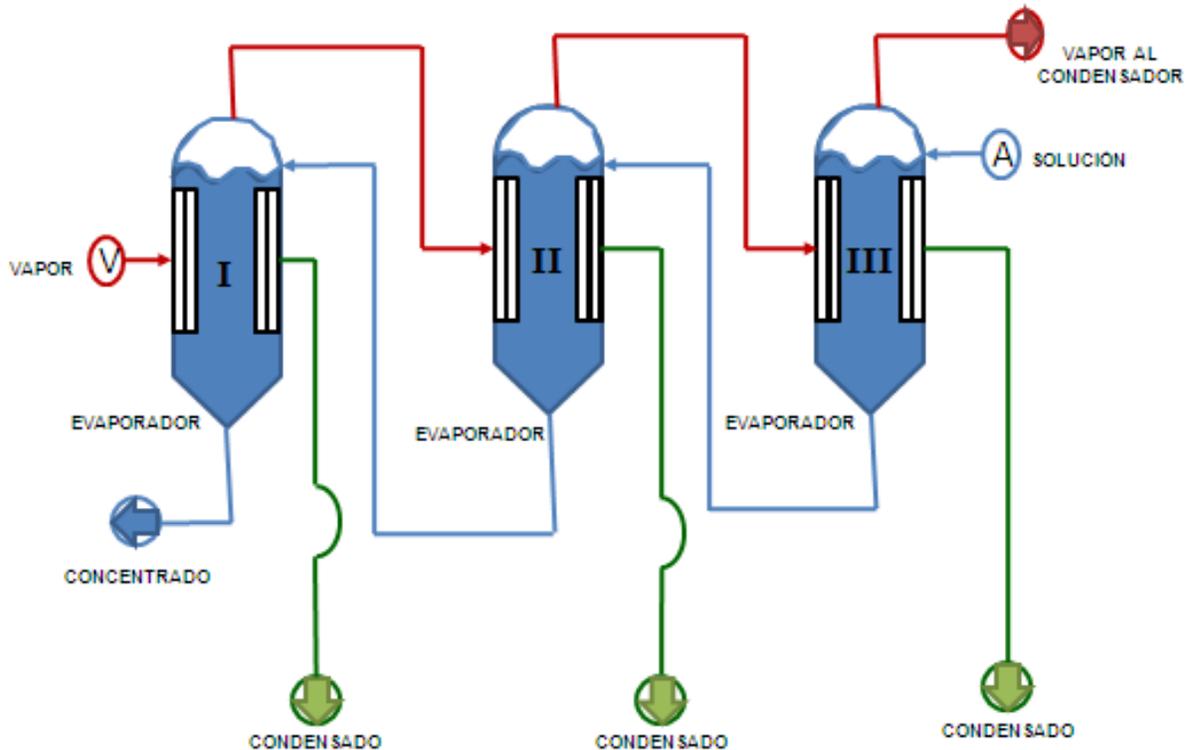


Fig.-43 Evaporadores múltiples trabajando a contracorriente.

Unos de los costos mayores en la operación de evaporación es el de vapor de calentamiento. Para reducir ese costo es práctica común introducir los vapores producidos por la evaporación a la sección de calentamiento de un segundo evaporador. Este vapor se condensa y provee el calor de vaporización requerido para el segundo efecto. Por supuesto, que para transferir calor desde el vapor de calentamiento al líquido en ebullición, la temperatura de ebullición debe ser menor que la de condensación. El término economía de vapor, aplicado a la evaporación es:

$$\text{economía} = \frac{\text{kg de agua evaporada}}{\text{kg de vapor suministrado al sistema}}$$

Para lograr buenas economías, la presión en los diferentes efectos debe ser diferente:

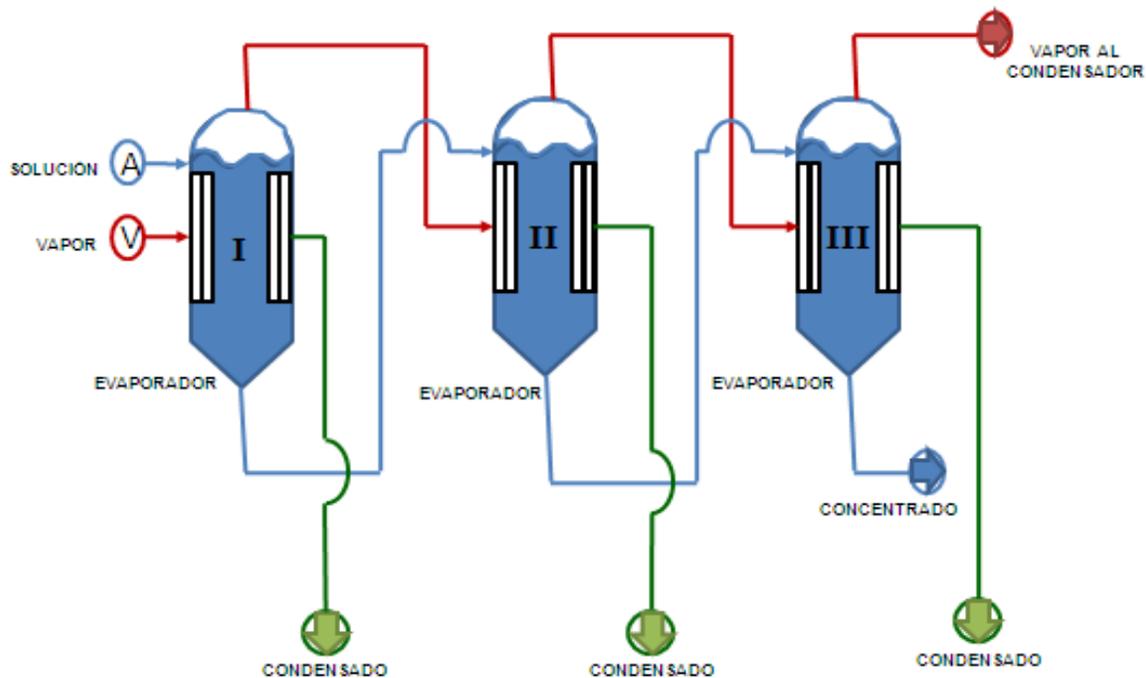


Fig.-44 Evaporadores múltiples trabajando en paralelo.

En un sistema como el mostrado la menor presión esta en el tercer evaporador, teniendo la mayor presión en el primero. El vacío se debe mantener en el tercer evaporador, mediante bombas de vacío, eyectores o eductores.

Los múltiples efectos pueden colocarse en corriente directa, en contracorriente o en alimentación mixta (cruzado).

Para resolver los múltiples efectos se deben resolver simultáneamente los balances de materia y energía y tomar en cuenta las posibles elevaciones en el punto de ebullición de las soluciones. Los evaporadores pueden resolverse para áreas iguales o para coeficientes de transferencia de calor iguales.

La resolución de los múltiples efectos llevaría los siguientes pasos:

- 1.- Balance de materia para todo el sistema para determinar la cantidad a evaporar.
- 2.- Suponiendo áreas iguales y cantidades de calor transferidas similares.

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = \Delta T_{total} - (\Delta e_1 + \Delta e_2 + \Delta e_3) = \Delta T_{\text{útil}}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$



$$\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = \Delta T_{\text{útil}}$$

$$U_1 * A_1 * \Delta T_1 = U_2 * A_2 * \Delta T_2 = U_3 * A_3 * \Delta T_3$$

Si $A_1=A_2=A_3$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}$$

3.- Se plantean las ecuaciones de balance de energía.

Total

$$(L_A * H_A) + (VH_V) = (G_1 * H_{L1}) + (G_2 * H_{L2}) + (G_3 * H_{L3}) + (VH_L) + (L_3 * H_3)$$

En donde V es la cantidad de vapor utilizado. H_V la entalpia del vapor. H_{L1} es la entalpia del vapor condensado proveniente de G_1 .

-Balances de energía Total en cada evaporador

$$V\lambda_V + L_A H_A = G_1 H_{V1} + H_{L1}(L_A - G_1) \dots\dots\dots(1)$$

$$H_{L1}(L_A - G_1) + G_1 \lambda_1 = G_2 H_{V2} + (L_A - G_1 - G_2) H_L \dots\dots\dots(2)$$

$$(L_A - G_1 - G_2) H_{L2} + G_2 \lambda_2 = G_3 H_{V3} + L_4 H_{L4} \dots\dots\dots(3)$$

$$G_1 + G_2 + G_3 = G_{\text{Total}} \dots\dots\dots(4)$$

4.- Se resuelven las ecuaciones. Obteniéndose las evaporaciones en cada efecto G así como los calores Q.

5.- A partir de lo anterior se obtiene A.

$$A_1 = \frac{Q_1}{U_1 * \Delta T_1}; A_2 = \frac{Q_2}{U_2 * \Delta T_2}$$

Si las suposiciones son correctas las superficies deben ser iguales.

6.- Si las áreas son diferentes se procede a hacer una nueva distribución de ΔT y se rehacen los cálculos.

$$A_{\text{media}} = \frac{\sum \Delta T(\lambda)}{\Delta T} = \frac{(\Delta T_1 * \Delta T_1) + (\Delta T_2 * \Delta T_2) + (\Delta T_3 * \Delta T_3)}{\Delta T_{\text{útil}}}$$

$$\Delta T_{\text{nuevo}} = \frac{A}{A_{\text{media}}}$$



DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EMPLEADO

"EQUIPO PARA ESTUDIO DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO"

MODELO: PS-EV-202-UNAM A4

SERIE: EH-1005-035



Fig. 45.-EQUIPO DE EVAPORACIÓN

Este es el equipo principal donde se realizó la experimentación, el cual interconecta varios equipos y aparatos de medición, por medio de una tubería que facilita los diversos arreglos de evaporación que se ilustran en cada experimento.

El flujo del fluido de proceso se controla y direcciona por medio de Válvulas bola como se observa en la (Fig. 46). Con el fin de tener el arreglo que se desee.

Los servicios como agua de enfriamiento y vapor son manipulados por medio de Válvulas de control a la entrada del equipo como se observa en la (Fig. 47).



Fig. 46.- Válvula de bola



Fig. 47.- Válvula de control



A diferencia de las Válvulas bolas que cierran o abren el flujo de un jalón las Válvulas de control, como su nombre lo dice permiten la manipulación de un fluido con mayor precisión.

Dentro del equipo en la línea de vapor hay Válvulas bolas y dado que el vapor es peligroso en grado máximo. Se instalaron varios aparatos de seguridad en la entrada del equipo los cuales garantizan la seguridad del equipo, el laboratorio y sobretodo del operador.

En primera instancia se encuentra un divisor de corriente el cual libera el vapor en exceso por una vía alterna (ver fig. 48).

En segunda instancia se encuentra la Válvula de control autoaccionada la cual regula el paso del vapor automáticamente teniendo en cuenta los valores que marca el manómetro correspondiente (ver fig. 49).

Después sigue la Válvula de seguridad para vapor la cual se utiliza en circunstancias donde puede surgir un aumento de presión en un proceso como falla en el funcionamiento de Válvulas, funcionamiento incorrecto en un sistema de automatización, entrada anormal de calor en el proceso, corte de energía o incendio.

Las Válvulas de Seguridad son necesarias en cualquier situación de riesgo de aumento de presión que pueda ocurrir y en este caso se tiene la Válvula de seguridad para vapor (ver fig. 50) con una presión máxima de operación 21.1 kg/cm².

El vapor no nada más debe ser seguro sino que también tiene que estar limpio de condensado para que la tubería no se oxide y no pierda calor el sistema por culpa del condensado. Y esto se logra con la trampa termodinámica (ver fig. 51).

Otra trampa es la tipo flotador y termostato, que se instalaron a la salida del evaporador en el flujo de vapor.



Fig. 48.- Divisor de corriente



Fig. 49.- Válvula de control autoaccionada



Fig. 50.- Válvula de seguridad para vapor



Fig. 51.- Trampa termodinámica



Las trampas tipo flotador son especialmente diseñadas para mantener el espacio de vapor libre de condensado, estas trampas se ajustan automáticamente a cualquier variación de condensado (ver fig. 52)



Fig. 52. - Trampa tipo flotador

Otro instrumento que aporta lo suyo en la limpieza del vapor es la trampa de vapor la cual tiene la función de quitar el óxido al vapor ya que el óxido puede dañar internamente los equipos que conforman el evaporador, la trampa se puede ver en la (fig. 53).



Fig. 53. - Trampa de vapor

Aparatos que integran el equipo de evaporación.

Se tienen dos evaporadores iguales, son concéntricos y miden poco más de 1.5m, además están aislados con fibra de vidrio y una capa de aluminio.

El flujo de proceso va a contracorriente del flujo de vapor y los evaporadores se ven en la fig. 54.



Fig. 54. - Evaporadores

Los evaporadores están conectados a un recipiente cilíndrico y que termina con forma cónica en el cual se lleva a cabo la separación de fases (vapor y líquido), también está aislado con fibra de vidrio y cubierto con una capa de aluminio (ver fig. 55).

Debajo de cada separador se encuentra un recipiente para observar el concentrado de la disolución y poder sacar muestras.

Es muy útil para observar lo que está pasando dentro del proceso y además facilita el manejo de las bombas dosificadoras para someter el sistema a un régimen permanente (ver fig. 56)

El equipo tiene tres bombas dosificadoras, la primera se encarga de mandar el flujo por el primer evaporador y las dos siguientes se ubican a la salida de los dos separadores después del recipiente para muestrear y se encargan de mandar el flujo a su recipiente correspondiente.



Fig. 55. - Separador



Las bombas dosificadoras tienen un flujo máximo de 20 L/h, la ventaja con la bomba centrífuga es que la dosificadora no importa si se queda sin líquido ya que no se quema y no cavita. La desventaja es que el flujo que maneja es muy poco y se puede observar la bomba en la fig. 57.

El sistema se alimenta con un tanque de 20L y se usan también para almacenar concentrado y condensado de la disolución, pero para la recolección del condensado de vapor se usa cubetas (ver fig. 58).

Para una corrida son útiles los tanques esféricos de vidrio que están instalados en el equipo con capacidad de 10L (ver fig. 59).

El equipo cuenta con un condensador que permite recuperar el flujo de vapor que se separó de la disolución y mide aproximadamente 1.9m y puede manejar caudales grandes lo que permite un buen condensado (ver fig. 60).

Para generar vacío el equipo dispone de una bomba de vacío de 1/2 hp lo que provoca un vacío con fuerza suficiente (ver fig. 61). Pero para los arreglos a doble efecto no se pudo someter al sistema el vacío ya que el fluido de proceso se estanca en el separador que produce un sifón que regresaba el fluido al evaporador lo cual dificultó la evaporación y también el muestreo.

El equipo cuenta con un panel de control el cual después de prender los switches que alimentan la corriente eléctrica, se conecta el equipo, se prende el panel de control el cual controla el encendido y apagado de las bombas dosificadoras y de la bomba de vacío, pero algo más importante es que tiene pantallas que muestran la temperatura del sistema (fig. 62)



Fig. 56.- Recipiente de muestreo



Fig. 57.- Bomba dosificadora



Fig. 58.- tanques de almacenamiento



Fig. 59.- Tanques para concentrado y condensado



Fig. 60.- Condensador



Fig. 61.- Bomba de vacío



Fig. 62.- Panel de Control.

Para finalizar hablaré de los instrumentos de medición que posee el equipo. Los primeros son los termopares que se encuentran dentro del equipo y está conformado de dos varillas de diferente material y calibradas lo que da como resultado una medición muy exacta y el valor obtenido lo podemos obtener en el panel de controles y para saber dónde se encuentran los termopares ver la fig. 63. Los siguientes instrumentos miden la presión y se llaman manómetros, los cuales se pueden leer en diferentes unidades (kg/cm^2 ó lb/in^2) suelen estar a la entrada y salida de los evaporadores y el condensador, su lectura debe ser perpendicular a la posición del manómetro (ver fig. 64). Por último los rotámetros que tienden a ser los más inexactos entre más chicos sean y sus flujos más grandes, pero si el rotámetro es grande y el flujo regular se puede tener buenos resultado como el rotámetro del agua de enfriamiento a la entrada del condensador (ver fig. 65).



Fig. 63.- Termopar



Fig. 64.- Manómetro



Fig. 65.- Rotámetro



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Doble Efecto a Contracorriente (Agua)

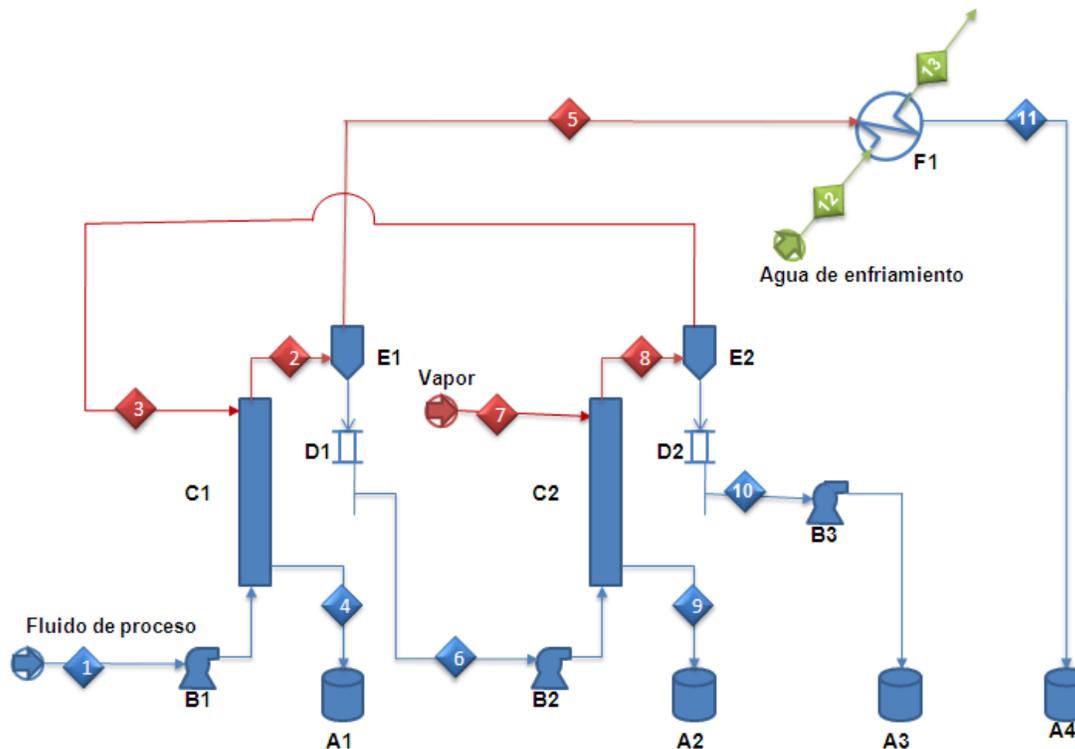


Fig.-5.1 Sistema de Evaporador a Doble Efecto a Contracorriente (Agua)

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor I
A2 = Recipiente recolector de condensado del vapor II
A3 = Recipiente recolector de concentrado
A4 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado
B3 = Bomba Dosificadora del concentrado

C1 = EVAPORADOR 1
C2 = EVAPORADOR 2

E1 = Separador 1
E2 = Separador 2

D1 = Recipiente para el muestreo 1
D2 = Recipiente para el muestreo 2

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



a) Fig.-5.2



b) Fig.-5.4



c) Fig.-5.3



e) Fig.-5.6



d) Fig.-5.5



- 2) En el panel de control se procede a encender las bombas dosificadoras 1, 2 y 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Doble Efecto a Contracorriente Agua).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de el visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 240L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-5.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2



kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.

- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-5.8 Tanque de alimentación



Fig.-5.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a simple efecto, efectúe 3 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 3 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a doble efecto a contracorriente (agua)

CORRIDA 1							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	16.84	92.92			92.26	80.56	
P (kgf/cm ²)		0.052	0.36	0.33			1.18
F(L/h)				6.45			
C (%)							
H (l)							

CORRIDA 1						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	102.4	93.36		20.66	15.6	20.26
P (kgf/cm ²)	0.37	1.15				
F(L/h)		10.5	8.1	2.25	260	260
C (%)						
H (l)						

CORRIDA 2							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	15.9	93.34			92.34	81.52	
P (kgf/cm ²)		0.07	0.55	0.53			1.89
F(L/h)				8.7			
C (%)							
H (l)							

CORRIDA 2						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	107.64	97.3		27.34	15.7	23.16
P (kgf/cm ²)	0.66	1.88				
F(L/h)		13.2	10.8	3.6	240	240
C (%)						
H (l)						

CORRIDA 3							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	16.12	93.2			92.32	80.74	
P (kgf/cm ²)		0.07	0.512	0.49			1.774
F(L/h)				8.1			
C (%)							
H (l)							



CORRIDA 3						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	106.84	96.24		24.18	15.78	23.36
P (kgf/cm ²)	0.57	1.764				
F(L/h)		12.3	9.6	3.3	240	240
C (%)						
H (l)						

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.963 bastante bueno considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 75%.

En la experiencias 5 (corrida 3) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 05.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Presión absoluta

$$P_a = P_{man} + P_{atm}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.07 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) = 0.8664 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a3} = \left(0.512 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) = 1.3084 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a4} = \left(0.49 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) = 1.2864 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a7} = \left(1.774 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) = 2.5704 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a8} = \left(0.57 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) = 1.3664 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

$$P_{a9} = \left(1.89 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2} \right) = 2.5604 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$



Calcular corriente 1

$$T_1 = 16.12^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 1.831\text{kPa}$$

$$P_1 = 1.831\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0186 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_1 = 0.0186 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99897 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{L1} = F_{V5} + F_{L6} = 3.3 \text{ L/h} + 17.7 \text{ L/h} = 21 \text{ L/h}$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 21 \frac{\text{l}}{\text{h}} * 0.99897 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 20.978 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$T_1 \approx H_{1\text{Liq}} = 16.12 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_2 = 93.2^\circ\text{C}$$

$$H_{2\text{vapor}} = 2665.32\text{kJ/kg}$$

$$H_{2\text{vap}} = 2665.32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 637.027 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2\text{vapor}} = 637.027\text{kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 1.3084 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{kPa}}{1000\text{Pa}} \right) = 128.407\text{kPa}$$

$$P_3 = 128.40\text{Pa}$$

$$T_3 = 106.75^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2686.4\text{kJ/kg}$$

$$H_{3\text{vap}} = 2686.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 644.45 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$F_{V3} = F_{L4} = 8.1 \text{ L/h}$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_3 = F_{V3} * \rho_3$$

$$M_3 = 8.1 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 7.7598\text{kg/h}$$



Calcular corriente 4

$$P_4 = 1.2864 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 126.24kPa$$

$$P_4 = 126.24kPa$$

$$T_4 = 106.2^\circ C$$

Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{Agua4} = 0.9583 kg/l$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 8.1/h * 0.9583 kg/l = 7.7596 kg/h$$

$$H_{4liq} = 106.2 Kcal/kg$$

Calcular corriente 5.

$$T_5 = 92.32^\circ C$$

$$P_5 = 76.53kPa$$

$$H_{vapor} = 2663.9 kJ/kg$$

$$P_5 = 76.53kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.7797 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_5 = 0.7797 kg/cm^2$$

$$H_{5 vap} = 2663.9 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 636.688 \frac{kcal}{kg}$$

$$F_{V5} = F_{L11} = 3.3 L/h$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.96376 \frac{kg}{l}$$

$$M_5 = F_{V5} * \rho_5$$

$$M_5 = 3.3L/h * 0.96376 kg/l = 3.1804 kg/h$$

Calcular corriente 6

$$T_6 = 80.74^\circ C$$

$$P_6 = 48.803kPa$$

$$P_6 = 48.803kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.4972 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_6 = 0.4972 kg/cm^2$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.97183 \frac{kg}{l}$$



$$F_{L6} = F_{V3} + F_{L10} = 8.1 \text{ L/h} + 9.6 \text{ L/h} = 17.7 \text{ L/h}$$

$$M_6 = F_{L6} \cdot \rho_6$$

$$M_6 = 17.7 \text{ L/h} \cdot 0.97183 \text{ kg/l} = 17.201 \text{ kg/h}$$

$$H_{6liq} = 106.2 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 7

$$P_7 = 2.5704 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 252.26 \text{ kPa}$$

$$P_7 = 252.26 \text{ kPa}$$

$$T_7 = 127.72^\circ \text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2716.8 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{7 \text{ vapor}} = 2716.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 649.33 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$F_{V7} = F_{L9} = 12.3 \text{ L/h}$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_7 = F_{V7} \cdot \rho_7$$

$$M_7 = 12.3 \text{ L/h} \cdot 0.958 \text{ kg/l} = 11.783 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 8

$$T_8 = 106.84^\circ \text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2686.5 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{8 \text{ vapor}} = 2686.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 642.08 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Calcular corriente 9

$$P_9 = 2.5604 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 251.27 \text{ kPa}$$

$$P_9 = 251.27 \text{ kPa}$$

$$T_9 = 127^\circ \text{C}$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.96192 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$



$$M_9 = F_{L9} * \rho_9$$

$$M_9 = 12.3 \text{ L/h} * 0.96192 \text{ kg/l} = 11.831 \text{ kg/h}$$

$$T_9 \approx H_9 = 127 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 10

$$T_3 = T_{10} = 106.75^\circ\text{C}$$

$$P_3 = P_{10} = 1.3084 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.958 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{10} = F_{L10} * \rho_{10}$$

$$M_{10} = 9.6 \text{ L/h} * 0.958 \text{ kg/l} = 9.1968 \text{ kg/h}$$

$$T_{10} \approx H_{10} = 106.75 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 11

$$T_{11} = 24.18^\circ\text{C}$$

$$P_{11} = 3.015 \text{ kPa}$$

$$P_{11} = 3.015 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0307 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{11} = 0.0307 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99733 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$T_{11} \approx H_{11} = 24.18 \text{ Kcal/kg}$$

$$M_{11} = F_{L11} * \rho_{11}$$

$$M_{11} = 3.3 \text{ L/h} * 0.99733 \text{ kg/l} = 3.291 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 12

$$T_{12} = 15.78^\circ\text{C}$$

$$P_{12} = 1.792 \text{ kPa}$$

$$P_{12} = 1.792 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0182 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{12} = 0.0182 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.9989 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{12} = F_{L12} * \rho_{12}$$

$$M_{12} = 240 \text{ L/h} * 0.9989 \text{ kg/l} = 239.736 \text{ kg/h}$$

$$T_{12} \approx H_{12} = 15.78 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 13

$$T_{13}=23.36^{\circ}\text{C}$$

$$P_{13}=2.87064\text{kPa}$$

$$P_{13} = 2.8706\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0292 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{13} = 0.0292 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99741 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{13}=F_{L13} * \rho_{13}$$

$$M_{13} = 240 \text{ L/h} * 0.99741\text{kg/l} = 239.378\text{kg/h}$$

$$T_{13} \approx H_{13} = 23.36 \text{ Kcal/kg}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_4 + M_{11}}{M_9} = \frac{8.1 + 3.1}{11.831} = 0.963$$

Calor dado por el evaporador 1

$$Q=M_3(H_3-H_4)$$

$$Q = 8.1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(644 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 106.2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 4356.18\text{Kcal/h}$$

Calor dado por el evaporador 2

$$Q =M_7(H_7-H_9)$$

$$Q = 11.783 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(649.3 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 127 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 6154.26\text{Kcal/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_{13} (H_{13} - H_{12})$$

$$Q_q = 239.37\text{kg/h}*(23.36\text{Kcal/kg}-15.78\text{Kcal/kg})$$

$$Q_q = 1814.42\text{Kcal/h}$$



Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q=UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0=\pi D_0L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0=\pi*.031m*1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador 1

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{4356.18 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (106.2^\circ C - 93.2^\circ C)} = 2310.97 \frac{\text{kcal}}{m^2 \circ C h}$$

Q = Calor dado por el evaporador 2

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{6154.26 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (127^\circ C - 106.84^\circ C)} = 2105.31 \frac{\text{kcal}}{m^2 \circ C h}$$



TABLA 05) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO A CONTRACORRIENTE (AGUA)

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
	Líquido	Mezcla	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
T (°C)	16.12	93.2	106.75	106.2	92.32	80.74	127
P (kg/cm ²)	0.0186	0.8664	1.3084	1.2864	0.7797	0.4972	2.5704
F (L/h)	21	-----	8.1	8.1	3.3	17.7	12.3
ρ (kg/l)	0.99897	-----	0.958	0.958	0.96376	0.97183	0.958
M (kg/h)	20.978	-----	7.7598	7.7598	3.1804	17.201	11.783
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	16.12	637.027	644.45	106.2	636.688	80.74	649.33

Corriente	8	9	10	11	12	13
	Mezcla	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
T (°C)	103.84	127	106.75	24.18	15.78	23.36
P (kg/cm ²)	1.3664	2.5604	1.3084	0.0307	0.0182	0.0292
F (L/h)	-----	12.3	9.6	3.3	240	240
ρ (kg/l)	-----	0.96192	0.958	0.99733	0.9989	0.99741
M (kg/h)	-----	11.831	9.1968	3.291	239.736	239.378
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	642.08	127	106.75	24.18	15.78	23.36



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Doble Efecto a Contracorriente (Azúcar)

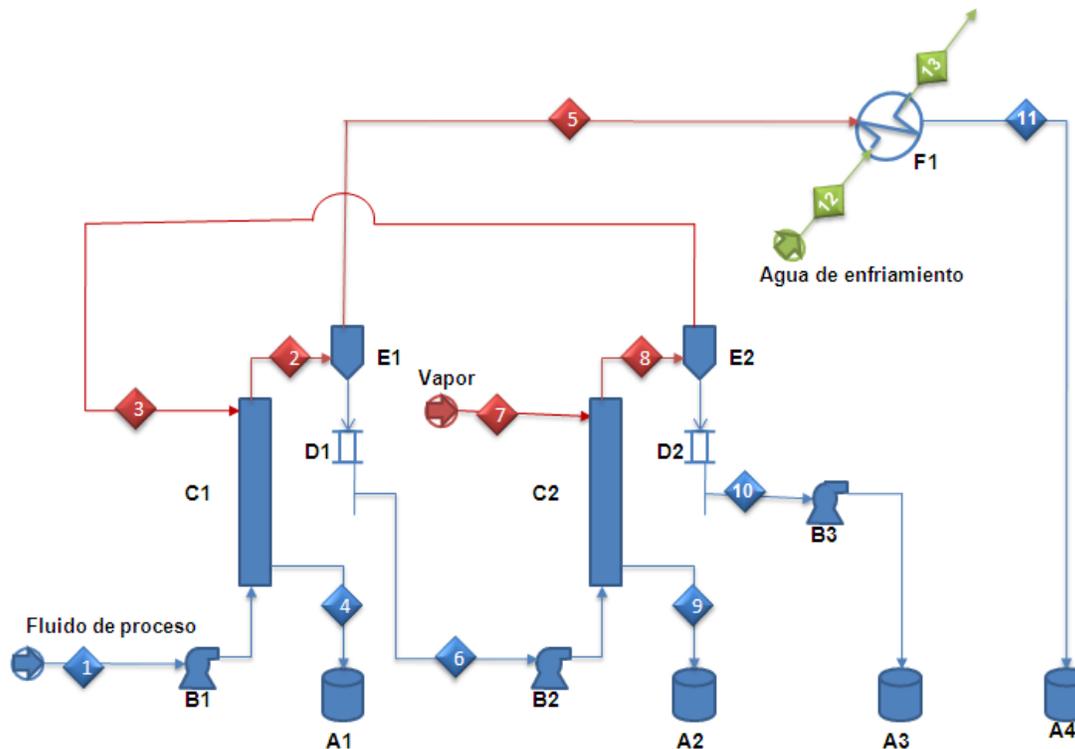


Fig.-6.1 Sistema de Evaporador a Doble Efecto a Contracorriente (Azúcar)

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor I
A2 = Recipiente recolector de condensado del vapor II
A3 = Recipiente recolector de concentrado
A4 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado
B3 = Bomba Dosificadora del concentrado

C1 = EVAPORADOR 1
C2 = EVAPORADOR 2

E1 = Separador 1
E2 = Separador 2

D1 = Recipiente para el muestreo 1
D2 = Recipiente para el muestreo 2

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



a) Fig.-6.2



c) Fig.-6.4



b) Fig.-6.3



d) Fig.-6.6



e) Fig.-6.5



- 2) En el panel de control se procede a encenderlas bombas dosificadoras 1, 2 y 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Doble Efecto a contracorriente Azúcar).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de él visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 240 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua-azúcar).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-6.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm^2 teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-6.8 Tanque de alimentación



Fig.-6.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a doble efecto, efectúe 2 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 2 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a doble efecto a contracorriente (azúcar)

CORRIDA 1 (Azucar)							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	17.34	93.3			92.3	80.84	
$P (kgf/cm^2)$		0.058	0.49	0.46			1.63
$F(L/h)$				7.5			
$C (\%)$	4					4.5	
$H ()$							

CORRIDA 1 (Azucar)						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	106.08	95.26		22.46	16.1	23.78
$P (kgf/cm^2)$	0.53	1.62				
$F(L/h)$		11.55	8.4	3.36	240	240
$C (\%)$			10			
$H ()$						

CORRIDA 2 (Azucar)							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	17.4	93.24			92.3	80.6	
$P (kgf/cm^2)$		0.058	0.47	0.434			1.62
$F(L/h)$				7.2			
$C (\%)$	4					5	
$H ()$							

CORRIDA 2 (Azucar)						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	105.7	94.9		22.32	16.2	23.2
$P (kgf/cm^2)$	0.534	1.62				
$F(L/h)$		11.4	7.2	3	240	240
$C (\%)$			10			
$H ()$						

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.905 algo bastante bueno considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 75%.

En la experiencias 6 (corrida 2) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 06.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.



Balance de azúcar

$$F_{L1} = F_{V5} + F_{L6} = 3 \frac{l}{h} + 14.4 \frac{l}{h} = 17.4 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L11} + F_{L4}}{F_{L9}} = \frac{3 \frac{l}{h} + 7.2 \frac{l}{h}}{11.4 \frac{l}{h}} = 0.894 = 89.4\%$$

Teniendo las ecuaciones $F_{L1}(x_1) = F_{L6}(x_6)$ y $F_{L1}(x_1) = F_{L10}(x_{10})$ se las desarrolle de la siguiente manera.

$$x_6 = \frac{F_{L1} * x_1}{F_{L6}} = \frac{17.4 * 0.04}{14.4} = 0.048 \approx 0.05$$

$$x_{10} = \frac{F_{L1} * x_1}{F_{L10}} = \frac{17.4 * 0.04}{7.2} = 0.096 \approx 0.10$$

Tomo los datos obtenidos por refractometría ($x_1=0.04$, $x_6=0.05$ y $x_{10}=0.10$) ya que es más exacta que la medición con rotámetro.

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.058 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.8544 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(0.47 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.2664 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(0.434 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.2304 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a7} = \left(1.62 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.4164 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a8} = \left(0.534 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.3304 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a9} = \left(1.62 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.4164 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$



Calcular corriente 1

$$T_1 = 17.4^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 1.9864\text{kPa}$$

$$P_1 = 1.9864\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0202 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9988 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{L1} = F_{V5} + F_{L6} = 3 \frac{\text{l}}{\text{h}} + 14.4 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 17.4 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 17.4 \frac{\text{l}}{\text{h}} * 0.9988 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 17.3791 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$T_1 \approx H_{1\text{Liq}} = 17.4 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_2 = 93.2^\circ\text{C}$$

$$H_{2\text{vapor}} = 2665.32\text{kJ/kg}$$

$$H_{2\text{vap}} = 2665.32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 637.027 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2\text{vapor}} = 637.027\text{kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 1.2664 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{kPa}}{1000\text{Pa}} \right) = 124.28\text{kPa}$$

$$P_3 = 124.285\text{Pa}$$

$$T_3 = 105.8^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2685.01\text{kJ/kg}$$

$$H_{3\text{vap}} = 2685.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 641.733 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$F_{V3} = F_{L4} = 7.2 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_3 = F_{L3} * \rho_3$$

$$M_3 = 7.2 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 6.8997\text{kg/h}$$



Calcular corriente 4

$$P_4 = 1.2304 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 120.75kPa$$

$$P_4 = 120.75kPa$$

$$T_4 = 104.97^\circ C$$

Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{Agua4} = 0.958kg/l$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 7.2L/h * 0.958 kg/l = 6.8997kg/h$$

$$H_{4liq} = 104.97 Kcal/kg$$

Calcular corriente 5.

$$T_5 = 92.3^\circ C$$

$$P_5 = 76.47kPa$$

$$H_{vapor} = 2663.8kJ/kg$$

$$P_5 = 76.47kPa \left(\frac{1000Pa}{1kPa} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.7792 \frac{kg}{cm^2}$$

$$H_{5 vap} = 2663.8 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 636.683 \frac{kcal}{kg}$$

$$\rho_{Agua tabla} = 0.96534 \frac{kg}{l}$$

$$F_{V5} = F_{L11} = 3 \frac{l}{h}$$

$$M_5 = F_{V5} * \rho_5$$

$$M_5 = 3L/h * 0.96534kg/l = 2.896kg/h$$

Calcular corriente 6

$$T_6 = 80.6^\circ C$$

$$P_6 = 49.21kPa$$

$$P_6 = 49.212kPa \left(\frac{1000Pa}{1kPa} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.5014 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{L6} = F_{V3} + F_{L10} = 14.4 \frac{l}{h}$$

$$\rho_{Agua tabla} = 0.97183 \frac{kg}{l}$$

$$M_6 = F_{L6} * \rho_6$$

$$M_6 = 14.4 L/h * 0.97183 kg/l = 13.9993kg/h$$

$$H_{6liq} = 80.6 Kcal/kg$$



Calcular corriente 7

$$P_7 = 2.4164 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 237.147kPa$$

$P_7 = 237.147KPa$ $T_7 = 125.69^\circ C$ $H_{vapor} = 2713.97kJ/kg$

$$H_{7\ vap} = 2713.97 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 648.655 \frac{kcal}{kg}$$

$\rho_{Agua\ tabla} = 0.958 \frac{kg}{l}$ $F_{V7} = F_{L9} = 11.4 \frac{l}{h}$

$M_7 = F_{V7} * \rho_7$ $M_7 = 11.4L/h * 0.958\ kg/l = 10.924kg/h$

Calcular corriente 8

$T_8 = 105.7^\circ C$ $H_{vapor} = 2684.8kJ/kg$

$$H_{8\ vap} = 2684.8 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 641.68 \frac{kcal}{kg}$$

Calcular corriente 9

$$P_9 = 2.4164 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 237.147kPa$$

$P_9 = 237.14kPa$ $T_9 = 125.7^\circ C$ $\rho_{Agua\ tabla} = 0.958 \frac{kg}{l}$

$M_9 = F_{L9} * \rho_9$ $M_9 = 11.4L/h * 0.958kg/l = 10.924kg/h$

$T_9 \approx H_{9Liq} = 125.7\ Kcal/kg$

Calcular corriente 10

$T_3 = T_{10} = 105.8^\circ C$

$P_3 = P_{10} = 1.2664\ kg/cm^2$



$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.958 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{10} = F_{L10} \cdot \rho_{10}$$

$$M_{10} = 7.2 \text{ L/h} \cdot 0.958 \text{ kg/l} = 6.897 \text{ kg/h}$$

$$T_{10} \approx H_{10\text{Liq}} = 105.8 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 11

$$T_{11} = 22.32^\circ\text{C}$$

$$P_{11} = 2.695 \text{ kPa}$$

$$P_{11} = 2.695 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0274 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{11} = 0.0274 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9978 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{11} = F_{L11} \cdot \rho_{11}$$

$$M_{11} = 3 \text{ L/h} \cdot 0.9978 \text{ kg/l} = 2.9934 \text{ kg/h}$$

$$T_{11} \approx H_{11\text{Liq}} = 22.3 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 12

$$T_{12} = 16.2^\circ\text{C}$$

$$P_{12} = 1.840 \text{ kPa}$$

$$P_{12} = 1.840 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0187 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{12} = 0.01827 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.99897 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{12} = F_{L12} \cdot \rho_{12}$$

$$M_{12} = 240 \text{ L/h} \cdot 0.99897 \text{ kg/l} = 239.75 \text{ kg/h}$$

$$T_{12} \approx H_{12\text{Liq}} = 16.2 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 13

$$T_{13} = 23.2^\circ\text{C}$$

$$P_{13} = 2.842 \text{ kPa}$$

$$P_{13} = 2.842 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0289 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_{13} = 0.0289 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99757 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{13} = F_{L13} \cdot \rho_{13}$$

$$M_{13} = 240 \text{ L/h} \cdot 0.99757 \text{ kg/l} = 239.41 \text{ kg/h}$$

$$T_{13} \approx H_{13\text{Liq}} = 23.2 \text{ Kcal/kg}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_4 + M_{11}}{M_9} = \frac{6.899 + 2.993}{10.924} = 0.905$$

Calor dado por el evaporador 1

$$Q = M_3(H_3 - H_4)$$

$$Q = 6.899 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \left(641.733 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 104.97 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 3704.12 \text{ kcal/h}$$

Calor dado por el evaporador 2

$$Q = M_7(H_7 - H_9)$$

$$Q = 10.924 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \left(648.655 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 125.6 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 5713.85 \text{ kcal/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_{13} (H_{13} - H_{12})$$

$$Q_q = 239.41 \text{ kg/h} \cdot (23.2 \text{ Kcal/kg} - 16.2 \text{ Kcal/kg})$$

$$Q_q = 1675.87 \text{ kcal/h}$$



Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q=UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0=\pi D_0L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0=\pi*.031m*1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador 1

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{3704.12 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (105.8^\circ C - 93.24^\circ C)} = 2033.88 \frac{\text{kcal}}{m^2 \circ C h}$$

Q = Calor dado por el evaporador 2

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{5713.85 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (125.6^\circ C - 105.7^\circ C)} = 1980.19 \frac{\text{kcal}}{m^2 \circ C h}$$



TABLA 06) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO A CONTRACORRIENTE (AZÚCAR)

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
	Líquido	Mezcla	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
T (°C)	17.4	93.24	105.8	104.97	92.3	80.6	125.6
P (kg/cm ²)	0.0202	0.854	1.2664	1.2304	0.7792	0.5014	2.4164
F (L/h)	14.4	-----	7.2	7.2	3	14.4	11.4
ρ (kg/l)	0.9988	-----	0.9583	0.9583	0.9653	0.9718	0.95683
M (kg/h)	17.379	-----	6.899	6.899	2.896	13.994	10.924
C %	4	-----	-----	-----	-----	5	-----
H (Kcal/kg)	17.4	637.027	641.733	104.97	636.683	80.6	648.655

Corriente	8	9	10	11	12	13
	Mezcla	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
T (°C)	105.7	125.6	105.8	22.32	16.2	23.2
P (kg/cm ²)	1.3304	2.4164	1.2664	0.0274	0.0187	0.0289
F (L/h)	-----	11.4	7.2	3	240	240
ρ (kg/l)	-----	0.95683	0.9583	0.9978	0.9989	0.9975
M (kg/h)	-----	10.924	6.9	2.9934	239.75	239.41
C %	-----	-----	10	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	641.68	125.6	105.8	22.32	16.2	23.2



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Doble Efecto Cruzado (Agua)

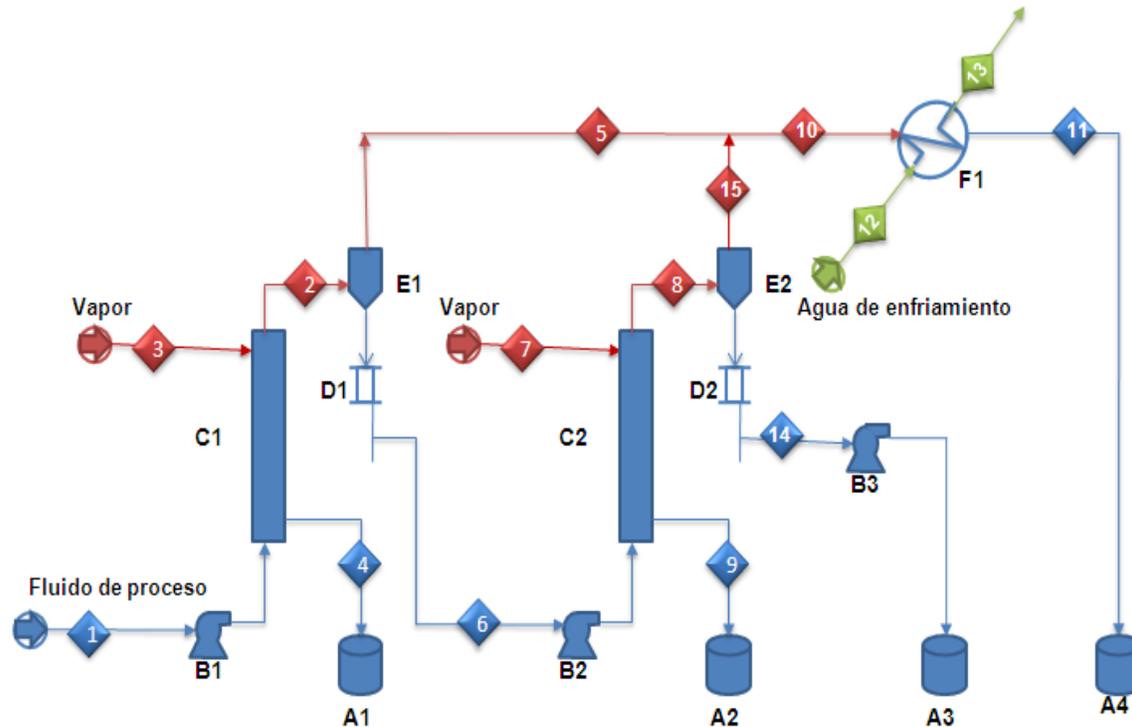


Fig.-7.1 Sistema de Evaporador a Doble Efecto Cruzado (Agua)

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor I
A2 = Recipiente recolector de condensado del vapor II
A3 = Recipiente recolector de concentrado
A4 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado
B3 = Bomba Dosificadora del condensado

C1 = EVAPORADOR 1
C2 = EVAPORADOR 2

E1 = Separador 1
E2 = Separador 2

D1 = Recipiente para el muestreo 1
D2 = Recipiente para el muestreo 2

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



Fig.-7.2



b)

Fig.-7.4



c)

Fig.-7.3



d)

Fig.-7.6



e)

Fig.-7.5



- 2) En el panel de control se procede a encenderlas bombas dosificadoras 1, 2 y 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Doble Efecto Cruzado Agua).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de el visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 240 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-7.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-7.8 Tanque de alimentación



Fig.-7.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a doble efecto, efectúe 4 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 4 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a doble efecto Cruzado (Agua)

CORRIDA 1								
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Sigma T (^{\circ}C)$	14.3	97.06				73.84		96.26
P (kgf/cm ²)		0.2	1.39	1.39			0.534	0.15
F(L/h)				14.4				
C (%)								
H ()								

CORRIDA 1							
Corrientes	9	10	11	12	13	14	15
$\Sigma T (^{\circ}C)$	91.42	92.48	17.62	15.9	40.8		
P (kgf/cm ²)	0.5						
F(L/h)	5.4		12.6	260	260	10.2	
C (%)							
H ()							

CORRIDA 2								
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Sigma T (^{\circ}C)$	14.64	96.6				78.22		95.8
P (kgf/cm ²)		0.2	1.38	1.38			0.514	0.15
F(L/h)				15.3				
C (%)								
H ()								

CORRIDA 2							
Corrientes	9	10	11	12	13	14	15
$\Sigma T (^{\circ}C)$	91.24	92.44	18.86	16.02	39.3		
P (kgf/cm ²)	0.5						
F(L/h)	5.4		12	280	280	8.4	
C (%)							
H ()							

CORRIDA 3								
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Sigma T (^{\circ}C)$	15.2	96.6				79.74		95.8
P (kgf/cm ²)		0.2	1.41	1.41			0.54	0.15
F(L/h)				15				
C (%)								
H ()								

CORRIDA 3							
Corrientes	9	10	11	12	13	14	15
$\Sigma T (^{\circ}C)$	91.46	92.44	20.12	16.12	40.42		
P (kgf/cm ²)	0.508						
F(L/h)	5.7		12.6	280	280	10.2	
C (%)							
H ()							



CORRIDA 4								
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
ΣT (°C)	15.86	96.66				80.7		95.76
P (kgf/cm ²)		0.2	1.43	1.43			0.55	0.15
F(L/h)				15				
C (%)								
H ()								

CORRIDA 4							
Corrientes	9	10	11	12	13	14	15
ΣT (°C)	91.32	92.4	20.9	16.02	43.02		
P (kgf/cm ²)	0.54						
F(L/h)	5.4		12	240	240	9.9	
C (%)							
H ()							

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.6126 algo bastante bueno considerando las condiciones a las que opero el equipo.

En la experiencias 7 (corrida 4) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 07.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.2 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.9964 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.43 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.2264 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.43 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.2264 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a7} = \left(0.55 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.3464 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a8} = \left(0.15 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.9464 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_{a9} = \left(0.54 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 1.3364 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

Calcular corriente 1

$$T_1 = 15.86^\circ C$$

$$P_1 = 1.801 kPa$$

$$P_1 = 1.801 kPa \left(\frac{1000 Pa}{1 kPa}\right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1 Pa}\right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}}\right) = 0.0183 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{L1} = F_{L11} + F_{L14} = 12 \frac{l}{h} + 9.9 \frac{l}{h} = 21.9 \frac{l}{h} \quad \rho_{Agua\ tabla} = 0.9583 \frac{kg}{l}$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 21.9 \frac{l}{h} * 0.9989 \frac{kg}{l} = 21.875 \frac{kg}{h}$$

$$T_1 \approx H_{1Liq} = 15.86 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_2 = 96.66^\circ C$$

$$H_{2vapor} = 2670.756 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{2vap} = 2670.75 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}}\right) = 638.326 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2vapor} = 638.326 \text{ kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 2.2264 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}}\right) * \left(\frac{1 Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}\right) * \left(\frac{1 kPa}{1000 Pa}\right) = 218.50 kPa$$

$$P_3 = 218.50 Pa$$

$$T_3 = 123.03^\circ C$$

$$H_{vapor} = 2710.2 \text{ kJ/kg}$$



$$H_{3 \text{ vap}} = 2710.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 647.75 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$F_{V3} = F_{L4} = 15 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_3 = F_{L3} * \rho_3$$

$$M_3 = 15 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 6.8997 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 4

$$P_4 = 2.2264 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 218.50 \text{kPa}$$

$$P_4 = 218.50 \text{kPa}$$

$$T_4 = 123.03^\circ\text{C}$$

Como la corriente es líquida se sustituye la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{\text{Agua4}} = 0.958 \text{ kg/l}$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 15 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 14.374 \text{ kg/h}$$

$$H_{4 \text{ liq}} = 123.03 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 5.

$$T_5 = 96.66^\circ\text{C}$$

$$P_5 = 89.83 \text{kPa}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2670.75 \text{ kJ/kg}$$

$$P_5 = 89.83 \text{kPa} * \left(\frac{1000 \text{Pa}}{1 \text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.9153 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$H_{5 \text{ vap}} = 2670.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 638.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$



Calcular corriente 6

$$T_6 = 80.7^\circ\text{C}$$

$$P_6 = 48.72\text{kPa}$$

$$P_6 = 48.72\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.4964 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$H_{6\text{liq}} = 80.7 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 7

$$P_7 = 1.3464 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{kPa}}{1000\text{Pa}} \right) = 132.1365\text{kPa}$$

$$P_7 = 232.13\text{KPa}$$

$$T_7 = 107.6^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2687.7\text{kJ/kg}$$

$$H_{7\text{ vap}} = 2687.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 642.376 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{V7} = F_{L9} = 5.4 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_7 = F_{V7} * \rho_7$$

$$M_7 = 5.4\text{L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 5.174\text{kg/h}$$

Calcular corriente 8

$$T_8 = 95.76^\circ\text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2669.31\text{kJ/kg}$$

$$H_{8\text{ vap}} = 2669.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 637.98 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Calcular corriente 9

$$P_9 = 1.3364 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1\text{kPa}}{1000\text{Pa}} \right) = 131.1551\text{kPa}$$

$$P_9 = 131.15\text{kPa}$$

$$T_9 = 107.3^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_9 = F_{L9} * \rho_9$$

$$M_9 = 5.4 \text{ L/h} * 0.9583\text{kg/l} = 5.174\text{kg/h}$$

$$T_9 \approx H_{9\text{Liq}} = 107.3 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 10

$$T_{10}=92.4^{\circ}\text{C}$$

$$P_{10}= 76.762\text{KPa}$$

$$H_{\text{vapor}}= 2664.04\text{kJ/kg}$$

$$P_{10} = 76.762\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.7821 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$H_{10 \text{ vap}} = 2664.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 636.721 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9636 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{L10} = F_{L11} = 12 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_{10}=F_{L10} * \rho_{10}$$

$$M_{10} = 12 \text{ L/h} * 0.9636\text{kg/l} = 11.563\text{kg/h}$$

Calcular corriente 11

$$T_{11}=20.9^{\circ}\text{C}$$

$$P_{11}=2.470\text{kPa}$$

$$P_{11} = 2.470\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0251 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{11} = 0.0251 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9980 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{11}=F_{L11} * \rho_{11}$$

$$M_{11} = 12 \text{ L/h} * 0.9980 \text{ kg/l} = 11.976\text{kg/h}$$

$$T_{11} \approx H_{11\text{Liq}} = 20.9 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 12

$$T_{12}=16.02^{\circ}\text{C}$$

$$P_{12}=1.817\text{kPa}$$

$$P_{12} = 1.817\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0185 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{12} = 0.0185\text{kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9989 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{12}=F_{L12} * \rho_{12}$$

$$M_{12} = 240 \text{ L/h} * 0.9989\text{kg/l} = 239.73\text{kg/h}$$

$$T_{12} \approx H_{12\text{Liq}} = 16.02 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 13

$$T_{13}=43.02^{\circ}\text{C}$$

$$P_{13}=8.639\text{kPa}$$

$$P_{13} = 8.639\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0880 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{13} = 0.0880 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.99107 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{13}=F_{L13} * \rho_{13}$$

$$M_{13} = 240 \text{ L/h} * 0.99107\text{kg/l} = 237.85\text{kg/h}$$

$$T_{13} \approx H_{13\text{Liq}} = 43.02 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 14

$T_8 \approx T_{14} = \left\{ \text{Ya que el termopar de la línea 8 está a la entrada del separador y el separador se encuentra en equilibrio con agua y vapor.} \right.$

$$T_{14}=95.76^{\circ}\text{C}$$

$$P_{14}=86.9316\text{kPa}$$

$$P_{14} = 86.9316\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.8857 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{14} = 0.8857 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.96192 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{14}=F_{L14} * \rho_{14}$$

$$M_{14} = 9.9 \text{ L/h} * 0.96192\text{kg/l} = 9.523\text{kg/h}$$

$$T_{14} \approx H_{14\text{Liq}} = 95.76 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 15

$T_8 \approx T_{15} = \left\{ \text{Ya que el termopar de la línea 8 está a la entrada del separador y el separador se encuentra en equilibrio con agua y vapor.} \right.$

$$T_{15}=95.76^{\circ}\text{C}$$

$$P_{15}=0.8857\text{kPa}$$

$$H_{\text{vapor}}= 2669.31\text{kJ/kg}$$

$$H_{15\text{vap}} = 2669.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 637.982 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$



ECONOMIA

$$E = \frac{M_{11}}{M_4 + M_9} = \frac{11.976}{14.374 + 5.174} = 0.6126$$

Calor dado por el evaporador 1

$$Q = M_3 (H_3 - H_4)$$

$$Q = 14.374 \frac{kg}{h} * \left(647.75 - \frac{kcal}{kg} - 123.03 \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$Q = 7542.32 \text{kca/h}$$

Calor dado por el evaporador 2

$$Q = M_7 (H_7 - H_9)$$

$$Q = 5.174 \frac{kg}{h} * \left(642.37 - \frac{kcal}{kg} - 107.3 \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$Q = 2768.45 \text{kca/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_{13} (H_{13} - H_{12})$$

$$Q_q = 237.85 \text{kg/h} * (43.02 \text{Kcal/kg} - 16.02 \text{Kcal/kg})$$

$$Q_q = 6421.95 \text{kca/h}$$

Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q = UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0 = \pi D_0 L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura



$$A_0 = \pi * 0.031m * 1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador 1

$\Delta T = T_V - T_{ebull}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{7542.32 \frac{kcal}{h}}{0.145m^2 * (123.03^\circ C - 96.66^\circ C)} = 1972.5445 \frac{kcal}{m^2 \circ C h}$$

Q = Calor dado por el evaporador 2

$\Delta T = T_V - T_{ebull}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{2768.45 \frac{kcal}{h}}{0.145m^2 * (107.6^\circ C - 95.76^\circ C)} = 1612.5640 \frac{kcal}{m^2 \circ C h}$$



TABLA 07) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO CRUZADO (AGUA)

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
T (°C)	15.86	96.66	123.03	123.03	96.66	80.7	107.6	95.76
P (kg/cm ²)	0.0183	0.9964	2.2264	2.2264	0.9153	0.4964	1.3464	0.9464
F (L/h)	21.9	-----	15	15	-----	-----	5.4	-----
ρ (kg/l)	0.9989	-----	0.9583	0.9583	-----	-----	0.9583	-----
M (kg/h)	21.875	-----	14.374	14.374	-----	-----	5.174	-----
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	15.86	638.32	647.75	123.03	638.32	80.7	642.37	637.9

Corriente	9	10	11	12	13	14	15
T (°C)	107.3	92.4	20.9	16.02	43.02	95.76	95.76
P (kg/cm ²)	1.3364	0.7821	0.0251	0.0185	0.0880	0.8857	0.8857
F (L/h)	5.4	12	12	240	240	9.9	-----
ρ (kg/l)	0.9583	0.9636	0.9980	0.9989	0.9910	0.9619	-----
M (kg/h)	5.174	11.563	11.976	239.73	237.856	9.523	-----
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	107.3	636.72	20.9	16.02	43.02	95.76	637.98



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Doble Efecto Cruzado (Azúcar)

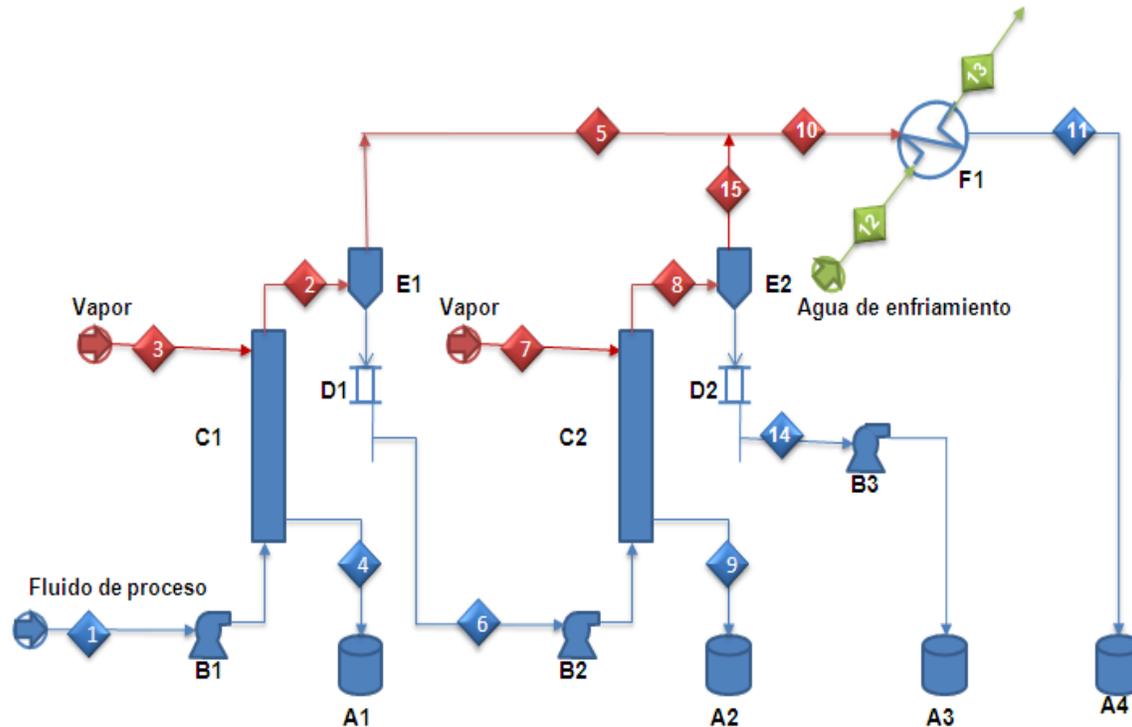


Fig.-8.1 Sistema de Evaporador a Doble Efecto Cruzado (Azúcar)

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor I
A2 = Recipiente recolector de condensado del vapor II
A3 = Recipiente recolector de concentrado
A4 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado
B3 = Bomba Dosificadora del condensado

C1 = EVAPORADOR 1
C2 = EVAPORADOR 2

E1 = Separador 1
E2 = Separador 2

D1 = Recipiente para el muestreo 1
D2 = Recipiente para el muestreo 2

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



a) Fig.-8.2



b) Fig.-8.4



c) Fig.-8.3



d) Fig.-8.6



e) Fig.-8.5



- 2) En el panel de control se procede a encenderlas bombas dosificadoras 1, 2 y 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Doble Efecto Cruzado Azúcar).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de él visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 240 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua-azúcar).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-8.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-8.8 Tanque de alimentación



Fig.-8.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a doble efecto, efectúe 2 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 2 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a doble efecto Cruzado (azúcar)

CORRIDA 1 (Azúcar)								
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Sigma T (^{\circ}C)$	17.34	96.74				81.6		96
P (kgf/cm ²)		0.2	1.46	1.46			0.15	0.55
F(L/h)				14.4				
C (%)	4.5					8		
H ()								

CORRIDA 1 (Azúcar)							
Corrientes	9	10	11	12	13	14	15
$\Sigma T (^{\circ}C)$	91	92.4	22.14	16.2	43.8		
P (kgf/cm ²)	0.55						
F(L/h)	5.4		12	240	240	9	
C (%)						11	
H ()							

CORRIDA 2 (Azúcar)								
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Sigma T (^{\circ}C)$	17.54	96.84				81.08		96.12
P (kgf/cm ²)		0.2	1.49	1.49			0.15	0.55
F(L/h)				15.6				
C (%)	4.5					8		
H ()								

CORRIDA 2 (Azúcar)							
Corrientes	9	10	11	12	13	14	15
$\Sigma T (^{\circ}C)$	91.18	92.4	22.2	16.16	42.8		
P (kgf/cm ²)	0.55						
F(L/h)	6		13.2	240	240	8.7	
C (%)						11	
H ()							

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.6362 algo bastante bueno considerando las condiciones a las que opero el equipo.

En la experiencias 8 (corrida 2) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 08.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.



Balance de azúcar

$$F_{L1} = F_{L11} + F_{L14} = 13.2 \frac{l}{h} + 8.7 \frac{l}{h} = 21.9 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L11}}{F_{L4} + F_{L9}} = \frac{13.2 \frac{l}{h}}{15.6 \frac{l}{h} + 6 \frac{l}{h}} = 0.6111$$

Teniendo las ecuaciones $F_{L1}(x_1) = F_{L14}(x_{14})$ y $F_{L1}(x_1) = F_{L6}(x_6)$ las desarrolle de la siguiente manera.

$$x_{14} = \frac{F_{L1} * x_1}{F_{L14}} = \frac{21.9 * 0.045}{8.7} = 0.113 \approx 0.11$$

$$F_{L6} = \frac{F_{L1} * x_1}{x_6} = \frac{21.9 * 0.045}{0.08} = 12.3187$$

Tomo los datos obtenidos por refractometría ($x_1=0.045$, $x_6=0.08$ y $x_{14}=0.11$) ya que es más exacta que la medición con rotámetro.

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.2 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 0.9964 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.49 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 2.2864 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.49 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 2.2864 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a7} = \left(0.55 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 1.3464 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a8} = \left(0.15 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 0.9464 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_{a9} = \left(0.55 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 1.3464 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

Calcular corriente 1

$$T_1 = 17.54^\circ C$$

$$P_1 = 2.004 kPa$$

$$P_1 = 2.004 kPa \left(\frac{1000 Pa}{1 kPa}\right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1 Pa}\right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}}\right) = 0.02041 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{L1} = F_{L11} + F_{L14} = 13.2 \frac{l}{h} + 8.7 \frac{l}{h} = 21.9 \frac{l}{h} \quad \rho_{Agua\ tabla} = 0.9988 \frac{kg}{l}$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 21.9 \frac{l}{h} * 0.9988 \frac{kg}{l} = 21.873 \frac{kg}{h}$$

$$T_1 \approx H_{1Liq} = 17.54 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_2 = 96.84^\circ C$$

$$H_{2vapor} = 2671.3 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{2\ vapor} = 2671.3 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}}\right) = 638.39 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2vapor} = 638.39 \text{ kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 2.2864 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}}\right) * \left(\frac{1 Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}\right) * \left(\frac{1 kPa}{1000 Pa}\right) = 224.38 kPa$$

$$P_3 = 224.38 Pa$$

$$T_3 = 123.9^\circ C$$

$$H_{\ vapor} = 2711.46 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{3\ vapor} = 2711.46 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}}\right) = 648.05 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$



$$F_{V3} = F_{L4} = 15.6 \frac{l}{h}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{kg}{l}$$

$$M_3 = F_{L3} * \rho_3$$

$$M_3 = 15.6 \text{L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 14.950 \text{kg/h}$$

Calcular corriente 4

$$P_4 = 2.2864 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 224.38kPa$$

$$P_4 = 224.38kPa$$

$$T_4 = 123.9^\circ\text{C}$$

Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{\text{Agua4}} = 0.958 \text{kg/l}$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 15.6 \text{L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 14.950 \text{kg/h}$$

$$H_{4\text{liq}} = 123.9 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 5.

$$T_5 = 96.84^\circ\text{C}$$

$$P_5 = 90.42kPa$$

$$H_{\text{vapor}} = 2670.75 \text{kJ/kg}$$

$$P_5 = 90.42kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.9213 \frac{kg}{cm^2}$$

$$H_{5 \text{ vap}} = 2671.3 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 638.39 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Calcular corriente 6

$$T_6 = 81.08^\circ\text{C}$$

$$P_6 = 49.31kPa$$

$$P_6 = 49.31kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.5024 \frac{kg}{cm^2}$$



$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.97183 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{V6} = 12.31 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_7 = F_{V7} * \rho_7$$

$$M_7 = 12.31 \text{L/h} * 0.97183 \text{ kg/l} = 11.9632 \text{kg/h}$$

$$H_{6\text{liq}} = 81.08 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 7

$$P_7 = 1.3464 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 132.1365 \text{kPa}$$

$$P_7 = 232.13 \text{KPa}$$

$$T_7 = 107.6^\circ \text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2684.68 \text{kJ/kg}$$

$$H_{7 \text{ vapor}} = 2684.68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 641.65 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.95883 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{V7} = F_{L9} = 6 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_7 = F_{V7} * \rho_7$$

$$M_7 = 6 \text{L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 5.750 \text{kg/h}$$

Calcular corriente 8

$$T_8 = 96.12^\circ \text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2669.89 \text{kJ/kg}$$

$$H_{8 \text{ vapor}} = 2669.89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{cal}}{1 \text{kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{kcal}}{1000 \text{cal}} \right) = 638.11 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Calcular corriente 9

$$P_9 = 1.3464 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{kPa}}{1000 \text{Pa}} \right) = 132.136 \text{kPa}$$

$$P_9 = 132.13 \text{kPa}$$

$$T_9 = 107.6^\circ \text{C}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_9 = F_{L9} * \rho_9$$

$$M_9 = 6 \text{ L/h} * 0.9583 \text{kg/l} = 5.750 \text{kg/h}$$

$$T_9 \approx H_{9\text{Liq}} = 107.6 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 10

$$T_{10}=92.4^{\circ}\text{C}$$

$$P_{10}= 76.762\text{KPa}$$

$$H_{\text{vapor}}= 2664.04\text{kJ/kg}$$

$$P_{10} = 76.762\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.7821 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$H_{10 \text{ vap}} = 2664.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 636.721 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9636 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{L10} = F_{L11} = 13.2 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_{10}=F_{L10} * \rho_{10}$$

$$M_{10} = 13.2 \text{ L/h} * 0.9636\text{kg/l} = 12.720\text{kg/h}$$

Calcular corriente 11

$$T_{11}=22.2^{\circ}\text{C}$$

$$P_{11}=2.675\text{kPa}$$

$$P_{11} = 2.675\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.02725 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{11} = 0.02725 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatbla}} = 0.9978 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{11}=F_{L11} * \rho_{11}$$

$$M_{11} = 13.2/\text{h} * 0.9978 \text{ kg/l} = 13.170\text{kg/h}$$

$$T_{11} \approx H_{11\text{Liq}} = 22.2 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 12

$$T_{12}=16.16^{\circ}\text{C}$$

$$P_{12}=1.836\text{kPa}$$

$$P_{12} = 1.836\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0187 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{12} = 0.0187\text{kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatbla}} = 0.9989 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{12}=F_{L12} * \rho_{12}$$

$$M_{12} = 240 \text{ L/h} * 0.9989\text{kg/l} = 239.752\text{kg/h}$$

$$T_{12} \approx H_{12\text{Liq}} = 16.16 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 13

$$T_{13}=42.8^{\circ}\text{C}$$

$$P_{13}=8.550\text{kPa}$$

$$P_{13} = 8.550\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.08712 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{13} = 0.08712 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99147 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{13}=F_{L13} * \rho_{13}$$

$$M_{13} = 240 \text{ L/h} * 0.99147\text{kg/l} = 237.95\text{kg/h}$$

$$T_{13} \approx H_{13\text{Liq}} = 42.8 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 14

$T_8 \approx T_{14} = \left\{ \text{Ya que el termopar de la línea 8 está a la entrada del separador y el separador se encuentra en equilibrio con agua y vapor.} \right.$

$$T_{14}=96.12^{\circ}\text{C}$$

$$P_{14}=88.08\text{kPa}$$

$$P_{14} = 88.08\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.8974 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{14} = 0.8974 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.96192 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{14}=F_{L14} * \rho_{14}$$

$$M_{14} = 8.7 \text{ L/h} * 0.96192\text{kg/l} = 9.368\text{kg/h}$$

$$T_{14} \approx H_{14\text{Liq}} = 96.12 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 15

$T_8 \approx T_{15} = \left\{ \text{Ya que el termopar de la línea 8 está a la entrada del separador y el separador se encuentra en equilibrio con agua y vapor.} \right.$

$$T_{15}=96.12^{\circ}\text{C}$$

$$P_{15}=0.8974\text{kPa}$$

$$H_{\text{vapor}}= 2669.89\text{kJ/kg}$$

$$H_{15 \text{ vap}} = 2669.89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006\text{cal}}{1\text{kJ}} \right) * \left(\frac{1\text{kcal}}{1000\text{cal}} \right) = 638.11 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$



ECONOMIA

$$E = \frac{M_{11}}{M_4 + M_9} = \frac{13.17}{14.95 + 5.75} = 0.6362$$

Calor dado por el evaporador 1

$$Q = M_3 (H_3 - H_4)$$

$$Q = 14.95 \frac{kg}{h} * \left(648.05 - \frac{kcal}{kg} - 123.9 \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$Q = 7836.04 \text{ kca/h}$$

Calor dado por el evaporador 2

$$Q = M_7 (H_7 - H_9)$$

$$Q = 5.750 \frac{kg}{h} * \left(641.65 - \frac{kcal}{kg} - 107.6 \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$Q = 3070.78 \text{ kca/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_{13} (H_{13} - H_{12})$$

$$Q_q = 237.95 \text{ kg/h} * (42.8 \text{ Kcal/kg} - 16.16 \text{ Kcal/kg})$$

$$Q_q = 6339.04 \text{ kca/h}$$

Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q = UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0 = \pi D_0 L$$



A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0 = \pi \cdot 0.031 \text{m} \cdot 1.49 \text{m} = 0.145 \text{m}^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 \cdot \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador 1

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}} =$ diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{7836.04 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145 \text{m}^2 \cdot (123.9^\circ\text{C} - 96.84^\circ\text{C})} = 1997.104 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}}$$

Q = Calor dado por el evaporador 2

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}} =$ diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{3070.78 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145 \text{m}^2 \cdot (107.6^\circ\text{C} - 96.12^\circ\text{C})} = 1844.755 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}}$$



TABLA 08) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO CRUZADO (AZÚCAR)

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
T (°C)	17.54	96.84	123.9	123.9	96.84	81.08	107.6	96.12
P (kg/cm ²)	0.02041	0.9964	2.2864	2.2864	0.9213	0.5024	1.3464	0.9464
F (L/h)	21.9	-----	15.6	15.6	-----	12.31	6	-----
ρ (kg/l)	0.9988	-----	0.95838	0.95838	-----	0.97183	0.95838	-----
M (kg/h)	21.873	-----	14.95	14.95	-----	11.963	5.750	-----
C %	4.5	-----	-----	-----	-----	8	-----	-----
H (Kcal/kg)	17.54	638.39	648.05	123.9	638.39	81.08	641.65	638.11

Corriente	9	10	11	12	13	14	15
T (°C)	107.6	92.4	22.2	16.16	42.8	96.12	96.12
P (kg/cm ²)	1.3464	0.7821	0.02725	0.0187	0.08712	0.8974	0.8974
F (L/h)	6	13.2	13.2	240	240	8.7	-----
ρ (kg/l)	0.95838	0.96369	0.9978	0.9989	0.9914	0.96192	-----
M (kg/h)	5.750	-----	13.170	239.752	237.95	8.368	-----
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	107.6	636.72	22.2	16.16	42.8	96.12	638.11



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Doble Efecto en Paralelo (Agua)

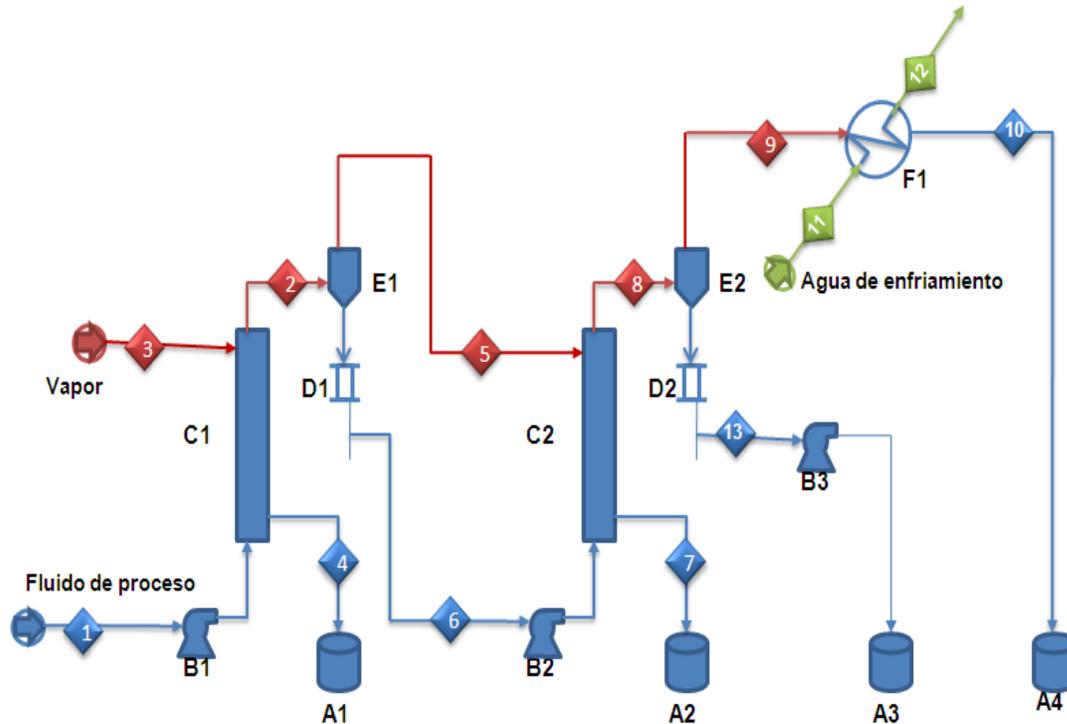


Fig.-9.1 Sistema de Evaporador a Doble Efecto en Paralelo (Agua)

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor I
A2 = Recipiente recolector de condensado del vapor II
A3 = Recipiente recolector de concentrado
A4 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado
B3 = Bomba Dosificadora del concentrado

C1 = EVAPORADOR 1
C2 = EVAPORADOR 2

E1 = Separador 1
E2 = Separador 2

D1 = Recipiente para el muestreo 1
D2 = Recipiente para el muestreo 2

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



a) Fig.-9.2



b) Fig.-9.4



c) Fig.-9.3



d) Fig.-9.6



e) Fig.-9.5



- 2) En el panel de control se procede a encender las bombas dosificadoras 1, 2 y 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Doble Efecto en Paralelo Agua).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de él visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 240 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-9.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundó el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-9.8 Tanque de alimentación



Fig.-9.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a doble efecto, efectúe 3 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 3 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a doble efecto en paralelo (agua)

CORRIDA 1							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	17.28	107.4				89.92	91.2
P (kgf/cm ²)		0.58	1.88	1.86	0.59		0.54
F(L/h)				13.2			6.9
C (%)							
H ()							

CORRIDA 1						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	93.46	92.3	28.5	15.48	27.98	
P (kgf/cm ²)	0.1					
F(L/h)			5.55	240	240	8.1
C (%)						
H ()						

CORRIDA 2							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	16.78	107.72				91.1	91.42
P (kgf/cm ²)		0.6	1.97	1.96	0.6		0.58
F(L/h)				13.35			7.35
C (%)							
H ()							

CORRIDA 2						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	93.58	92.3	24.12	15.52	29.12	
P (kgf/cm ²)	0.1					
F(L/h)			6.15	240	240	6.3
C (%)						
H ()						

CORRIDA 3							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	18.44	107.84				91.2	91.48
P (kgf/cm ²)		0.6	1.94	1.94	0.59		0.58
F(L/h)				13.35			7.35
C (%)							
H ()							

CORRIDA 3						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	93.56	92.28	22.32	15.56	29.2	
P (kgf/cm ²)	0.1					
F(L/h)			6	240	240	6.3
C (%)						
H ()						



En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.99 algo bastante bueno considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 80%.

En la experiencias 9 (corrida 3) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 09.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía, posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.6 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 1.3964 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.94 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 2.7364 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.94 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 2.7364 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a5} = \left(0.56 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 1.3564 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a7} = \left(0.56 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 1.3564 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a8} = \left(0.1 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) + \left(\frac{586 \text{ mmhg}}{760 \text{ mmhg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 0.8964 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

Calcular corriente 1

$$T_1 = 18.44^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 2.12 \text{ kPa}$$

$$P_1 = 2.12 \text{ kPa} \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}}\right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}}\right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}\right) = 0.02116 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$F_{L1} = F_{L13} + F_{L10} + F_{L7} = 6.3 \frac{l}{h} + 6 \frac{l}{h} + 7.35 \frac{l}{h} = 19.65 \frac{l}{h}$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$\rho_{Aguatabla} = 0.99862 \frac{kg}{l}$$

$$M_1 = 19.65 \frac{l}{h} * 0.99862 \frac{kg}{l} = 19.6228 \frac{kg}{h}$$

$$T_1 \approx H_{1Liq} = 18.44 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_2 = 107.8^\circ\text{C}$$

$$H_{2vapor} = 2688.3 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{2 \text{ vap}} = 2688 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 642.448 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2vapor} = 642.44 \text{ kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 2.7364 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right) = 268.55 \text{ kPa}$$

$$P_3 = 268.55 \text{ Pa}$$

$$\underline{T_3 = 129.8^\circ\text{C}}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2719.6 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{3 \text{ vap}} = 2719.6 * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 650 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agu}} = 0.9583 \text{ kg/l}$$

$$F_{V3} = F_{L4} = 13.35 \frac{l}{h}$$

$$M_3 = F_{L3} * \rho_3$$

$$M_3 = 13.35 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 12.794 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 4

$$P_4 = 2.7364 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right) = 268.55 \text{ kPa}$$

$$P_4 = 268.55 \text{ kPa}$$

$$\underline{T_4 = 129.8^\circ\text{C}}$$



Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{\text{Agua4}} = 0.958 \text{ kg/l}$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 13.35 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 12.794 \text{ kg/h}$$

$$H_{4\text{liq}} = 129.8 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 5.

$$P_5 = 1.3564 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(\frac{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1.0033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ Pa}}{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right) = 133.118 \text{ kPa}$$

$$P_5 = 199.11 \text{ kPa}$$

$$T_5 = 107.8^\circ \text{C}$$

$$H_{\text{vapor}} = 2688 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{5\text{vap}} = 2688 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 642.44 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9583 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$F_{V5} = F_{L7} = 7.35 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$M_5 = F_{V5} * \rho_5$$

$$M_5 = 7.35 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 7.04 \text{ kg/h}$$

Calcular corriente 6

$$T_6 = 91^\circ \text{C}$$

$$P_6 = 72.81 \text{ kPa}$$

$$P_6 = 72.81 \text{ kPa} * \left(\frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1 \text{ Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.7418 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{L6} = F_{L13} + F_{L10} = 6.3 \frac{\text{l}}{\text{h}} + 6 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 12.3 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9653 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_6 = F_{L6} * \rho_6$$

$$M_6 = 12.3 \text{ L/h} * 0.9653 \text{ kg/l} = 11.8736 \text{ kg/h}$$

$$H_{6\text{liq}} = 91 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 7

$$P_7 = 1.3564 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 133.11kPa$$

$P_7 = 133.11KPa$

$T_7 = 107.8^\circ C$

$\rho_{Agua\ tabla} = 0.9583 \frac{kg}{l}$

$F_{V7} = F_{V5} = 7.35 \frac{l}{h}$

$M_7 = F_{V7} * \rho_7$

$M_7 = 7.35L/h * 0.9583\ kg/l = 7.04kg/h$

$H_{7liq} = 107.8\ Kcal/kg$

Calcular corriente 8

$$P_8 = 0.8964 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 87.9732kPa$$

$P_8 = 87.97KPa$

$T_8 = 96^\circ C$

$H_{vapor} = 2669.7kJ/kg$

$$H_{8\ vapor} = 2669.7 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 638.07 \frac{kcal}{kg}$$

Calcular corriente 9

$T_9 = 92^\circ C$

$P_9 = 75.61KPa$

$H_{vapor} = 2663.4kJ/kg$

$$P_9 = 75.61kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.770 \frac{kg}{cm^2}$$

$$H_{9\ vapor} = 2663.4 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 636.56 \frac{kcal}{kg}$$

$F_{V9} = F_{L10} = 6 \frac{l}{h}$

$\rho_{Agua\ tabla} = 0.9653 \frac{kg}{l}$

$M_9 = F_{L9} * \rho_9$

$M_9 = 6\ L/h * 0.9653kg/l = 5.7920kg/h$



Calcular corriente 10

$$T_{10}=22.32^{\circ}\text{C}$$

$$P_{10}= 2.6951\text{KPa}$$

$$P_{10} = 2.6951\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.02746 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{L10} = F_{V9} = 6 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9653 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{10}=F_{L10} * \rho_{10}$$

$$M_{10} = 6 \text{ L/h} * 0.9653\text{kg/l} = 5.7920\text{kg/h}$$

$$T_{10} \approx H_{10\text{Liq}} = 22.32 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 11

$$T_{11}=15.56^{\circ}\text{C}$$

$$P_{11}=1.767\text{kPa}$$

$$P_{11} = 1.767\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0180 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{11} = 0.0180 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.9991 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{11}=F_{L11} * \rho_{11}$$

$$M_{11} = 240 \text{ L/h} * 0.9991 \text{ kg/l} = 239.79\text{kg/h}$$

$$T_{11} \approx H_{11\text{Liq}} = 15.56 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 12

$$T_{12}=29.2^{\circ}\text{C}$$

$$P_{12}=4.051\text{kPa}$$

$$P_{12} = 4.051\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0412 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{12} = 0.0412\text{kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99598 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{12}=F_{L12} * \rho_{12}$$

$$M_{12} = 240 \text{ L/h} * 0.99598\text{kg/l} = 239.016\text{kg/h}$$

$$T_{12} \approx H_{12\text{Liq}} = 29.2 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 13

$$T_{13}=92.2^{\circ}\text{C}$$

$$P_{13}=75.6\text{kPa}$$

$$P_{13} = 75.61\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.770 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{13} = 0.770 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.96534 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{13}=F_{L13} * \rho_{13}$$

$$M_{13} = 6.3 \text{ L/h} * 0.96534\text{kg/l} = 6.081\text{kg/h}$$

$$T_{13} \approx H_{13\text{Liq}} = 92.2 \text{ Kcal/kg}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_7 + M_{10}}{M_4} = \frac{7.04 + 5.7}{12.794} = 0.992$$

Calor dado por el evaporador 1

$$Q=M_3 (H_3-H_4)$$

$$Q = 12.794 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(650 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 129.8 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 6655.43\text{kca/h}$$

Calor dado por el evaporador 2

$$Q =M_7 (H_7-H_9)$$

$$Q = 7.04 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(642.4 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 107 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 3769.21\text{kca/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_{13} (H_{13} - H_{12})$$

$$Q_q = 239.016\text{kg/h}*(29.2\text{Kcal/kg}-15.56\text{Kcal/kg})$$

$$Q_q = 3260.09\text{kca/h}$$



Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q=UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0=\pi D_0L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0=\pi*.031m*1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador 1

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{6655.43 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (129.8^\circ C - 107.8^\circ C)} = 2086.3416 \frac{\text{kcal}}{m^2 \cdot Ch}$$

Q = Calor dado por el evaporador 2

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{3769.21 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.145m^2 * (107.8^\circ C - 96^\circ C)} = 2202.928 \frac{\text{kcal}}{m^2 \cdot Ch}$$



TABLA 09) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO EN PARALELO (AGUA)

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
	Líquido	Mezcla	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
T (°C)	18.44	107.8	129.8	129.8	107.8	91.2	107
P (kg/cm ²)	0.0211	1.3964	2.7364	2.7364	1.3564	0.7418	1.3564
F (L/h)	19.65	-----	13.35	13.35	7.35	12.3	7.35
ρ (kg/l)	0.9986	-----	0.9585	0.9583	0.9583	0.9653	0.9583
M (kg/h)	19.622	-----	12.794	12.794	7.04	11.873	7.04
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	18.44	642.44	650	129.8	642.4	91.2	107

Corriente	8	9	10	11	12	13
	Mezcla	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
T (°C)	96	92.2	22.32	15.56	29.2	92.2
P (kg/cm ²)	0.8964	0.770	0.0274	0.0180	0.0412	0.770
F (L/h)	-----	6	6	240	240	6.3
ρ (kg/l)	-----	0.9653	0.9653	0.9991	0.9954	0.9653
M (kg/h)	-----	5.7920	5.79	239.79	239.01	6.081
C %	-----	-----	-----	-----	-----	-----
H (Kcal/kg)	638.07	636.56	22.32	15.56	29.2	92.2



DIAGRAMA DEL ARREGLO DEL EQUIPO

Sistema de Evaporador a Doble Efecto en Paralelo (Azúcar)

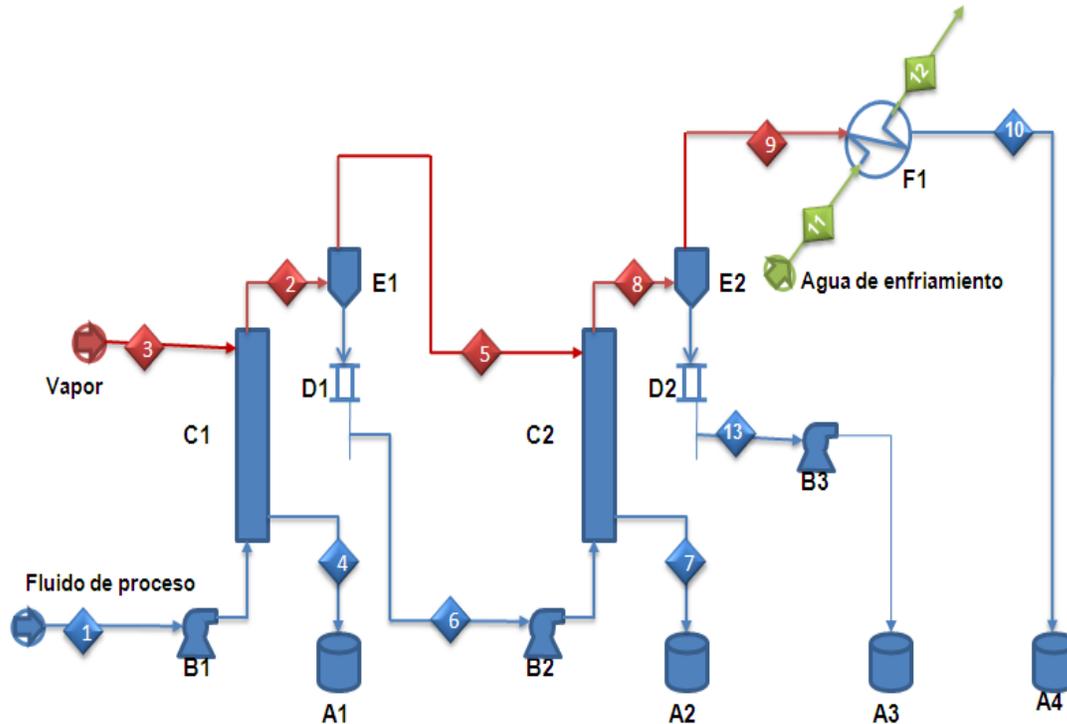


Fig.-10.1 Sistema de Evaporador a Doble Efecto en Paralelo (Azúcar)

A1 = Recipiente recolector de condensado del vapor I
A2 = Recipiente recolector de condensado del vapor II
A3 = Recipiente recolector de concentrado
A4 = Recipiente recolector de condensado del proceso

B1 = Bomba Dosificadora que alimenta el proceso
B2 = Bomba Dosificadora del concentrado
B3 = Bomba Dosificadora del concentrado

C1 = EVAPORADOR 1
C2 = EVAPORADOR 2

E1 = Separador 1
E2 = Separador 2

D1 = Recipiente para el muestreo 1
D2 = Recipiente para el muestreo 2

F1 = Condensador

Rombos = Indica el número de la corriente
Flechas = Indican la dirección del flujo



METODOLOGÍA APLICADA

A continuación se expondrá por puntos el procedimiento básico que se debe seguir para el buen funcionamiento del equipo, el cual incluirá notas y/o advertencias que se tienen que tomar en cuenta. La descripción se basará en el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) del arreglo correspondiente del sistema de evaporación.

1) Antes que nada, tenemos que prender el equipo y se procede de la siguiente manera:

a) Levantar la palanca de los fusibles.

b) Conectar el enchufe del equipo.

c) Levantar los switches.

d) Encender el interruptor general.

e) Encender el interruptor de paro de emergencia.



Fig.-10.2



b)

Fig.-10.4



c)

Fig.-10.3



d)

Fig.-10.6



e)

Fig.-10.5



- 2) En el panel de control se procede a encenderlas bombas dosificadoras 1, 2 y 3 (oprimir los botones verdes).
- 3) Después que el tablero esta encendido se hace el arreglo de tubería necesario (Arreglo a Doble Efecto en Paralelo Azúcar).

Nota: si es necesario verificar varias veces el arreglo, que el profesor a cargo de el visto bueno ya que si una válvula está abierta o cerrada indebidamente, lo mínimo será que los datos salgan erróneos, ya que puede que reviente un equipo o se descomponga si la válvula es del sistema de vapor.

- 4) Se abre el sistema de agua de enfriamiento a criterio del profesor a cargo y en el caso del rotámetro de agua de enfriamiento del condensador la fije en 240 L/h.
- 5) Se carga el tanque de alimentación (agua-azúcar).

Nota: no reciclar el agua si sus temperaturas son diferentes ya que puede alterar los cálculos de transferencia de calor y se puede obtener datos de temperatura más variantes de lo normal.

- 6) Se prenden las bombas manualmente, lo que generara que empiecen a transportar fluido.



Nota: Para prenderla se oprime el botón rojo y para detenerla se vuelve a oprimir el mismo botón. Los demás botones sirven para calibrar y programarla.

Fig.-10.7 Bombas Dosificadora

- 7) En lo que se inunda el sistema se procede a purgar el sistema de vapor.
- 8) Ya que se inundo el sistema se abre el sistema de vapor a criterio del profesor, en mi caso hice pruebas y mi criterio es entre 1 y 2 kg/cm² teniendo en cuenta el tamaño del equipo y en especial la potencia de la bomba.



- 9) Se tomara mínimo una hora en lo que el sistema se calienta y el operador estabiliza las condiciones de operación, posteriormente se procede a desarrollar las practicas.
- 10) El tiempo de cada corrida era entre 20 y 25 min, dependiendo del tamaño del tanque de alimentación, el flujo de alimentación, pero en especial por el tamaño de los tanques de almacenamiento.



Fig.-10.8 Tanque de alimentación



Fig.-10.9 Tanques de almacenamiento

- 11) Personalmente, durante la corrida tomaba datos cada 5 min para posteriormente sacar su media y así poder obtener datos más homogéneos

RESULTADOS

Durante la experimentación en el arreglo a doble efecto, efectúe 2 corridas que son las que lleve a cabo en el equipo de evaporación, de la cual escogí la corrida 2 para darle todo el tratamiento de cálculo. La corrida seleccionada es la que demostró una estabilidad en los datos generados a lo largo de la misma.



Tablas de las corridas efectuadas en el arreglo a doble efecto en paralelo (azúcar)

CORRIDA 1 (Azúcar)							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	16.92	105.78				89.34	91.14
P (kgf/cm ²)		0.53	1.58	1.56	0.52		0.48
F(L/h)				12			6
C (%)	3.5					5	
H ()							

CORRIDA 1 (Azúcar)						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	93.24	92.38	18.36	15.98	25.76	
P (kgf/cm ²)	0.05					
F(L/h)			4.35	240	240	9.3
C (%)						7
H ()						

CORRIDA 2 (Azúcar)							
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7
$\Sigma T (^{\circ}C)$	17.18	106.82				82.82	91.14
P (kgf/cm ²)		0.57	1.53	1.52	0.57		0.53
F(L/h)				11.55			5.4
C (%)	4					5.5	
H ()							

CORRIDA 2 (Azúcar)						
Corrientes	8	9	10	11	12	13
$\Sigma T (^{\circ}C)$	93.22	92.4	19.52	15.96	24.6	
P (kgf/cm ²)	0.05					
F(L/h)			3.9	240	240	10.2
C (%)						7.5
H ()						

En el arreglo de esta práctica se obtuvo una economía de 0.819 algo bastante bueno considerando las condiciones a las que opero el equipo, además el calor transferido fue poco más de 80%.

En la experiencias 10 (corrida 2) efectuadas en el evaporador se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 10.

Para ilustrar el proceso de calculo que los alumnos deben efectuar en el evaporador, pondré los cálculos correspondientes al balance de masa y energía,



posteriormente en esta sección se pondrá tablas e imágenes que representen los resultados nada más.

Balance de azúcar

$$F_{L1} = F_{L13} + F_{L10} + F_{L7} = 10.2 \frac{l}{h} + 3.9 \frac{l}{h} + 5.4 \frac{l}{h} = 19.5 \frac{l}{h}$$

$$E = \frac{F_{L7} + F_{L10}}{F_{L4}} = \frac{5.4 \frac{l}{h} + 3.9 \frac{l}{h}}{11.55 \frac{l}{h}} = 0.8051$$

Teniendo las ecuaciones $F_{L1}(x_1) = F_{L6}(x_6)$ y $F_{L1}(x_1) = F_{L13}(x_{13})$ se las desarrolle de la siguiente manera.

$$x_6 = \frac{F_{L1} * x_1}{F_{L6}} = \frac{19.5 * 0.04}{14.1} = 0.0553 \approx 0.055$$

$$x_{13} = \frac{F_{L1} * x_1}{F_{L13}} = \frac{19.5 * 0.04}{10.2} = 0.0764 \approx 0.075$$

Tomo los datos obtenidos por refractometría ($x_1=0.04$, $x_6=0.055$ y $x_{13}=0.075$) ya que es más exacta que la medición con rotámetro.

Presión absoluta

$$P_a = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}} \quad 1.033 \text{ kg/cm}^2 = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

$$P_{a2} = \left(0.57 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.3664 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a3} = \left(1.53 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.3264 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a4} = \left(1.52 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2.3164 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a5} = \left(0.57 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.3664 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{a7} = \left(0.53 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \left(\frac{586 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1.3264 \frac{\overline{kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_{a8} = \left(0.05 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) + \left(\frac{586mmhg}{760mmhg} * 1.033 \frac{\overline{kg}}{cm^2}\right) = 0.8464 \frac{\overline{kg}}{cm^2}$$

Calcular corriente 1

$$T_1 = 17.18^\circ C$$

$$P_1 = 1.958 kPa$$

$$P_1 = 1.958 kPa \left(\frac{1000 Pa}{1 kPa}\right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1 Pa}\right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}}\right) = 0.0199 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{L1} = F_{L13} + F_{L10} + F_{L7} = 10.2 \frac{l}{h} + 3.9 \frac{l}{h} + 5.4 \frac{l}{h} = 19.5 \frac{l}{h} \quad \rho_{\text{Agua tabla}} = 0.9988 \frac{kg}{l}$$

$$M_1 = F_{L1} * \rho_1$$

$$M_1 = 19.5 \frac{l}{h} * 0.9988 \frac{kg}{l} = 19.476 \frac{kg}{h}$$

$$T_1 \approx H_{1Liq} = 17.18 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 2

$$T_2 = 106.82^\circ C$$

$$H_{2vapor} = 2686.53 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{2vap} = 2686.53 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}}\right) = 642.096 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$H_{2vapor} = 642.096 \text{ kcal/kg}$ estrictamente el valor de esta entropía está mal ya que en esta corriente existe una mezcla de liq-vap y no se sabe en qué proporción.

Calcular corriente 3

$$P_3 = 2.3264 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}}\right) * \left(\frac{1 Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}\right) * \left(\frac{1 kPa}{1000 Pa}\right) = 228.314 kPa$$

$$P_3 = 228.31 Pa$$

$$T_3 = 124.45^\circ C$$

$$H_{vapor} = 2712.24 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{3vap} = 2712.24 * \left(\frac{239.006 \text{ cal}}{1 \text{ kJ}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}}\right) = 648.241 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Agua}} = 0.9583 \text{ kg/l}$$

$$F_{V3} = F_{L4} = 11.55 \frac{l}{h}$$

$$M_3 = F_{L3} * \rho_3$$

$$M_3 = 11.55 \text{ L/h} * 0.9583 \text{ kg/l} = 11.069 \text{ kg/h}$$



Calcular corriente 4

$$P_4 = 2.3164 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 227.333kPa$$

$$P_4 = 227.333kPa$$

$$T_4 = 124.32^\circ C$$

Como la corriente es líquida pongo la ρ a la temperatura más alta que tiene la tabla (100 °C).

$$\rho_{Agua4} = 0.9583 kg/l$$

$$M_4 = F_{L4} * \rho_4$$

$$M_4 = 11.55/h * 0.9583 kg/l = 11.069 kg/h$$

$$H_{4liq} = 129.32 Kcal/kg$$

Calcular corriente 5.

$$P_5 = 1.3664 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 134.099kPa$$

$$P_5 = 134.09kPa$$

$$T_5 = 108.04^\circ C$$

$$H_{vapor} = 2688.36 kJ/kg$$

$$H_{5 vap} = 2688.36 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006 cal}{1 kJ} \right) * \left(\frac{1 kcal}{1000 cal} \right) = 642.51 \frac{kcal}{kg}$$

$$\rho_{Agua tabla} = 0.9583 \frac{kg}{l}$$

$$F_{V5} = F_{L7} = 5.4 \frac{l}{h}$$

$$M_5 = F_{V5} * \rho_5$$

$$M_5 = 5.4 L/h * 0.9583 kg/l = 5.175 kg/h$$

Calcular corriente 6

$$T_6 = 82.82^\circ C$$

$$P_6 = 53.04kPa$$

$$P_6 = 53.04kPa \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.5404 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{L6} = F_{L13} + F_{L10} = 10.2 \frac{l}{h} + 3.9 \frac{l}{h} = 14.1 \frac{l}{h} \quad \rho_{Agua tabla} = 0.97183 \frac{kg}{l}$$

$$M_6 = F_{L6} * \rho_6$$

$$M_6 = 14.1 L/h * 0.97183 kg/l = 11.8736 kg/h$$

$$H_{6liq} = 82.82 Kcal/kg$$



Calcular corriente 7

$$P_7 = 1.3264 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 130.173kPa$$

$P_7 = 130.173KPa$

$T_7 = 107.15^\circ C$

$\rho_{Agua\ tabla} = 0.9583 \frac{kg}{l}$

$F_{V7} = F_{V5} = 5.4 \frac{l}{h}$

$M_7 = F_{V7} * \rho_7$

$M_7 = 5.4 L/h * 0.9583 kg/l = 5.175kg/h$

$H_{7liq} = 107.15 Kcal/kg$

Calcular corriente 8

$$P_8 = 0.8464 \frac{kg}{cm^2} * \left(\frac{14.7 \frac{lb}{in^2}}{1.0033 \frac{kg}{cm^2}} \right) * \left(\frac{1Pa}{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}} \right) * \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 83.066kPa$$

$P_8 = 83.06KPa$

$T_8 = 94.52^\circ C$

$H_{vapor} = 2667.38kJ/kg$

$$H_{8\ vap} = 2667.38 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 637.519 \frac{kcal}{kg}$$

Calcular corriente 9

$T_9 = 92.4^\circ C$

$P_9 = 76.762KPa$

$H_{vapor} = 2664.04kJ/kg$

$$P_9 = 76.762kPa * \left(\frac{1000Pa}{1kP} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{lb}{in^2}}{1Pa} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{kg}{cm^2}}{14.7 \frac{lb}{in^2}} \right) = 0.7821 \frac{kg}{cm^2}$$

$$H_{9\ vap} = 2664.04 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{239.006cal}{1kJ} \right) * \left(\frac{1kcal}{1000cal} \right) = 636.721 \frac{kcal}{kg}$$

$F_{V9} = F_{L10} = 3.9 \frac{l}{h}$

$\rho_{Agua\ tabla} = 0.9653 \frac{kg}{l}$

$M_9 = F_{L9} * \rho_9$

$M_9 = 3.9 L/h * 0.9653kg/l = 3.7648kg/h$



Calcular corriente 10

$$T_{10}=19.52^{\circ}\text{C}$$

$$P_{10}= 2.269\text{KPa}$$

$$P_{10} = 2.269\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0231 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{L10} = F_{V9} = 3.9 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{Agua tabla}} = 0.99823 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{10}=F_{L10} * \rho_{10}$$

$$M_{10} = 3.9 \text{ L/h} * 0.99823\text{kg/l} = 5.7920\text{kg/h}$$

$$T_{10} \approx H_{10\text{Liq}} = 19.52 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 11

$$T_{11}=15.96^{\circ}\text{C}$$

$$P_{11}=1.812\text{kPa}$$

$$P_{11} = 1.812\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0184 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{11} = 0.0184 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.9989 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{11}=F_{L11} * \rho_{11}$$

$$M_{11} = 240 \text{ L/h} * 0.9989 \text{ kg/l} = 239.7528\text{kg/h}$$

$$T_{11} \approx H_{11\text{Liq}} = 15.96 \text{ Kcal/kg}$$

Calcular corriente 12

$$T_{12}=24.6^{\circ}\text{C}$$

$$P_{12}=3.092\text{kPa}$$

$$P_{12} = 3.092\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.0315 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{12} = 0.0315\text{kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.99733 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{12}=F_{L12} * \rho_{12}$$

$$M_{12} = 240 \text{ L/h} * 0.99733\text{kg/l} = 239.359\text{kg/h}$$

$$T_{12} \approx H_{12\text{Liq}} = 24.6 \text{ Kcal/kg}$$



Calcular corriente 13

$$T_{13}=92.4^{\circ}\text{C}$$

$$P_{13}=76.76\text{kPa}$$

$$P_{13} = 76.76\text{kPa} \left(\frac{1000\text{Pa}}{1\text{kP}} \right) * \left(\frac{1.45 * 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{1\text{Pa}} \right) * \left(\frac{1.033 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} \right) = 0.7821 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{13} = 0.7821 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_{\text{Aguatabla}} = 0.96534 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$M_{13}=F_{L13} * \rho_{13}$$

$$M_{13} = 10.2 \text{ L/h} * 0.96534\text{kg/l} = 9.8664\text{kg/h}$$

$$T_{13} \approx H_{13\text{Liq}} = 92.4 \text{ Kcal/kg}$$

ECONOMIA

$$E = \frac{M_7 + M_{10}}{M_4} = \frac{5.175 + 3.893}{11.064} = 0.819$$

Calor dado por el evaporador 1

$$Q=M_3 (H_3-H_4)$$

$$Q = 11.069 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(642.24 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 124.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 5730.26\text{kca/h}$$

Calor dado por el evaporador 2

$$Q =M_7 (H_7-H_9)$$

$$Q = 5.175 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(642.51 - \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 107.15 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 2770.53\text{kca/h}$$

Calor quitado en el condensador

$$Q_q = M_{13} (H_{13} - H_{12})$$

$$Q_q = 239.35\text{kg/h}*(24.6\text{Kcal/kg}-15.96\text{Kcal/kg})$$

$$Q_q = 2067.98\text{kca/h}$$



Calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

$$Q=UA\Delta T$$

$$\text{Calculo del Área } A_0=\pi D_0L$$

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

D_0 = diámetro externo del tubo interior

L = altura

$$A_0=\pi*0.031m*1.49m = 0.145m^2$$

Despejar el Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$$

Q = Calor dado por el evaporador 1

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{5730.26 \frac{\text{kcal}}{h}}{0.145m^2 * (124.45^\circ C - 106.82^\circ C)} = 2241.5788 \frac{\text{kcal}}{m^2^\circ C h}$$

Q = Calor dado por el evaporador 2

$\Delta T = T_V - T_{\text{ebull}}$ = diferencia de temperaturas

A_0 = Área externa del tubo interior del evaporador.

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$U = \frac{2770.53 \frac{\text{kcal}}{h}}{0.145m^2 * (108.04^\circ C - 94.52^\circ C)} = 1413.2472 \frac{\text{kcal}}{m^2^\circ C h}$$



TABLA 10) BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN EVAPORADOR A DOBLE EFECTO EN PARALELO (AZÚCAR)

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
	Líquido	Mezcla	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
T (°C)	17.18	106.82	124.45	124.32	108.04	82.82	107.15
P (kg/cm ²)	0.0199	1.3664	2.3264	2.3164	1.3664	0.5404	1.3264
F (L/h)	19.5	-----	11.55	11.55	5.4	14.1	5.4
ρ (kg/l)	0.9988	-----	0.9583	0.9583	0.9583	0.9718	0.9583
M (kg/h)	19.47	-----	11.069	11.069	5.175	13.702	5.175
C %	4	-----	-----	-----	-----	5.5	-----
H (Kcal/kg)	17.18	642.09	642.24	124.32	642.51	82.82	107.15

Corriente	8	9	10	11	12	13
	Mezcla	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
T (°C)	94.52	92.4	19.52	15.96	24.6	92.4
P (kg/cm ²)	0.8464	0.7821	0.0231	0.0184	0.0315	0.7821
F (L/h)	-----	3.9	3.9	240	240	10.2
ρ (kg/l)	-----	0.9653	0.9982	0.9989	0.9973	0.9653
M (kg/h)	-----	3.764	3.893	239.75	239.35	9.866
C %	-----	-----	-----	-----	-----	7.5
H (Kcal/kg)	637.51	636.72	19.52	15.96	24.6	92.4



CONCLUSIONES

Cuando conocí por primera vez el equipo en la estancia corta del "PROYECTO PAPIME SOBRE EVAPORACIÓN. OPERACIONES UNITARIAS", se me hacía muy complejo e incluso tenía miedo de oprimir cualquier botón. En fin la primera semana vi teoría, las dos semanas subsecuentes fueron las efectivas pues fueron en las que se operó el Evaporador y "funcionó de maravilla sin ninguna complicación", y la última semana fue de cálculos.

Para el servicio social también decidí trabajar con el evaporador y por así decirlo empezó el caos, el manejo brusco del evaporador provocaba choques térmicos lo que ocasionaba innumerables fugas, que tardaban días en arreglar, también el equipo necesitaba que las tuberías tanto del vapor como del proceso e incluyendo los equipos como evaporadores y demás, necesitaban un enchaquetado, que se proporcionó después.

Gracias a la experimentación pude descubrir que el equipo soporta bien hasta tres Kilos de presión e incluso podría aguantar más sin problemas si no fueran por las bombas dosificadoras que tiene. En primer lugar no mandan más de 25 L/h y en segundo lugar están hechas de plástico, lo que provoca que sus empaques se truenen antes de llegar a los tres Kilos de presión.

Para la evaporación a simple efecto se utilizó el primer evaporador para su análisis y su estudio. Se pudo comprobar que el vacío sí aumentaba la economía aunque no de manera significativa. En la experimentación con azúcar, cuando el arreglo estaba sometido a vacío, concentraron la solución muy cercana al doble.

Pienso que el vacío es muy importante para la extracción de sustancias orgánicas ya que permite disminuir el punto de ebullición y evitar de esta manera que las sustancias orgánicas se descompongan por el exceso de calor. El vacío al cual se sometió el sistema no tenía la fuerza necesaria para bajar el punto de ebullición de la solución considerablemente. Por lo anterior, concluyó que no es de mucha ayuda en este caso el vacío. También el uso de vacío no es tan barato y se necesita una mayor supervisión.

Cuando acabé los experimentos de simple efecto me propuse seguir y no detenerme y empecé a trabajar con los arreglos a doble efecto, sin saber en lo que me estaba metiendo ya que la complejidad aumentó en todos los ámbitos, pero en el ámbito mas difícil de solucionar fue el de operación del equipo, ya que solo cuento con dos brazos para capturar nueve temperaturas, seis presiones, un rotámetro funcional y además medir manualmente los caudales del concentrado y



los condensados, sin mencionar cuando utilizaba la solución azucarada en la que tenía que muestrear y todo esto lo tenía que hacer cada cinco minutos.

Lo más prudente que se me ocurrió hacer fue pedir ayuda a mis compañeros de carrera, lo que con mucho entusiasmo me asistieron, como si se tratara de una fraternidad de las universidades de USA los cuales estuvieron dispuestos a ir a CU al Laboratorio de Ingeniería Química y recibir instrucciones de trabajo.

En el caso de los arreglos a doble efecto, conté con la ayuda de otros compañeros, pero como el sistema tiene un problema de fabricación, el vacío forma un sifón dentro del evaporador 1 y esto impedía que las descargas de concentrado y condensado fueran regulares. Por lo anterior descarté las experimentaciones de doble efecto a vacío.

Cuando se concluyeron todos los experimentos que se pudieron hacer, comencé a dar respuesta a uno de los objetivos más importantes de la tesis que era; el de "Identificar el arreglo en el evaporador, con mayor eficiencia tanto en la economía, como en la concentración incluyendo el ahorro de energía".

Cada arreglo a doble efecto tiene sus propias características. El arreglo a doble efecto Cruzado que tiene una concentración que es más del doble, pero su economía es baja y esta caracteriza un gran consumo y desperdicio de energía.

El arreglo a doble efecto en Paralelo, tiene un equilibrio entre su concentración que es ligeramente menor al doble, pero su economía es alta lo que denota que su consumo de energía es moderado.

El arreglo a doble efecto a Contracorriente, su concentración es más del doble y su economía es elevada lo que a todas luces podemos percatarnos de que ahorra bastante energía, sino que, el concentrado resultante de esa evaporación es bueno.

Por último rechazamos la hipótesis que hacía referencia al arreglo de doble efecto en Paralelo ya que como se comprobó, el arreglo ideal por así decirlo es el arreglo a doble efecto a Contracorriente y debí suponerlo desde el principio ya que en este arreglo de evaporación se presenta el mismo efecto que en el arreglo de intercambiadores de calor a Contracorriente.



RECOMENDACIONES

Recomendaciones para el operador :Al utilizar el equipo recuerde que tanto al encender como al apagar el equipo se tiene que hacer gradualmente para evitar los choques de temperatura y prevenir que se produzcan las fugas.

Verificar varias veces que la tubería corresponda con el arreglo deseado, esto ahorrará tiempo, energías y recursos.

Actualmente al equipo se le instaló una bomba centrífuga con un bypass. Por lo que recomiendo que se mantenga vigilada y seca ya que el problema de una bomba centrífuga frecuentemente es que si se moja puede quemarse el motor y en el peor de los casos puede provocar un corto o hasta electrocutar.

También se acaba de instalar una bomba de vacío de 1/2HP. Lo que probablemente le dé fuerza al vacío para poder provocar un cambio considerable del punto de ebullición, pero nunca debe olvidarse que se tiene que tener al vacío en constante vigilancia.

Una vez arrancado el quipo el operador no debe quitar su atención hasta que el equipo haya sido apagado debidamente.

Recomendaciones para fabricantes: El equipo tiene más capacidad del que aparenta por eso sugiero instalar una bomba centrífuga con un bypass. Y por ende proporcionarle tanques de almacenamiento más grandes para un mejor uso.

Hacer al equipo las modificaciones necesarias para que el equipo pueda trabajar con vacío en arreglos a doble efecto.



BIBLIOGRAFÍA

- I. Valiente Barderas Antonio "Operaciones Unitarias, Evaporación. Aplicaciones y Cálculos" Académica Española, España, págs. 58.
- II. Valiente Barderas Antonio "Problemas de Balances de Materia y Energía" Alhambra Mexicana. S.A. de C.V, México, 1991, Págs. 623.
- III. Valiente Barderas Antonio "Problemas de Balances de Materia" Alhambra Mexicana. S.A. de C.V, México D.F. 1981, Págs. 385.
- IV. Valiente Barderas Antonio "Problemas de Balance de Materia y energía en la industria alimentaria" Limusa S.A. DE C.V, 2^{ra} México D.F. 2008.
- V. Himmelblau David M "Balance de Materia y Energía" Prentice Hall Hispanoamericana. S.A. 4^{ta}, México, 1991, Págs. 656.
- VI. HenleyErnest J. "Cálculo de Balance de Materia y Energía" Reverte S.A. 6^{Ta}, México, 1991, Págs. 596.
- VII. Himmelblau David M "Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química" Pearson Educación, 4^{ta}, México, 2002, Págs. 724.
- VIII. HenleyErnest J. "Operaciones de Separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química" Reverte S.A. México, Págs. 814.
- IX. King Judson C. "Procesos de Separación" Reverte S.A. México1979, Págs. 914.
- X. Foust Alan S. "Principios de Operaciones Unitarias" Compañía Editorial Continental, S. A 13^{ra}, México, 1980, Págs. 750.
- XI. Incropera Frank. P. "Fundamentos de Transferencia de calor" Pearson Educación. 4^{ta}, México, 1999, Págs. 886.
- XII. Kern Donald Q "Procesos de Transferencia de Calor" Compañía Editorial Continental, S. A. 14^{ta}, México, 1980, Págs. 980.
- XIII. Holman J. P. "Transferencia de Calor" Compañía Editorial Continental, S. A. de C.V. 6^{ta}, México, 1995, Págs. 621.
- XIV. CengelYunus A. "Transferencia de Calor" McGraw-Hill Interamericana, 2^{da}, México, 2004, Págs. 623.
- XV. Martínez de la Cuesta Pedro J. "Operaciones de separación en Ingeniería Química. Métodos de cálculo" Pearson Educación. S. A. Madrid, 2004, Pág. 1010.



APÉNDICE A

NOMENCLATURA

Nombre	Símbolo	Unidades
Presión de la corriente n	P_n	$\frac{kg}{cm^2}$
Presión Manométrica	P_{man}	$\frac{kg}{cm^2}$
Presión Atmosférica	P_{atm}	$\frac{kg}{cm^2}$
Temperatura de la corriente n	T_n	$^{\circ}C$
Densidad	ρ	$\frac{kg}{l}$
Gasto Másico	M	$\frac{kg}{h}$
Concentración	C	%
Gasto Volumétrico	F	$\frac{l}{h}$
Entalpia de la corriente n	H_n	$\frac{Kcal}{kg}$
Economía	$E = \frac{M_{Des}^*}{M_{Cond}^{**}}$	
Calor dado en el Evaporador	$Q = M_{Vap}(H_{Vap}^{***} - H_{Cond})$ $Q = UA\Delta T$	$\frac{Kcal}{h}$
Calor quitado en el Condensador	$Q_q = M_{LC}^{****} (H_{LC} - H_{LF}^{*****})$	$\frac{Kcal}{h}$
Coefficiente Global de Transferencia de Calor	$U = \frac{Q}{A_0 * \Delta T}$	$\frac{kcal}{m^2 \cdot ^{\circ}C \cdot h}$
Diferencia de temperaturas	$\Delta T = T_V - T_{ebull}$	$^{\circ}C$
Área externa del tubo interior del evaporador	$A_0 = \pi D_0 L$	m^2
Diámetro externo del tubo interior	D_0	m
Altura	L	m

*Destilado, **Condensado, ***Vapor, ****Línea Caliente del agua de enfriamiento y ***** Línea Fría del agua de enfriamiento.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR
P R E S E N T E.

Comunico a usted que al alumno(a) Laguna Salas Edgar con número de cuenta 304280009 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 5 del mes de octubre de 2012 a las 16:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	M. en M. GENARO ALTAMIRANO GARCÍA
VOCAL	DR. ANTONIO VALIENTE BARDERAS*
SECRETARIO	I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA
SUPLENTE	I.Q. CUAUHTÉMOC LAGOS CHÁVEZ
SUPLENTE	M. en I. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ TAGLE

Genaro Altamirano García
Dominga Ortiz Bautista
M. en I. María Estela de la Torre Gómez Tagle

El título de la tesis que se presenta es: Evaporación a simple y doble efecto, en el "Equipo para estudio de un evaporador de doble efecto" del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

Opción de Titulación: Tesis profesional

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
 México, D. F. a 11 de septiembre de 2012.

Dr. Víctor Manuel Mendoza Nuñez
 DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ
 DIRECTOR
 ZARAGOZA
 DIRECCIÓN

Dr. Roberto Mendoza Serina
 DR. ROBERTO MENDOZA SERINA
 JEFE DE LA CARRERA DE I. Q.

RECIBI:
 OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES
 Y DE GRADO

Vo.Bo.