

24,37

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EVALUACION DEL REFRIGERADOR CONTINUO POR ABSORCION DE AMONIACO EN AGUA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

T E S I S
M A N C O M U N A D A
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O Q U I M I C O
P R E S E N T A N :
G U A D A R R A M A B A H E N A H I L D A L E T I C I A
M O N T E S D E O C A N A V A L U Z M A R I A

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.

| INDICE | PAGINA |
|---|--------|
| RESUMEN | I |
| I.-INTRODUCCION | |
| 1.1 Objetivo de la tesis. | 1 |
| 1.2 Los refrigeradores de absorción. | 2 |
| 1.3 El Refrigerador Continuo del IIM. | 9 |
| II.-REQUERIMIENTOS EXPERIMENTALES | |
| 2.1 Instrumentación. | 22 |
| 2.2 Preparación del Refrigerador. | 26 |
| 2.3 Registro de datos. | 30 |
| III.-TERMODINAMICA DEL SISTEMA | |
| 3.1 Consideraciones. | 31 |
| 3.2 Balances de materia y energía. | 34 |
| 3.3 Procesos termodinámicos del Refrigerador Continuo. | 35 |
| IV.-PROGRAMA DE COMPUTADORA | |
| 4.1 Estructura del programa. | 60 |
| 4.2 Programa para la creación de archivos. | 63 |
| 4.3 Módulo 4: Subrutinas de las propiedades termodinámicas. | 65 |
| 4.4 Módulo 3: Subrutinas para entalpías. | 67 |
| 4.5 Módulo 2: Subrutinas de los elementos. | 69 |
| 4.6 Módulo 1: Programa principal. | 79 |

V.-PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

| | |
|---|-----|
| 5.1 Variación de parámetros experimentales. | 81 |
| 5.2 Procesamiento de datos y resultados. | 83 |
| 5.3 Análisis. | 90 |
| 5.4 Conclusiones. | 91 |
| | |
| APENDICE | 95 |
| REFERENCIAS | 107 |

RESUMEN

Hace algunos años, el Grupo de Refrigeración del Departamento de Energía Solar del Instituto de Investigaciones en Materiales vió la necesidad de construir un sistema de refrigeración por absorción, utilizando como fuente de calentamiento la energía solar. Se esperaba crear tecnología con este tipo de energía, y a su vez proporcionar "frío", necesario en el país para la conservación de alimentos perecederos, de medicinas y de acondicionamiento de aire, pero de difícil acceso para las zonas alejadas de las grandes ciudades, donde no se tiene suministro de energía eléctrica.

El proyecto consistió en el diseño, construcción instalación, arranque, puesta en marcha y evaluación del refrigerador. Cabe mencionar que el calentamiento se hizo con una resistencia eléctrica, que proporcionó los rangos de temperatura que se consiguen con la energía solar, ya que el sistema de calentamiento solar sería desarrollado paralelamente y posteriormente complementar los dos sistemas para concluir el proyecto.

Nuestra participación en el proyecto, se inició con el arranque y puesta en marcha del refrigerador bajo las condiciones de diseño y otras que comprendían la variación de la temperatura de generación de 353 a 373 K y el gasto de solución concentrada recirculado por la bomba de 0.016 a 0.0185 Kg/s. con lo cual se evaluaba el Refrigerador Continuo de Absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ del IIM, dicha evaluación consistía en realizar balances de materia y

energía par cada elemento del Refrigerador, conociendo así la eficiencia individual y posteriormente determinar la eficiencia global. En el periodo de la experimentación se probaba la estabilidad del equipo, su control y la resistencia de materiales y accesorios. Para la evaluación se consideró únicamente el régimen permanente, de tal forma que el estado transitorio de arranque sólo se describe cualitativamente.

Una vez concluida la etapa de experimentación, se elaboró un programa de computadora para el procesamiento de los datos. Éste evalúa con ayuda de subrutinas las propiedades termodinámicas de saturación, sobrecalentamiento, subenfriamiento y mezcla, necesarias para realizar balances de masa y energía en los elementos del Refrigerador, calcula los calores y eficiencias individuales y la eficiencia global.

Con los resultados del programa de computadora se elaboraron gráficas, éstas muestran la tendencia de los resultados y con eso indican el comportamiento en distintas condiciones del Refrigerador Continuo de Absorción de NH_3 - H_2O del IIM.

Después de analizar los resultados para las diferentes condiciones de operación, se concluye que el Refrigerador operó bien bajo las condiciones de diseño, pero su eficiencia se incrementó cuando la temperatura de generación aumentó y el flujo másico de la solución concentrada se mantuvo en 0.016 Kg/s, el cual corresponde al valor de diseño.

CAPITULO I

INTRODUCCION

En este capítulo se define el objetivo de este trabajo y se presenta brevemente la historia de los refrigeradores de absorción, así como el desarrollo del Refrigerador Continuo de Absorción de NH_3 - H_2O del IIM.

3 2

1.1 OBJETIVO DE LA TESIS.

El objetivo de este trabajo es conocer el comportamiento en régimen permanente del Refrigerador Continuo de Absorción de NH_3 - H_2O del Instituto de Investigaciones en Materiales, bajo las condiciones de diseño, tales como temperatura de generación de 358.16 K (85 C), temperatura de condensación de 298.16 K (25 C), presión de condensación de 1.1143 MPa (10 atm), concentración de la solución diluida de $0.40 \text{ Kg NH}_3/\text{Kg solución}$ y concentración de la solución concentrada de $0.48 \text{ Kg NH}_3/\text{Kg solución}$ (1); así como también el comportamiento al variar la temperatura de generación de 353.16 a 373.16 K (80 a 100 C), y el gasto de la solución concentrada de 0.016 a 0.0185 Kg/s . Ya que al manipular estas dos variables se controlan las restantes del proceso, porque se prevé su rango de operación.

Para alcanzar este objetivo es necesario operar al Refrigerador siguiendo una secuencia de carga, arranque y puesta en marcha hasta alcanzar el régimen permanente para los parámetros de diseño. Durante este periodo se prueba simultáneamente la resistencia de los materiales y accesorios, la estabilidad del equipo y su control, y se registran los valores de las temperaturas de entrada y salida, presiones y flujos en cada elemento, con el fin de determinar las propiedades termodinámicas necesarias en los balances de masa y energía, para conocer el comportamiento termodinámico y global. Los parámetros mencionados se registran cada 15 minutos en corridas experimentales con duración de 3 horas.

1.2 LOS REFRIGERADORES DE ABSORCION.

Las primeras máquinas que se usaron para mantener bajas temperaturas se construyeron en el siglo XVIII, empleaban el vacío logrado por una bomba que permitía hervir un líquido a una temperatura suficientemente baja, y en consecuencia producir enfriamiento al tomar energía del medio por conservar. El científico William Cullen trabajó con un sistema de este tipo, utilizando agua como líquido de trabajo.

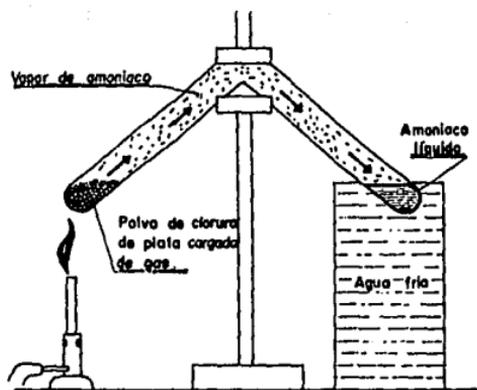
Simultáneamente Faraday descubrió que el cloruro de plata tiene la capacidad de absorber el amoníaco. Expuso cierta cantidad de cloruro de plata en polvo al amoníaco gaseoso hasta saturarlo. La sal cargada de gas se colocó posteriormente en un tubo de ensaye sellado en forma de V invertida, como se muestra en la

Fig.1.1. Cuando se le aplicó calor se desprendió vapor de amoníaco, el cual se enfrió y condensó sumergiendo el otro extremo del tubo en un recipiente con agua fría. El agua sirvió como agente de remoción de calor latente del amoníaco gaseoso. Conforme los vapores de amoníaco entraron en el extremo enfriado del tubo de ensaye, se formaron gotas de amoníaco líquido y se acumularon, como indica la Fig.1.1(a). Esta fue la primera vez que se observó que el amoníaco había cambiado del estado gaseoso al líquido. Una vez que se eliminó la aplicación de calor y del agua de enfriamiento sucedió algo curioso, inmediatamente después, el amoníaco líquido empezó a hervir, regresando nuevamente al estado vapor, el cual fue absorbido otra vez por el polvo de cloruro de plata, como se muestra en la Fig.1.1(b).

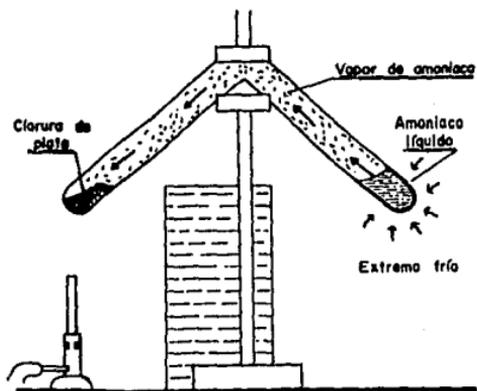
Cuando Faraday tocó el extremo del tubo de ensaye que contenía amoníaco líquido, encontró que estaba bastante frío. Sin embargo, aún más sorprendente fue el hecho de que el enfriamiento se había producido por la ebullición del líquido, sin la presencia de fuente alguna de suministro de calor.

Cada vez que Faraday repitió el proceso, observó el mismo cambio. Lo novedoso consistió en que fue posible lograr temperaturas bajas en el laboratorio siempre que se repitió el experimento, sin que se alteraran los ingredientes en el tubo de ensaye.

Posteriormente, en el siglo XIX Edmund Carré creó otro sistema de absorción. Colocó en un recipiente una mezcla de H_2SO_4 - H_2O y le suministró calor, generándose vapor de H_2SO_4 con agua, al pasar por un separador se eliminó el agua y condensó el



(a)



(b)

Fig. 1.1 Aparato de destilación y absorción de Faraday.

vapor de H_2SO_4 , almacenándolo en otro recipiente con una válvula en su parte superior, como se muestra en la Fig.1.2. Aisló y dejó enfriar el primer recipiente para disminuir la presión y la temperatura de la mezcla. Después abrió la válvula y se inició la evaporación del H_2SO_4 enfriando el medio; el vapor regresó al primer recipiente y la mezcla inicial se formó nuevamente completando el ciclo.

Ferdinand Carré encontró un tercer sistema de absorción, modificó el de Edmund Carré usando una mezcla de NH_3-H_2O . Este

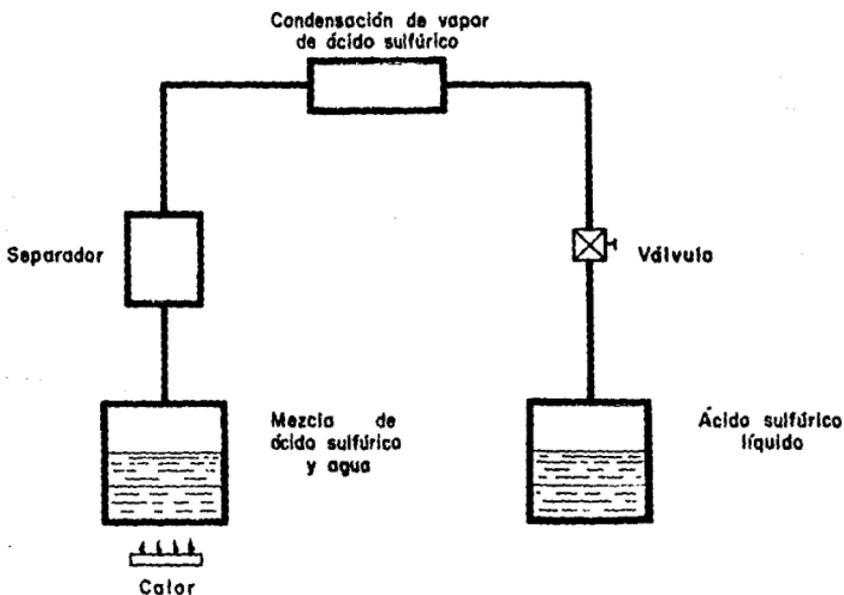


Fig. 1.2 Sistema intermitente de refrigeración por absorción.

sistema opera sin alternar los procesos de generación y absorción. Está formado de 4 dispositivos: generador, condensador, evaporador y absorbedor, además tiene 2 válvulas donde se efectúa la expansión del amoniaco y de la solución rica en agua, y una bomba que aumenta la presión de la solución rica en amoniaco. En estos sistemas de refrigeración se tienen 2 zonas, una de alta presión donde se efectúan las operaciones de generación-condensación y otra de baja presión donde se realizan la evaporación-absorción; físicamente se encuentran separadas por las válvulas de expansión y la bomba, en la Fig.1.3. se presenta un sistema de este tipo.

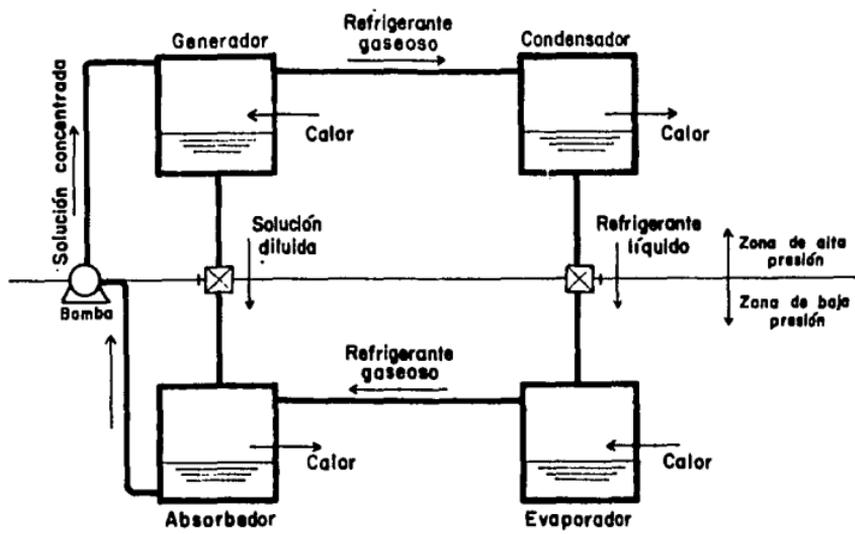


Fig. 1.3 Sistema Continuo de Refrigeración por Absorción.

Haciendo un resumen de los distintos sistemas observamos que: El equipo utilizado por Faraday es un sistema cerrado, sólido-gas e intermitente, ya que no hay transferencia de masa entre sistema y alrededores, la absorción del vapor la realiza un sólido y los procesos de generación y absorción se realizan en forma alternada.

El equipo empleado por Edmund Carré es un sistema cerrado, usa una mezcla líquido-gas, opera de manera intermitente, y la absorción del vapor la realiza un líquido.

El equipo desarrollado por Ferdinand Carré es un sistema cerrado que trabaja con una mezcla líquido-gas y opera continuamente.

Los sistemas de refrigeración por absorción funcionan con energía calorífica y utilizan mezclas de refrigerante-absorbente, donde la substancia que absorbe energía del medio es el refrigerante, el cual es alternativamente absorbido y liberado por la otra substancia afin llamada absorbente, que puede ser un sólido o un líquido. Para seleccionar la mezcla adecuada se siguen los criterios descritos a continuación: El absorbente debe tener una fuerte afinidad por el vapor refrigerante; tanto absorbente como refrigerante deben ser mutuamente solubles en el rango deseado de condiciones de operación; además de ser seguros, estables y no corrosivos, tanto separados como combinados. La volatilidad del absorbente deberá ser muy baja, de tal manera que el vapor refrigerante contenga poco o nada de absorbente al salir del generador; las presiones de trabajo deberán ser razonablemente bajas y de preferencia cercanas a la presión atmosférica, para minimizar el peso del equipo y las fugas. El refrigerante deberá tener un

calor latente de vaporización alto, de modo que el flujo de refrigerante requerido sea mínimo.

Actualmente las combinaciones de uso común son las siguientes:

I) AMONIACO-AGUA (NH_3 - H_2O)

El amoníaco es el refrigerante y el agua es el absorbente. Se usa especialmente en refrigeración. Es la mezcla más empleada porque el amoníaco tiene el mayor calor latente de vaporización por unidad de masa. El agua tiene gran afinidad por el vapor de amoníaco y los 2 son mutuamente solubles en un rango muy amplio de condiciones. Ambos fluidos son altamente estables y son compatibles con casi todos los tipos de acero. El amoníaco es ligeramente tóxico, muy irritante, algo inflamable, explosivo, limitando su empleo en aire acondicionado. Sus presiones de operación son relativamente altas. El agua es volátil, lo cual implica adaptar equipo adicional para la eliminación del agua y obtener amoníaco puro.

II) AGUA-BROMURO DE LITIO (H_2O -LiBr)

El agua es el refrigerante y el bromuro de litio es el absorbente. Se usa principalmente en aire acondicionado. El absorbente no es volátil y no forma mezclas con el refrigerante en la fase vapor, por lo que no se requiere de un separador adicional. Las presiones de operación son muy bajas, menores que la atmosférica. No se necesita instalar válvulas de expansión.

Como el agua es el refrigerante no se puede usar esta mezcla para aplicaciones donde la temperatura del evaporador sea menor de 273.16 K (0 C). El absorbente no es totalmente soluble en el agua, por lo que puede presentar precipitación y cristalización.

III) AMONIACO - TIOCIANATO DE SODIO ($\text{NH}_3\text{-NaSCN}$)

3

El amoníaco es el refrigerante y el tiocianato de sodio es el absorbente. Se usa para refrigeración y enfriamiento solar, esta mezcla se puede utilizar en recipientes de acero; muestra propiedades termodinámicas convenientes, con altas solubilidades, bajas presiones de vapor y altos calores de vaporización. Esta mezcla es barata, químicamente es estable e inerte, tiene gran conductividad calorífica. El tiocianato de sodio es tóxico.

1.3 EL REFRIGERADOR CONTINUO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES.

En 1977, se tuvo en el IIM la inquietud de diseñar un refrigerador, adaptable a comunidades alejadas de las zonas urbanas que contara con un suministro de energía no convencional como lo es la energía solar.

El resultado fue la creación de un proyecto para construir un refrigerador por absorción que operara en forma continua, utilizando la mezcla binaria amoníaco-agua, que produjera 100 Kg . de hielo en 6 horas de operación con los parámetros de diseño

mostrados en la Tabla 1.1.

Se incluyeron 3 elementos para mejorar la eficiencia térmica del refrigerador de absorción convencional, consistiendo éstos en un rectificador con convección natural de aire para enfriar el vapor de amoníaco que sale del generador, mejorando su calidad y permitiendo también el ahorro del agua de enfriamiento en el condensador; un preenfriador que sirve para subenfriar el condensado que entra a la válvula de expansión; un cambiador de calor que sirve para calentar la solución concentrada que llega al generador, y enfriar la solución diluida que llega al absorbedor. En la Fig.1.4. se muestra la configuración de este refrigerador.

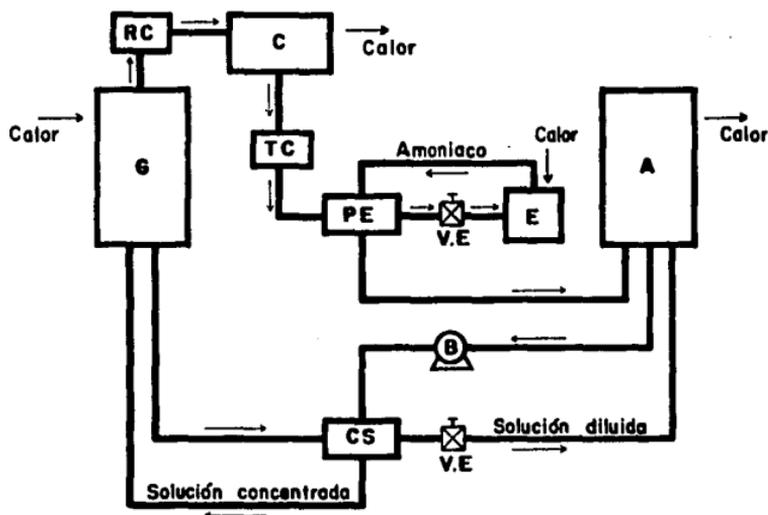
Tabla 1.1. Parámetros de diseño. (1)

| | |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Temp.máx, de generación | 358.16 K |
| Temp. máx. de agua de enfriamiento | 295.16 K |
| Temp. de evaporación constante | 263.16 K |
| Temp. de condensación | 298.16 K |
| Temp. de salida del absorbedor | 298.16 K |
| Presión de condensación | 1.1143 MPa. |
| Presión de evaporación | 0.3039 MPa. |
| Concentración de solución diluida | 0.40 Kg NH ₃ /Kg sol. |
| Concentración de solución concentrada | 0.48 Kg NH ₃ /Kg sol. |

El generador consta de 2 secciones; la primera es un generador de película descendente y la segunda es un rectificador, como se muestra en la Fig.1.5.

La primera sección está constituida por 25 tubos de acero al

carbón de 1/2" de diámetro ced.40, en arreglo triangular. Por su parte interna desciende la solución concentrada y el aceite de calentamiento asciende por la parte externa. Debido al intercambio de calor se genera vapor de amoniaco y agua.



G = Generador

C = Condensador

E = Evaporador

A = Absorbedor

B = Bomba

RC = Rectificador con convección natural de aire.

PE = Preenfriador

CS = Cambiador de calor de sol.

TC = Tanque de condensados.

VE = Válvula de expansión.

Fig.1.4. Elementos del Refrigerador Continuo de Absorción de NH₃-H₂O del IIM.

3 2

En la segunda sección se encuentra una regadera que rocía un lecho empacado con esferas de vidrio, mejorando la calidad del vapor generado.

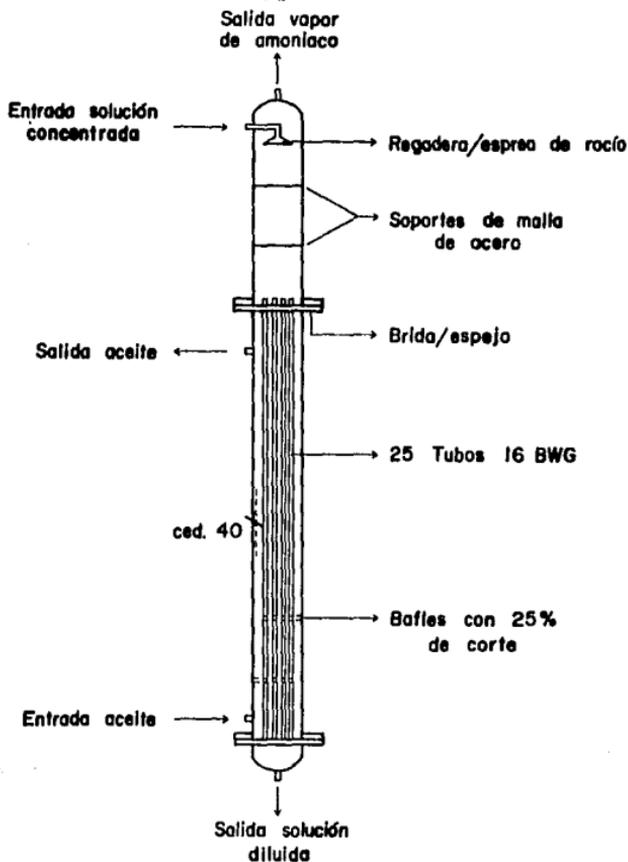


Fig. 1.5 Esquema del generador.

El rectificador con convección natural de aire es un tubo

sin aislamiento de 1/2" de diámetro ced. 80 en acero al carbón de 1 m. de longitud. En él se efectúa un intercambio de calor entre el vapor de amoniaco-agua y el aire del medio que lo rodea, incrementando la calidad del vapor.

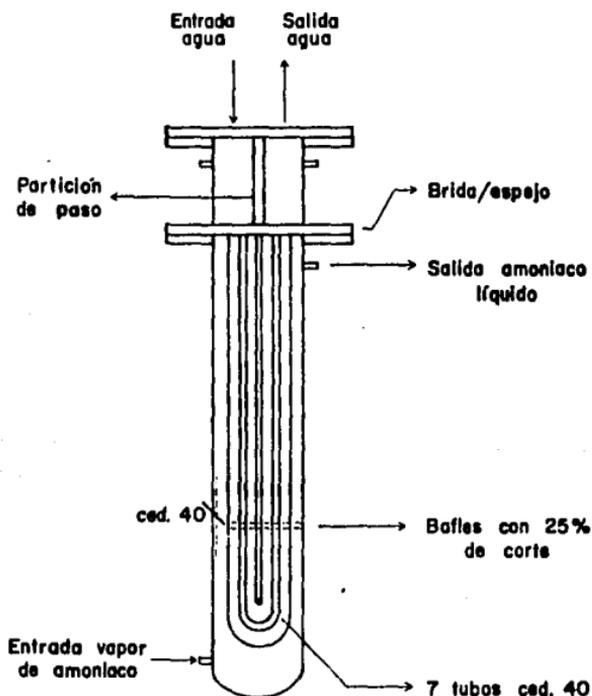


Fig. 1.6 Esquema del condensador.

El condensador es del tipo de tubos y coraza. Está constituido de 7 tubos de 1/2" de diámetro ced. 40, en forma de U en arreglo triangular, cuya área de transferencia es de 0.5 m^2 . Se

muestra un esquema de este intercambiador en la Fig.1.6. Durante la operación del refrigerador el amoniaco casi puro circula por la coraza, y a contracorriente por los tubos fluye el agua de enfriamiento.

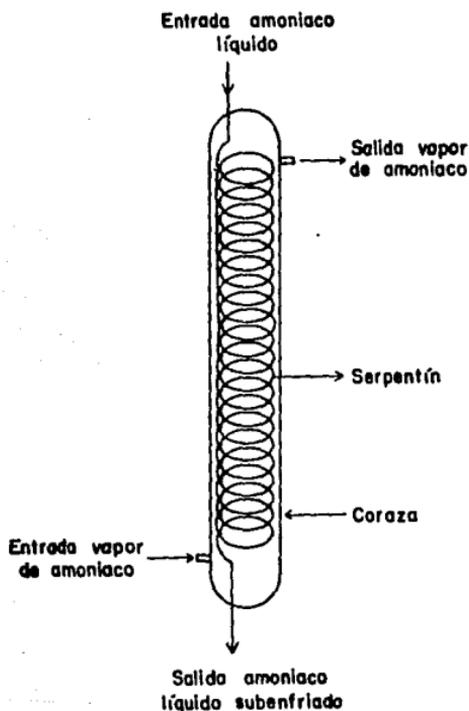


Fig. 1.7 Esquema del preenfriador.

El preenfriador es un intercambiador de calor del tipo de tubo y coraza, donde el tubo está diseñado en forma de serpentín y está construido en acero al carbón. Se muestra su esquema en la

Fig.1.7. La finalidad de este dispositivo es disminuir la temperatura del amoniaco liquido que viene del tanque de condensados, para aumentar la capacidad de enfriamiento del evaporador.

El evaporador es un contenedor de lámina galvanizada calibre 18. Mide 1m. de ancho x 1 m. de alto x 2 m. de largo. Está aislado con colchoneta de fibra de vidrio de 0.10 m. de espesor. Dentro del contenedor está instalado un serpentín de 30 mts. de longitud, hecho con tubería de 1/2" de diámetro ced.40, como se muestra en la Fig.1.8. También ahí se encuentran 10 moldes para hielo sumergidos en salmuera; la circulación de ésta con una bomba mejora la transferencia de calor y aumenta la eficiencia en la producción de hielo.

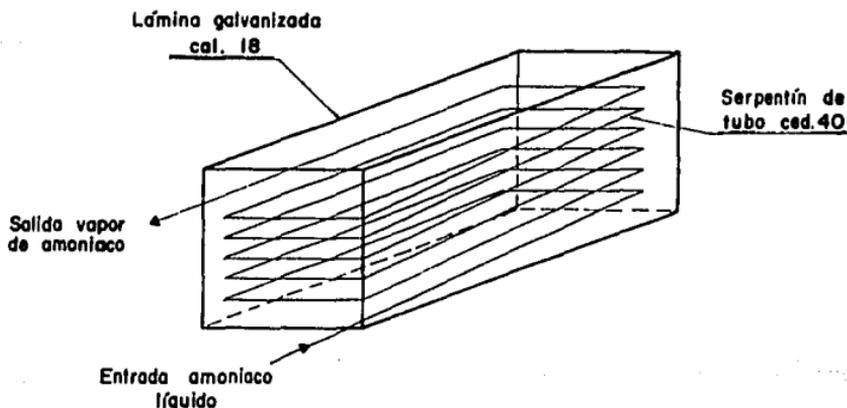


Fig. 1.8 Esquema del evaporador.

El absorbedor es un recipiente cilindrico de acero al carbón, que en su parte superior tiene un distribuidor semitoroidal

enchaquetado, permitiendo la formación de una película descendente. En la Fig.1.9. se muestra este elemento. Durante la operación la solución diluida se alimenta por la parte superior, formando una película que al escurrir por las paredes va absorbiendo el

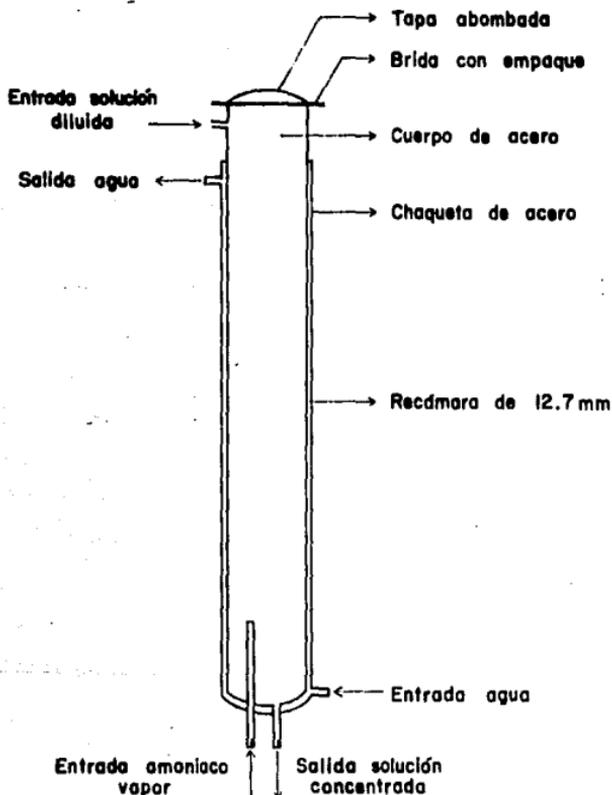


Fig. 1.9 Esquema del absorbedor.

vapor de amoniaco que salió de la zona de burbujeo. La solución concentrada recién formada se extrae por la parte inferior del absorbedor.

El cambiador de calor de solución es del tipo de tubos y coraza, de acero al carbón y está constituido de 7 tubos en forma de U en arreglo triangular. Durante la operación del refrigerador la solución diluida circula por la coraza y la solución concentrada lo hace por los tubos. La finalidad de este equipo es enfriar la solución diluida que viene del generador, para que el absorbedor no requiera mayor flujo de agua de enfriamiento, y a la vez calentar la solución concentrada que viene del absorbedor, para que en el generador se requiera menor cantidad de aceite de calentamiento.

El Refrigerador Continuo de Absorción de NH_3 - H_2O del IIM tiene implementados tres sistemas auxiliares:

- a) Sistema de aceite de calentamiento
- b) Sistema de agua de enfriamiento
- c) Sistema de recirculación de salmuera.

La fuente de calentamiento de este refrigerador, son captadores solares; que actualmente se encuentran en periodo de construcción, por lo cual se utilizó energía convencional, como lo es la corriente eléctrica.

El sistema de calentamiento está constituido por un tanque de 200 l. de capacidad, en él se calienta el aceite por medio de una resistencia eléctrica y se recircula con ayuda de una bomba centrífuga, también tiene adaptado un tanque de expansión para tener el espacio suficiente en caso de que el aceite hierva. La

Fig.1.10 muestra un esquema del sistema de calentamiento.

El sistema de agua de enfriamiento está formado por un tanque de almacenamiento de agua de 150 l. conectado a una bomba centrífuga; ésta envía el agua a través de un sistema de tuberías que alimentan al absorbedor y al condensador en forma independiente, como se muestra en la Fig.1.11,

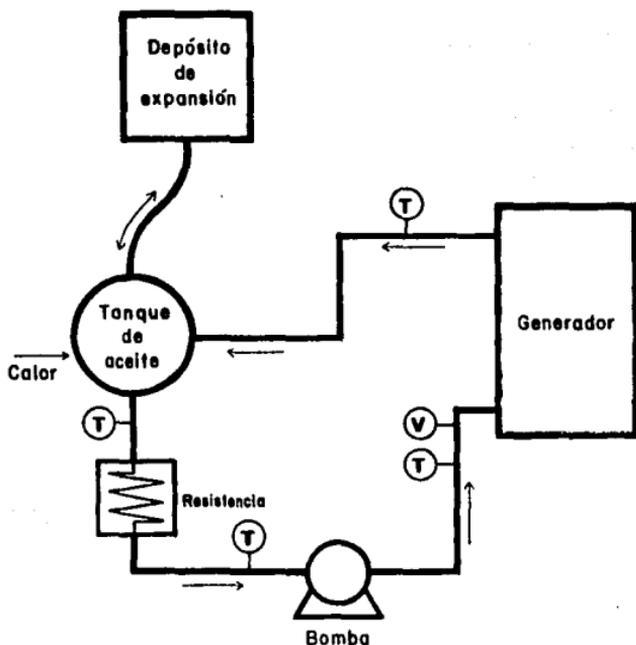


Fig. 1.10 Sistema de aceite de calentamiento.

El sistema de recirculación de salmuera. se encuentra en el

interior del contenedor, la concentración de la salmuera es del 30% en peso, ésta se recirculó con una bomba centrífuga a través de unas boquillas, con el fin de mejorar la transferencia de calor, como se presenta en la Fig.1.12.

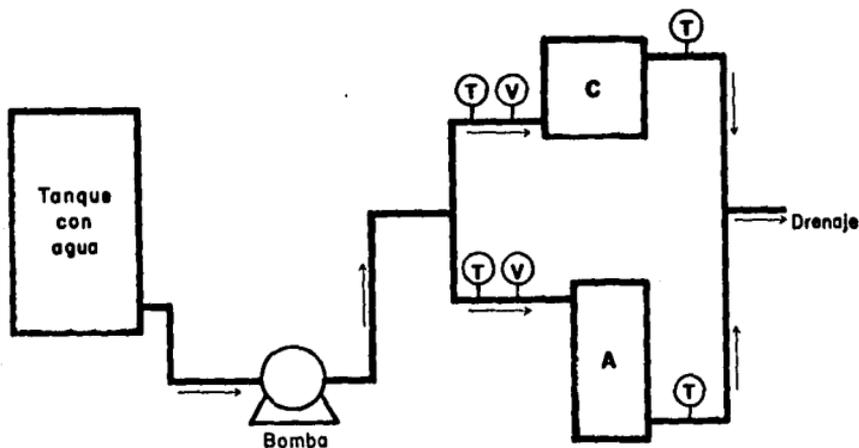


Fig. 1.11 Sistema de agua de enfriamiento.

En la primera etapa de trabajo, se hicieron 2 corridas con este evaporador y se comprobó que para producir hielo se requerían periodos largos de operación, debido a la baja eficiencia del aislamiento del contenedor y al pobre mezclado de la salmuera, por lo que se decidió modificar el sistema. Para la segunda etapa de trabajo se desalojó la salmuera y se quitaron los moldes, se instalaron 2 resistencias eléctricas en paralelo cubriendo la tercera parte del serpentín; con esta modificación se

evaluó el refrigerador sin producción de hielo, ya que el calor necesario para la evaporación del amoniaco era proporcionado por las resistencias junto con un Variac.

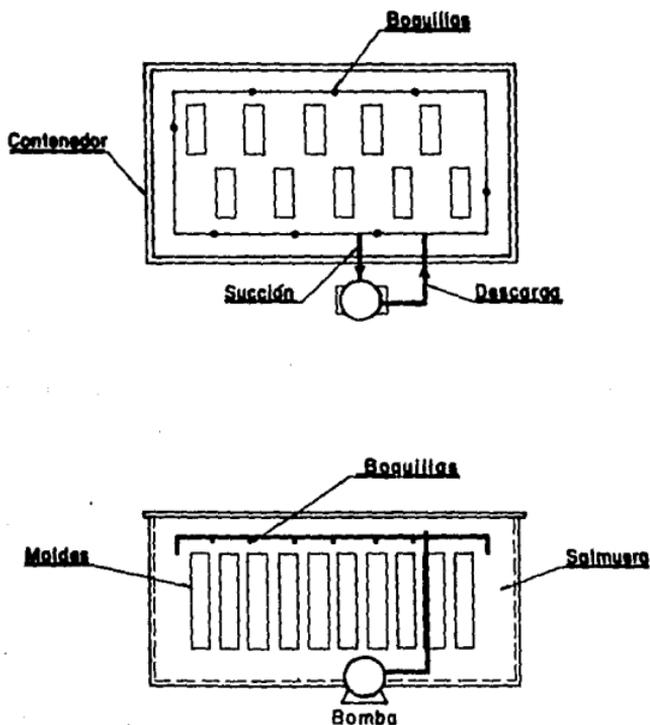


Fig. 1.12 Sistema de recirculación de salmuera.

NOMENCLATURA

| | | |
|----|---|-----------------------------------|
| C | Concentración. | Kg de NH ₃ /Kg de sol. |
| Cp | Capacidad calorífica a presión constante. | KJ/Kg K |
| h | Entalpia. | KJ/Kg |
| ρ | Densidad. | Kg/m ³ |
| M | Flujo másico. | Kg/s |
| η | Eficiencia. | Adim. |
| P | Presión. | MPa |
| Q | Calor. | KJ/s |
| T | Temperatura. | K |
| W | Trabajo. | KJ/s |
| RF | Relación de flujo. | Adim. |
| TI | Indicador de temperatura. | |
| PI | Indicador de presión. | |
| FI | Indicador de flujo. | |
| V | Válvula. | |

SUBINDICES

| | | | |
|------|--------------|---|--------------------|
| 1, e | Entrada. | l | Líquido. |
| 2, s | Salida. | r | Real. |
| b | Bomba. | t | Teórico. |
| c | Condensador. | v | Vapor de amoniaco. |
| g | Generador. | | |

CAPITULO II

REQUERIMIENTOS EXPERIMENTALES

En esta sección se describe la instrumentación necesaria para realizar posteriormente los balances de masa y energía en los elementos del refrigerador y en los sistemas auxiliares. La forma como se realizó la carga, el arranque, la puesta en marcha y el alcance del régimen permanente del sistema, así como la adquisición de datos.

2.1 INSTRUMENTACION

Las variables que se midieron durante la operación del sistema fueron la temperatura, presión y flujo.

Para medir la temperatura se seleccionó el termopar, que es de fácil manejo, de fácil construcción, da respuestas confiables y su costo no es elevado. En el sistema se instalaron dos tipos de termopares. Los de hierro-constantan se usaron en el refrigerador para las corrientes de refrigerante puro y mezcla, debido a la mayor resistencia que presentan estos metales a la corrosión, su rango de temperatura es 73.16 K a 1173.16 K (-200 C a 900 C) que incluye las temperaturas de operación del sistema. Se presenta un diagrama de localización de estos termopares en la Fig.2.1.

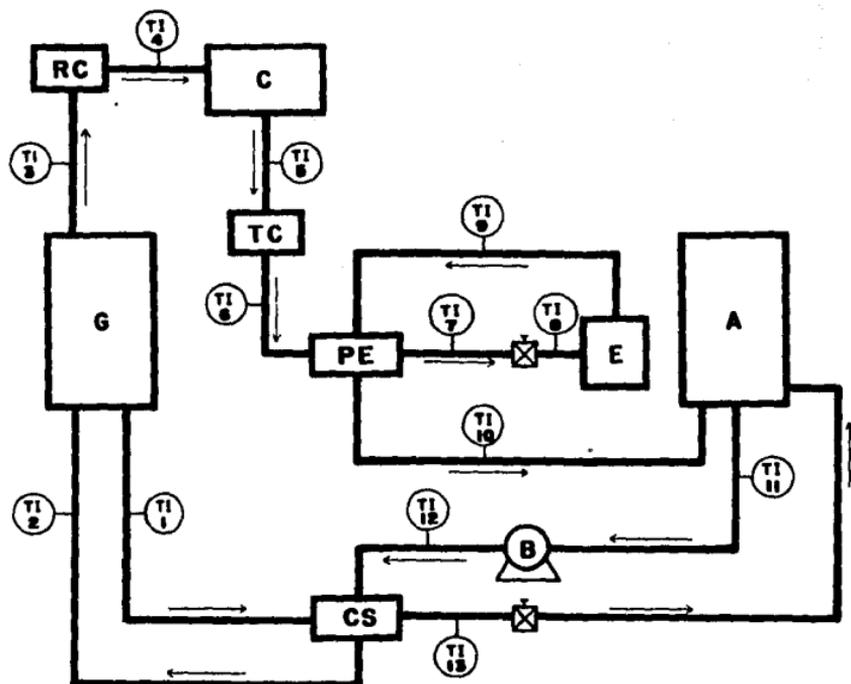


Fig. 2.1 Localización de los termopares de fierro-constantan.

Los de cobre-constantan se emplearon para las corrientes de agua de enfriamiento, aceite de calentamiento y en el serpentín del evaporador, ya que no presentan gran actividad corrosiva, su rango de temperaturas es 73.16 K a 873.16 K (-200 C a 600 C), que incluye las temperaturas de operación del sistema. En la Fig. 2.2 se indica la localización de estos termopares en el refrigerador.

Para medir la presión se utilizaron manómetros de tubo bourdon, debido a su fácil instalación, manejo y costo.

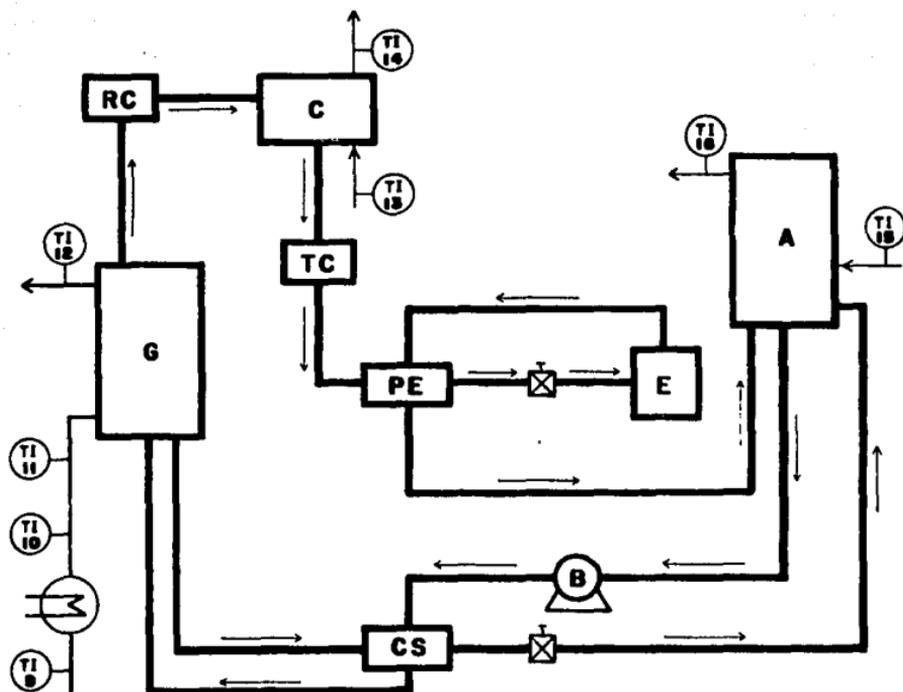


Fig. 2.2 Localización de los termopares de cobre-constantan.

Los manómetros instalados en el refrigerador son de acero inoxidable, para que resistan la corrosión que ocasionan el amoníaco y el agua. Se tienen dos manómetros para la zona de alta presión de 0 a 2.5325 MPa (0 a 25 atm) y dos manómetros para la zona de baja presión de 0 a 1.1142 MPa (0 a 10 atm). La localización de manómetros en el refrigerador se muestra en la Fig. 2.3.

Con respecto a la medición de flujo en el equipo se instalaron medidores rotatorios de caudal (rotámetros), debido a la economía, funcionalidad, durabilidad y fácil mantenimiento.

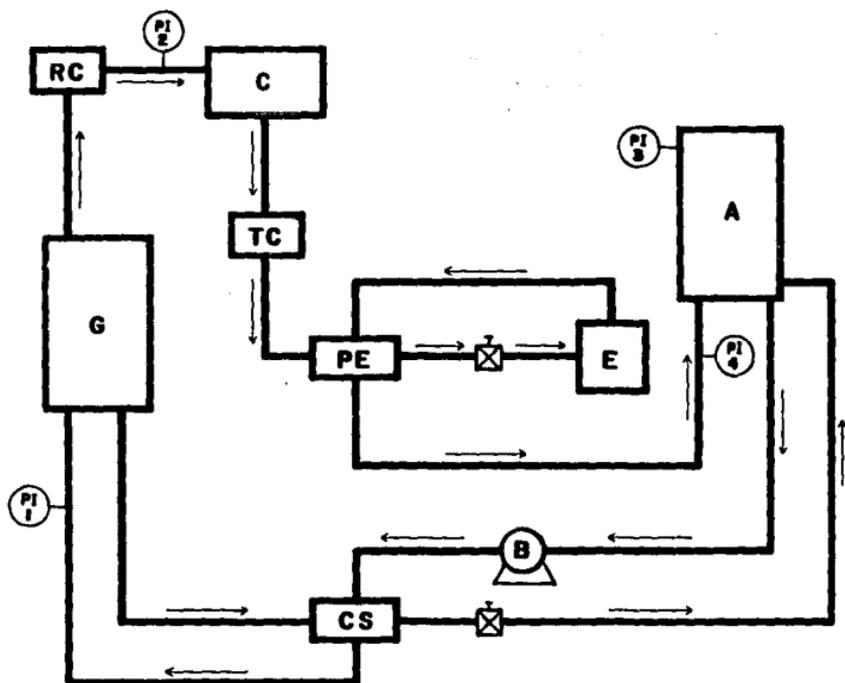


Fig. 2.3 Localización de los manómetros.

Se instalaron cuatro rotámetros, dos de ellos miden los flujos volumétricos de agua de enfriamiento, uno instalado en el condensador y otro en el absorbedor, otro mide el flujo volumétrico de aceite de calentamiento y el restante mide el flujo volumétrico de amoníaco que llega al evaporador. La Fig. 2.4 presenta un diagrama de localización de los rotámetros en el refrigerador.

La selección de los rotámetros se hizo considerando la sustancia a manejar, la cantidad a medir, la presión y la tempe-

ratura de trabajo.

En el Apéndice se presentan las calibraciones y las curvas de ajuste de los instrumentos.

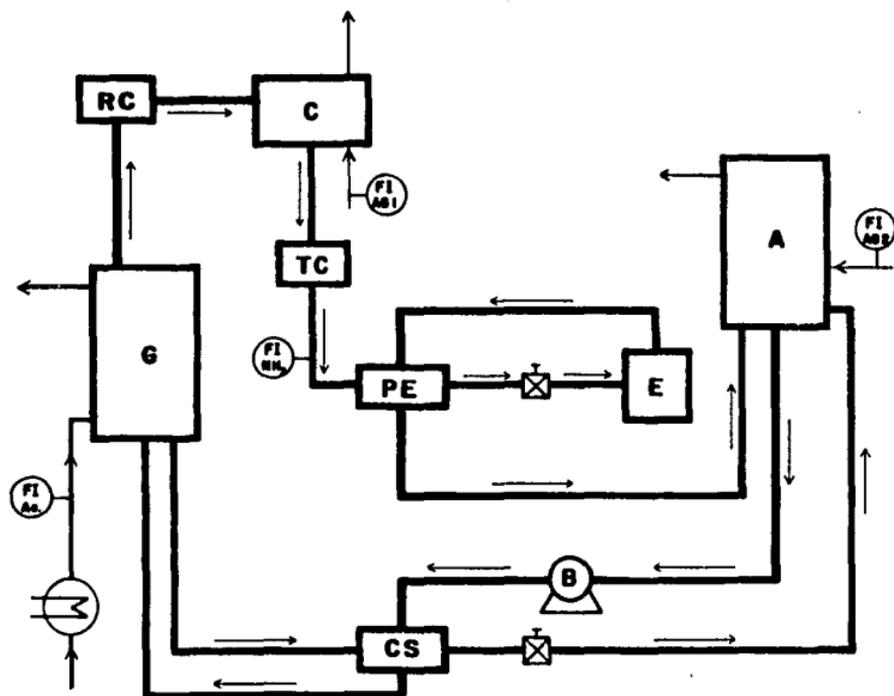


Fig. 2.4 Localización de los rotámetros.

2.2 PREPARACION DEL REFRIGERADOR.

Para empezar a trabajar con el sistema, ésto es, efectuar la primera corrida experimental, el equipo se preparó con dos o

tres días de anticipación. Inicialmente se lavó todo el equipo con agua eliminando partículas de gran tamaño que pudieran afectar o dañar a bombas o instrumentos de medición. Se extrajo totalmente el agua inyectando aire a presión. Posteriormente se hizo vacío con una bomba y la presión alcanzada se mantuvo por lo menos un día. Una vez que el sistema conservó su presión de vacío, quedó listo para la siguiente operación, la carga de soluciones.

Se preparó el equipo formando tres secciones independientes con ayuda de las válvulas, aislandose así el generador, el condensador y el absorbedor, como se aprecia en la Fig.2.5.

Se cargó el agua destilada necesaria para las soluciones diluida en el generador y concentrada en el absorbedor, con ayuda de un botellón calibrado previamente.

Se alimentó el amoniaco para formar las soluciones concentrada y diluida. Una cierta cantidad pesada de amoniaco puro se colocó en el tanque de condensados. Para esto último se utilizó un pequeño tanque que se llenó de amoniaco y se descargó en el condensador hasta completar la cantidad necesaria en el refrigerador.

Cuando el sistema estuvo cargado, se homogeneizaron las soluciones con una bomba y se fueron llenando paulatinamente las tuberías. Posteriormente el refrigerador quedó listo para efectuar la primera corrida.

Para llevar a cabo una corrida, inicialmente se prendió la resistencia de calentamiento del aceite, se dejó transcurrir el tiempo necesario para llevar el aceite a una temperatura mayor a

la de operación y se recirculó sin alimentarse al generador con el fin de uniformizarla.

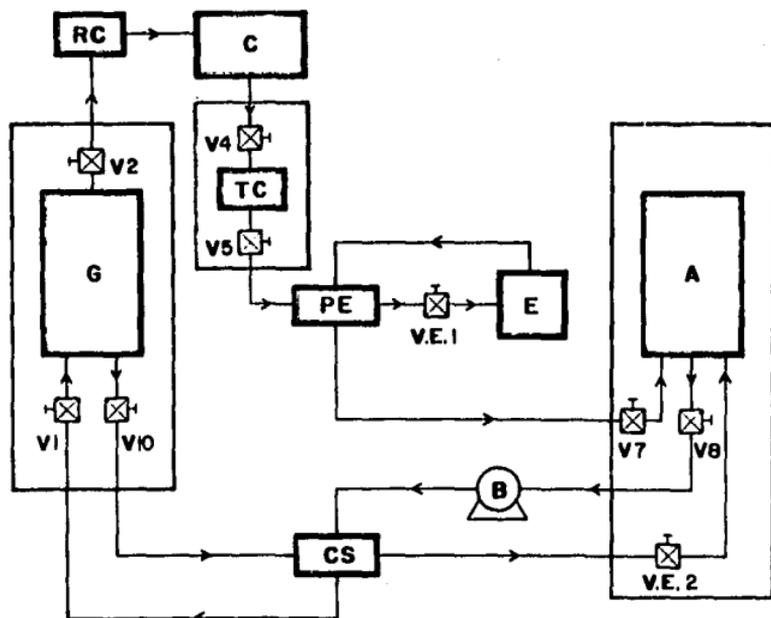


Fig. 2.5 Zonas para la carga de soluciones.

Cuando la temperatura del aceite fue aproximadamente de 423.16 K (150 C); se empezó a alimentar el flujo adecuado para mantener la temperatura de generación deseada durante el tiempo de operación.

Con el calentamiento la presión del generador se fue incrementando hasta llegar a 1.1143 MPa (10 atm), entonces se bombeó

solución concentrada al generador y se abrió al mismo tiempo la válvula de control de la solución diluida con el fin de mantener niveles constantes tanto en el generador como en el absorbedor.

Cuando la presión en el generador fue igual a la de operación se abrió la válvula de entrada al condensador. Se empezó a alimentar agua de enfriamiento, a un flujo menor al de operación para evitar un descenso brusco en la presión. Con esto se empezó a condensar el vapor de amoníaco y el líquido se colectó en el tanque de condensados, abriéndose la válvula de expansión 1, para mantener un nivel constante. Fue necesario alimentar un poco de agua de enfriamiento al absorbedor con el propósito de que no se incrementara la temperatura, ya que una temperatura más alta afecta la concentración final de la solución concentrada al igual que una temperatura menor hace que la presión en el absorbedor baje, pudiendo dejar de funcionar la bomba de solución inmediatamente.

Cuando se alcanzaron las presiones de operación, tanto en la zona de alta como de baja presión, se fueron aumentando los flujos hasta llegar a los de operación tanto en las corrientes de proceso como en las de servicio y se mantuvieron constantes los niveles de solución en el generador, tanque de condensados y absorbedor. Esta secuencia fue el inicio de una corrida, hasta llegar al régimen permanente del proceso.

Se revisaron las presiones y temperaturas de tal forma que no salieran de su rango de operación, en caso de suceder esto, se controlaron modificando flujos de soluciones y/o agua de enfriamiento, sin alterar los niveles existentes en los tanques.

2.3 REGISTRO DE DATOS

Se realizaron 15 corridas y debido a que las mediciones de las variables se hicieron en instrumentos no automatizados, las lecturas se registraron en hojas de datos como la que se muestra a continuación.

| | | HORA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | VARIABLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TERMOPARES DE FE-CONSTANTAN | | T ₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₇ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₈ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₉ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₀ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | TERMOPARES DE CU-CONSTANTAN | | T ₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₇ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₈ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₉ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₀ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T ₁₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T ₁₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PREISION | | P ₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | P ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | P ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | P ₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FLUJO | | Bomba | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Amolado | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Acetil | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Condensador | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Absorbedor | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VARIAC | | Amperaje | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Porcentaje | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

CAPITULO III

TERMODINAMICA DEL SISTEMA

Este capítulo trata sobre los procesos y el análisis termodinámico de los elementos del Refrigerador Continuo de Absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ del IIM; realizando para este fin balances de masa y energía que muestran el comportamiento de cada elemento y el global del refrigerador.

3.1 CONSIDERACIONES.

Para poder efectuar los balances de masa y energía a partir de las variables registradas es necesario hacer las siguientes suposiciones:

- 1) Equilibrio termodinámico de la mezcla $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ en cualquier punto.
- 2) Estados de saturación para las salidas del generador y absorbedor.
- 3) Comportamiento de la mezcla como sustancia simple compresible.

El equilibrio termodinámico considera que todas las corrientes involucradas en el proceso satisfacen el equilibrio pudiéndose emplear las tablas de propiedades termodinámicas.

Los estados de saturación para las salidas del generador y absorbedor se obtienen de las tablas de propiedades termodinámicas, conocidas la presión y la temperatura. Los estados de subenfriamiento y sobrecalentamiento se determinan a través de los estados de saturación, bajo la consideración que la mezcla se comporta como una sustancia simple compresible.

La capacidad calorífica de una sustancia simple compresible se define como:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P \quad (3.1)$$

considerando que el líquido subenfriado y el vapor sobrecalentado lo son, deben cumplir:

$$h = h(T, P) \quad (3.2)$$

$$dh = C_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP$$

si el cambio de P es mínimo o despreciable, la ecuación queda así:

$$dh = C_p dT \quad (3.3)$$

integrando y considerando al C_p constante:

$$h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

Por lo que h tiene un comportamiento lineal, dado por:

$$h_1 = h'_1 + C_p T_1 \quad (3.5)$$

De esta forma al conocer dos estados termodinámicos, se determina el calor específico de la ecuación (3.4)

$$C_p = (h_2 - h_1) / (T_2 - T_1)$$

y cualquier entalpía de la ecuación (3.5)

$$h'_1 = h_1 - C_p T_1$$

Para conocer los estados de subenfriamiento se hace uso de las ecuaciones (3.4) y (3.5), donde los estados 1 y 2 son de saturación y deben estar muy cercanos para que $dP \approx 0$.

Para la densidad del líquido saturado, se emplea la siguiente correlación:

$$\rho = \rho(C, T)$$

Debido a que los estados de subenfriamiento no están muy alejados de la saturación, se emplea ésta.

3.2 BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA.

Las ecuaciones de balance de masa empleadas para la mezcla amoniaco-agua son:

$$\Sigma Ms - \Sigma Me = 0 \quad (3.6)$$

$$\Sigma Cs Ms - \Sigma Ce Me = 0 \quad (3.7)$$

la de balance de energia es

$$We + Qe + \Sigma Me \cdot he = \Sigma Ms \cdot hs + Qs \quad (3.8)$$

la del medio de calentamiento o enfriamiento es:

$$Q = M Cp (Ts - Te) \quad (3.9)$$

la de la eficiencia en cada elemento es:

$$\eta = (Qt / Qr) \quad (3.10)$$

3.3 PROCESOS TERMODINAMICOS EN EL REFRIGERADOR CONTINUO.

3.3.1 Generador

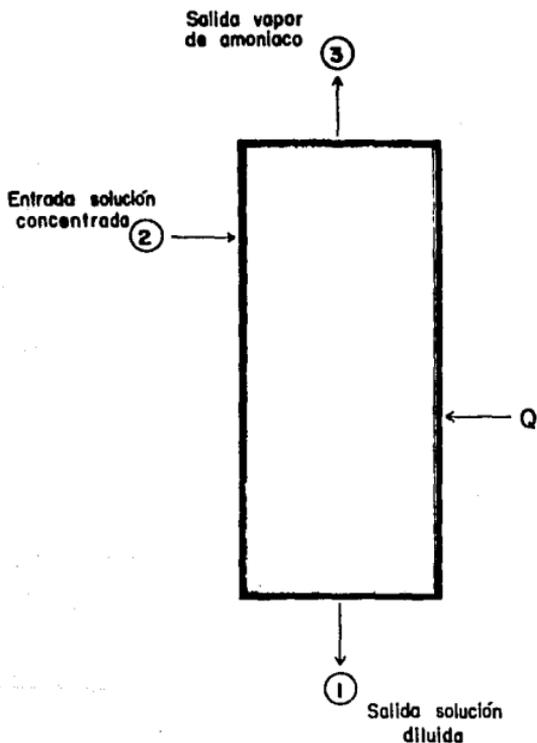


Fig. 3.1 Corrientes en el generador.

En este elemento primero se lleva a cabo un proceso de separación, como se muestra en la Fig.3.1. A presión constante de 1.1143 MPa (11 atm). Se alimenta solución concentrada, subenfria-

da y concentración de 0.48. Se generan dos corrientes: una de solución diluida saturada con una concentración de 0.40 y la otra de vapor saturado con una concentración de 0.98.

En la Fig.3.2 se presenta el proceso de separación en el generador. La entrada de la solución concentrada corresponde al punto 2, se localiza con la concentración y la temperatura de alimentación, que al recibir calor del aceite eleva su temperatura hasta la temperatura de generación. A esta temperatura se separan dos fases, una de vapor localizada en el punto 3 y otra de líquido en el punto 1, que corresponden a los extremos de la línea de equilibrio de la mezcla inicial.

El segundo proceso que se lleva a cabo en el generador es el de rectificación, en donde por un lado entra vapor saturado a una temperatura de 358.16 K (85 C) junto con solución concentrada subenfriada a una concentración de 0.48. y por otro lado sale vapor saturado a una concentración de 0.99. En la Fig.3.4 se muestra un proceso de rectificación similar al que se lleva a cabo en el generador.

Las ecuaciones usadas para determinar la eficiencia térmica del generador en el primer proceso son:

Balance de materia: Ecuaciones (3.6) y (3.7)

Balance de energía: Ecuación (3.8)

Las ecuaciones empleadas para determinar las condiciones de intercambio en el segundo proceso son:

Balance de materia: Ecuaciones (3.6) y (3.7)

Balance de energía: Ecuación (3.8)

Balance de energía del medio de calentamiento: Ecuación (3.9)

Eficiencia en el generador: Ecuación (3.10)

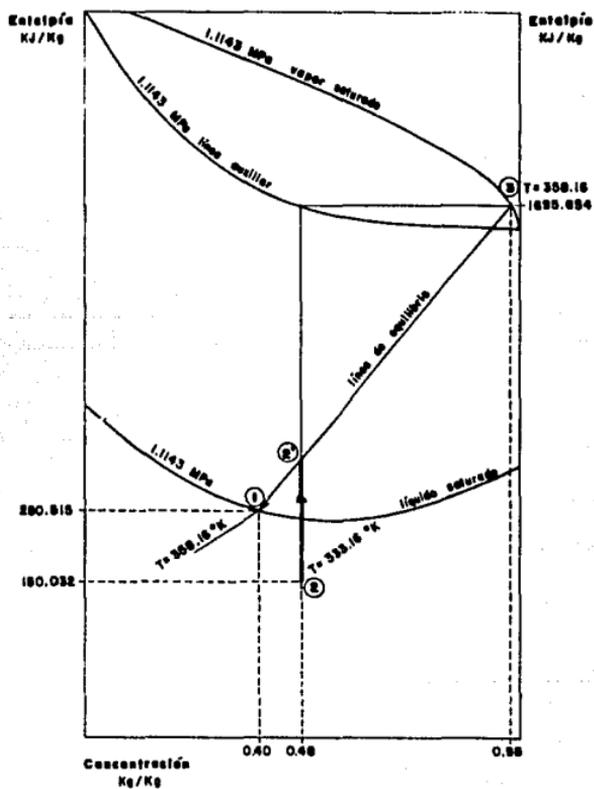


Fig. 3.2 Proceso de generación en el diagrama H-C.

A continuación se presenta el desarrollo matemático para la evaluación del generador.

Experimentalmente se conocen la temperatura y la presión de las corrientes 1, 2 y 3, también se conoce la masa de solución concentrada (M2). Por otro lado, de los balances realizados en el Rectificador con Convección Natural de Aire, se evalúa el valor de la masa de amoníaco generado (M3). Con la temperatura y presión se calculan las entalpías y concentraciones de las corrientes, utilizando las subrutinas para entalpías del Capítulo IV.

Para determinar la masa de solución diluida (M1), se usa la ec. (3.6)

$$M1 = M2 - M3$$

Hasta este momento se tienen conocidos los valores de todas las masas y todas las entalpías, por lo que se puede realizar el balance de energía para determinar el calor teórico agregado en el generador, utilizando la ec. (3.8)

$$Q_t = (M1 \cdot h_1) + (M3 \cdot h_3) - (M2 \cdot h_2)$$

Con respecto al sistema de calentamiento, se conocen las temperaturas de entrada y salida y la masa del aceite, por lo tanto de la ec. (3.9) se calcula el calor real cedido.

$$Q_r = M \cdot C_p (T_s - T_e)$$

Finalmente se determina la eficiencia del generador con la ec. (3.10)

$$\eta = (Q_t / Q_r)$$

Nota: Cada uno de los elementos restantes se evaluaron siguiendo un desarrollo similar al descrito anteriormente.

3.3.2 Rectificador con Convección Natural de Aire

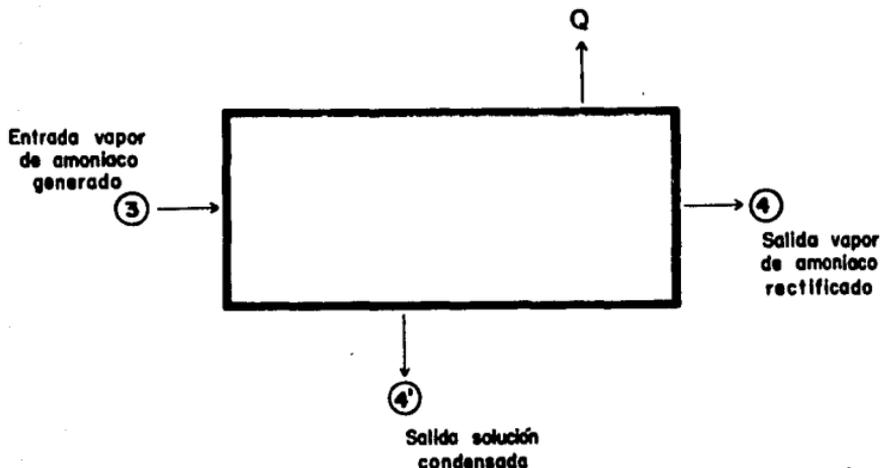


Fig. 3.3 Corrientes en el Rectificador con Convección Natural de aire.

A este elemento entra el vapor de amoniaco saturado y agua y sale vapor de amoniaco saturado casi puro. La operación se efectúa a presión constante de 1.1143 MPa (11 atm), como se muestra en la Fig.3.2.

La finalidad de este equipo junto con el rectificador del generador es mejorar la calidad del vapor de amoniaco generado, esto se logra porque el vapor cede calor al ambiente y se condensa una mezcla con alta concentración de absorbente.

En la Fig.3.4 se presenta el punto 3, que corresponde al vapor producido en el generador, se disminuye su temperatura hasta 313.16 K (40 °C) aquí se separan dos fases, una de líquido en la condición 4' y otra de vapor en la condición 4. La masa de la corriente 4' es menor con respecto a la 4, sin embargo es suficiente para mejorar la calidad del vapor rectificado.

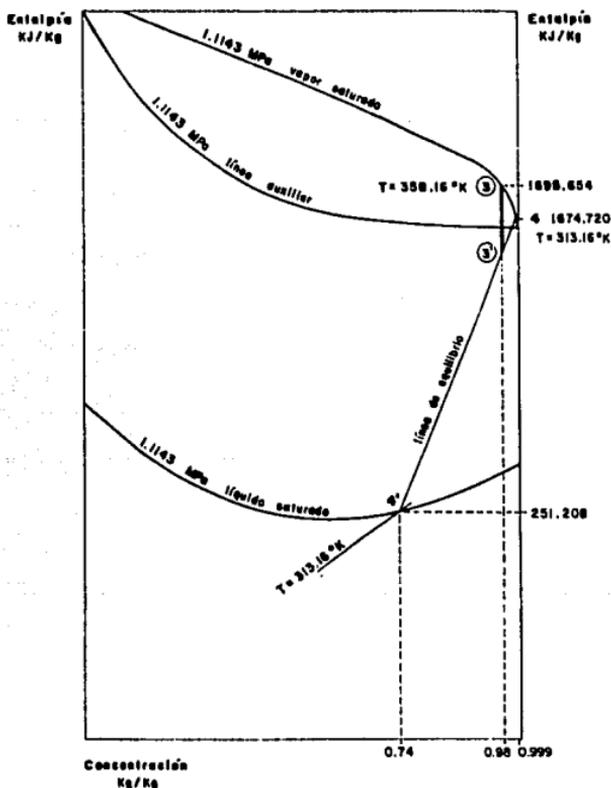


Fig. 3.4 Proceso de rectificación en el diagrama H-C.

Las ecuaciones empleadas para conocer el comportamiento global del Rectificador con Convección Natural de Aire son:

Balance de materia: Ecuaciones (3.6) y (3.7)

Balance de energía: Ecuación (3.8)

3.3.3 Condensador

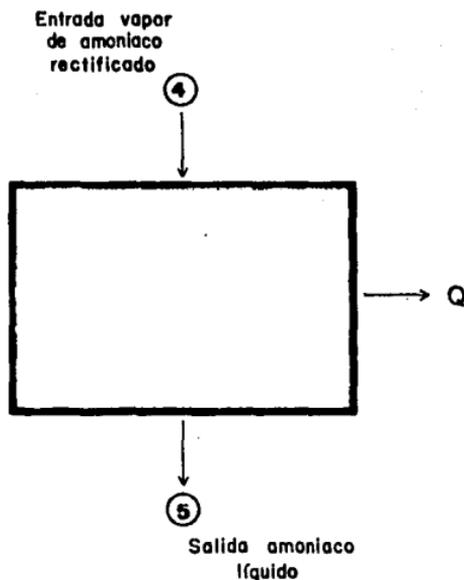


Fig. 3.5 Corrientes en el Condensador.

La operación en esta parte se efectúa a presión constante de 1.1143 MPa (11 atm), ocurriendo el cambio de fase del vapor de amoníaco saturado casi puro a líquido saturado, cediendo calor al

agua de enfriamiento. En la Fig.3.5 se muestran las corrientes involucradas en este proceso.

En la Fig.3.6 se muestra el proceso de condensación, en donde la condición 4 corresponde a la salida del rectificador de aire y en el proceso se disminuye su temperatura a presión y concentración constantes, ocurriendo un cambio de fase localizado en el punto 5, en este momento se tiene líquido saturado.

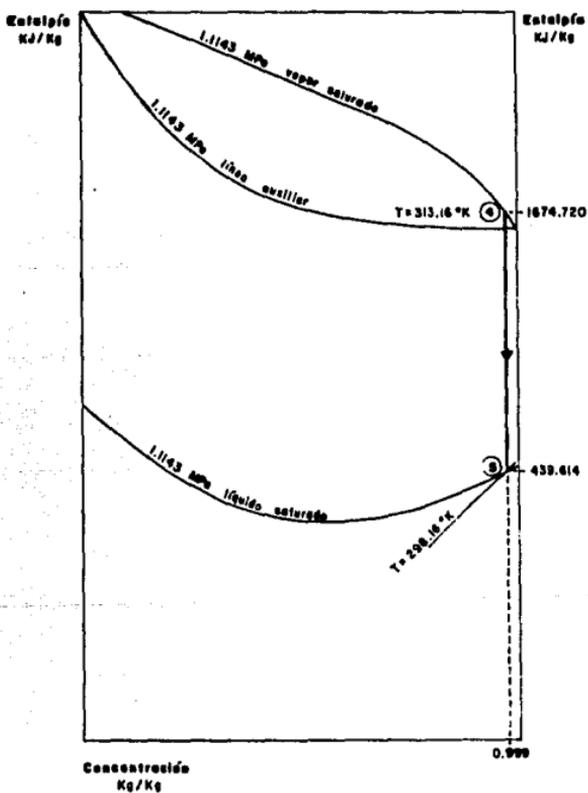


Fig. 3.6 Proceso de condensación en el diagrama H-C.

Las ecuaciones empleadas para conocer el comportamiento del condensador son:

Balace de energia: Ecuación (3.8)

Balace de energia del medio de enfriamiento: Ecuación (3.9)

Eficiencia en el condensador: Ecuación (3.10)

3.3.4 Preenfriador

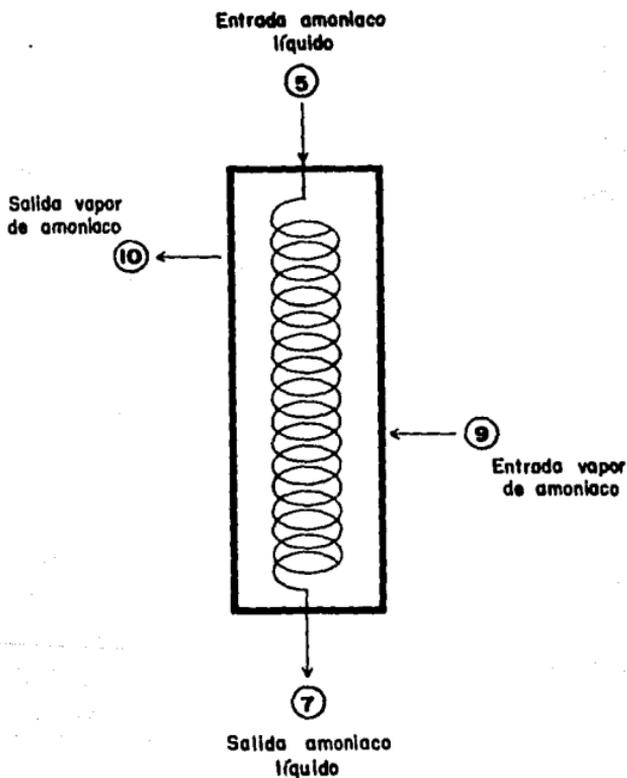


Fig. 3.7 Corrientes en el Preenfriador.

Este cambiador de calor tiene como función enfriar el amoníaco que proviene del condensador, saliendo como líquido subenfriado de un proceso a presión constante de 1.1143 MPa (11 atm), para aumentar la eficiencia de evaporación. Por otro lado, el

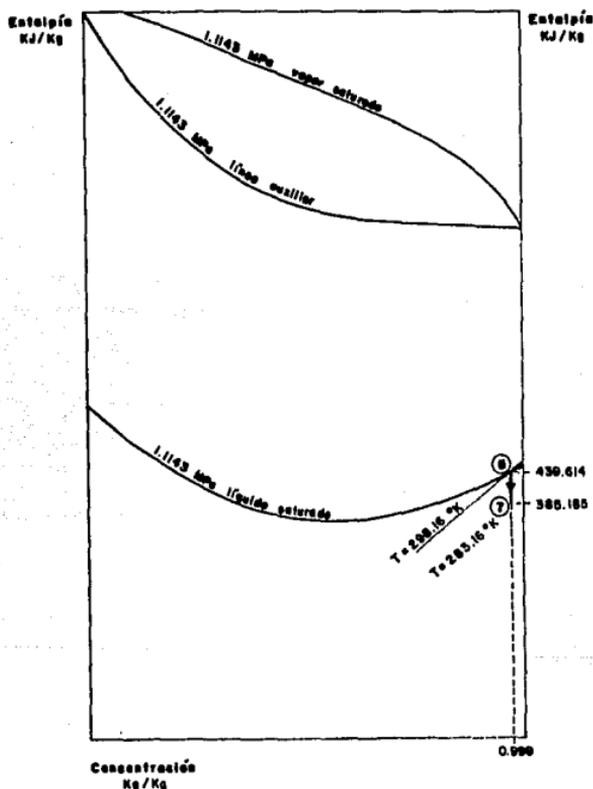


Fig. 3.8 Proceso de enfriamiento del amoníaco líquido en el diagrama H-C.

vapor de amoníaco saturado proveniente del evaporador se calienta con el calor cedido por la otra corriente, resultando un vapor sobrecalentado en un proceso a presión constante de 0.3039 MPa (3 atm). La Fig.3.7 presenta las corrientes involucradas.

En la Fig.3.8 se representa el proceso de enfriamiento del

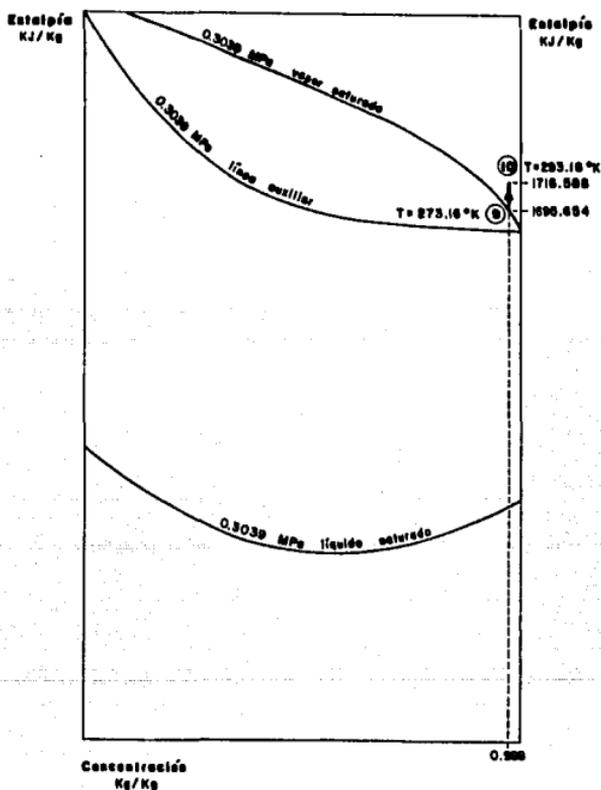


Fig. 3.9 Proceso de calentamiento del amoníaco vapor en el diagrama H-C.

amoníaco líquido, el punto 5 corresponde a la salida del amoníaco líquido del condensador, al cual se disminuye la temperatura a presión y concentración constantes alcanzando el estado 7.

La Fig.3.9 indica el proceso de calentamiento del amoníaco vapor. El punto 9 corresponde a la salida del amoníaco vapor del evaporador, al que se aumenta la temperatura a presión y concentración constantes alcanzando el punto de sobrecalentamiento 10.

Las ecuaciones para encontrar la eficiencia térmica son:

Balace de energía: Ecuación (3.8)

Eficiencia en el preenfriador: Ecuación (3.10)

3.3.5 Válvula de Expansión del Amoníaco

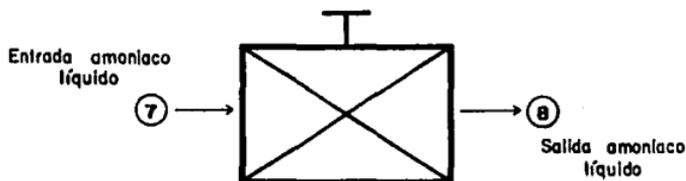


Fig. 3.10 Corrientes en la Válvula de Expansión del amoníaco.

En este dispositivo se lleva a cabo un proceso de expansión isoentálpico, donde entra amoníaco líquido subenfriado a presión de 1.1143 MPa (11 atm) y sale con la misma calidad a presión de 0.3039 MPa (3 atm), divide al sistema en dos zonas de presión. La Fig.3.10 presenta las corrientes involucradas en el proceso.

En la Fig.3.11 se representa el proceso de expansión del amoníaco. El punto 7 corresponde a la salida de amoníaco líquido del preenfriador, se disminuye su presión, manteniendo la entalpía constante, alcanzando el punto 8, que puede ser de subenfriamiento, saturación o mezcla.

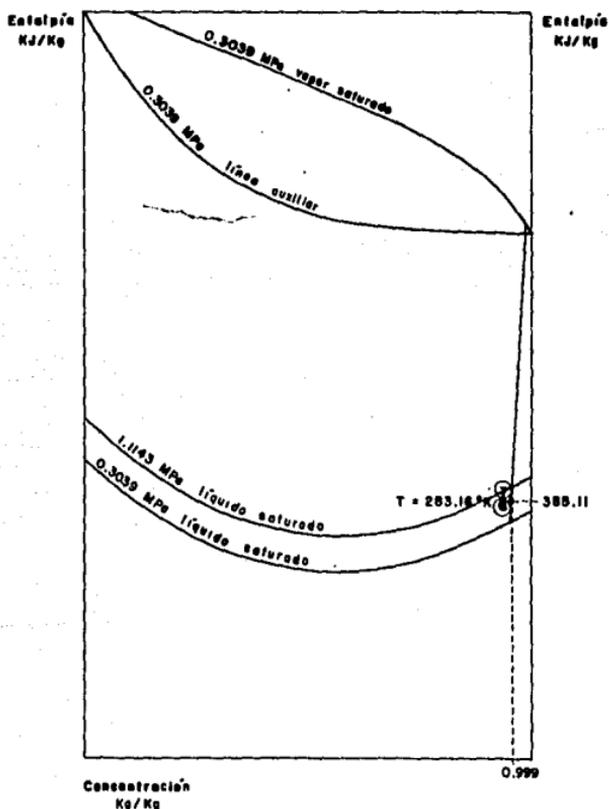


Fig. 3.11 Proceso isoentálpico en el diagrama H-C.

La ecuación para conocer el comportamiento de la válvula de expansión es la siguiente:

Balance de energía: Ecuación (3.8)

3.3.6 Evaporador

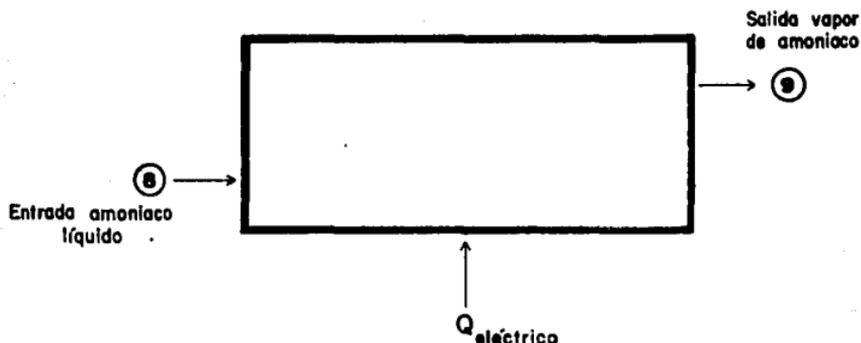


Fig. 3.12 Corrientes en el Evaporador.

En este equipo se realiza un cambio de fase, entra amoníaco líquido o con vapor y sale vapor de amoníaco a presión constante de 0.3039 MPa (3 atm), se suministra calor del exterior por medio de una resistencia eléctrica para llevar a cabo el cambio de fase. La Fig.3.12 muestra las corrientes involucradas en este proceso.

En la Fig.3.13 se representa el proceso de evaporación del amoníaco. El punto 8 corresponde a la salida de amoníaco líquido de la válvula de expansión, y debido al cambio de fase a presión y concentración constantes, se alcanza el punto 9, que dependiendo de la temperatura puede ser mezcla, saturación o sobrecalentado.

tamiento.

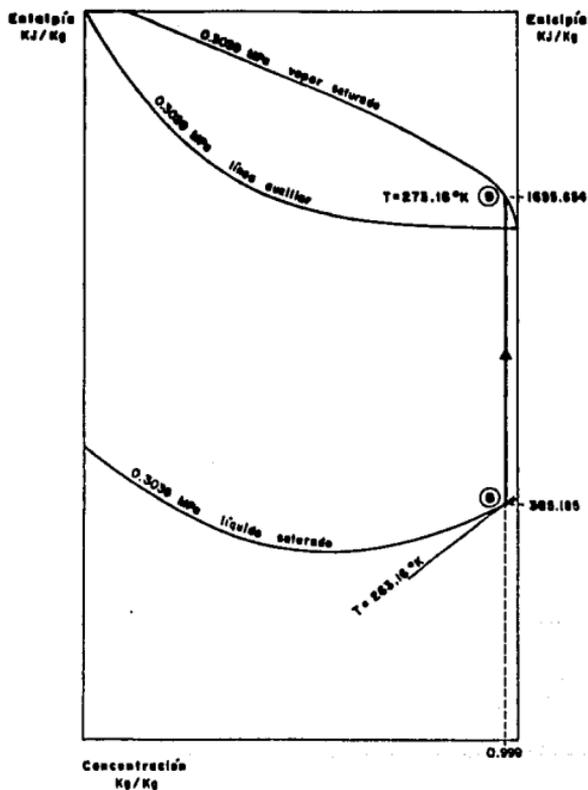


Fig. 3.13 Proceso de evaporación en el diagrama H-C.

Las ecuaciones utilizadas para conocer el comportamiento del evaporador son:

Balance de energía: Ecuación (3.8)

Balance del medio ambiente: $Q = RI^2$
Eficiencia en el evaporador: Ecuación (3.10)

donde

Q es el calor disipado por la resistencia eléctrica,
 R es la resistencia Ohm
 I es la intensidad de corriente. Ampere

3.3.7 Absorbedor

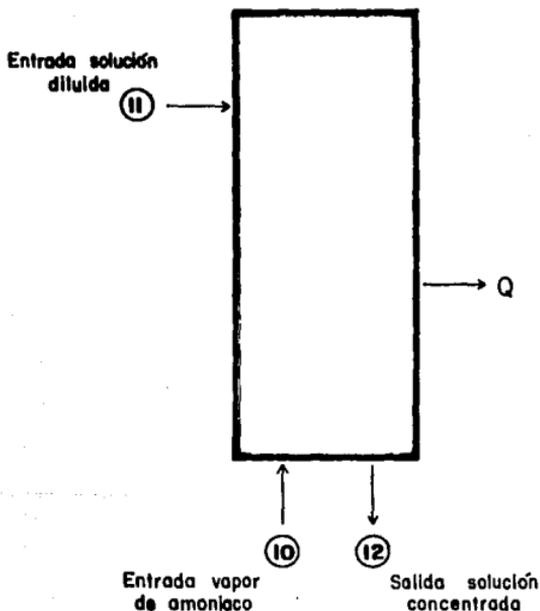


Fig. 3.14 Corrientes del Absorbedor.

En esta parte se efectúa un proceso de mezcla, como indica la Fig.3.14 al absorberse el vapor de amoniaco sobrecalentado en la solución diluida, forma la solución concentrada este proceso se realiza a presión constante de 0.3039 MPa (3 atm). La reacción es exotérmica, y se transfiere el calor al agua de enfriamiento.

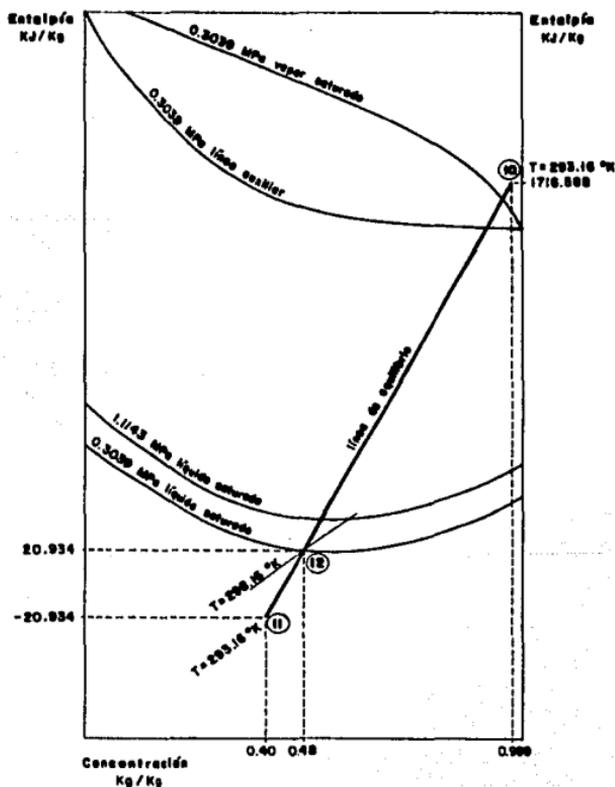


Fig. 3.15 Proceso de absorción en el diagrama H-C.

En la Fig.3.15 se representa el proceso de absorción. El punto 11 corresponde a la solución diluida proveniente del cambiador de solución y el punto 10 corresponde al vapor de amoniaco proveniente del preenfriador. Estas dos corrientes se mezclan formando la solución concentrada indicada en el punto 12.

Las ecuaciones empleadas para conocer el comportamiento del absorbedor son:

Balace de materia: Ecuaciones (3.6) y (3.7)

Balace de energía: Ecuación (3.8)

Balace del medio de enfriamiento: Ecuación (3.9)

Eficiencia en el absorbedor: Ecuación (3.10)

3.3.8 Válvula de Expansión

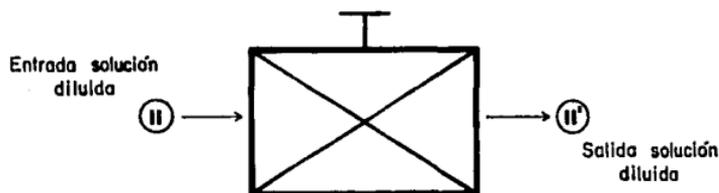


Fig. 3.16 Corrientes en la Válvula de Expansión.

En este dispositivo se realiza un proceso de expansión isoentálpico, donde entra solución diluida (líquido subenfriado) a presión de 1.1143 MPa (11 atm) y sale a presión de 0.3039 MPa (3 atm). Divide al sistema en dos zonas de presión. La Fig.3.16 indica las corrientes involucradas en este proceso.

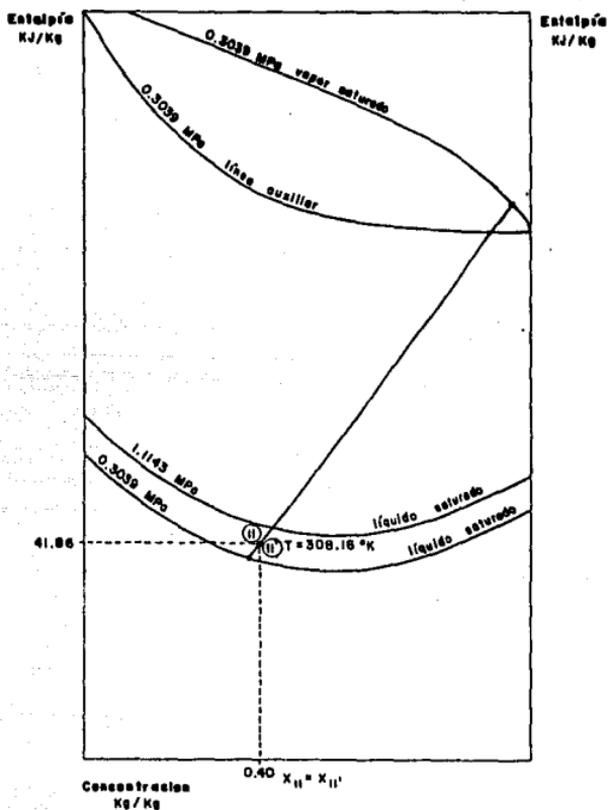


Fig. 3.17 Proceso isentálpico en el diagrama H-C.

En la Fig.3.17 se representa el proceso isentálpico de la válvula de expansión. El punto II corresponde a la salida de solución diluida del cambiador de solución, se disminuye su presión a entalpía constante, alcanzando el punto II'.

La ecuación para conocer el comportamiento de la válvula de expansión es:

Balance de energía: Ecuación (3.8)

3.3.9 Bomba

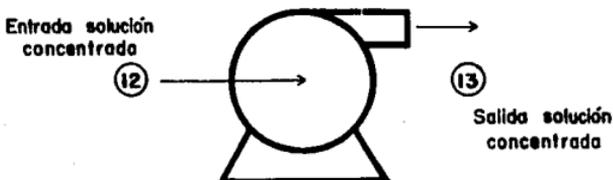


Fig. 3.18 Corrientes en la Bomba.

A este dispositivo entra solución concentrada a 0.3039 MPa (3 atm) proveniente del absorbedor, por medio de trabajo mecánico se eleva la presión a 1.1143 MPa (11 atm) y la envía al generador. Este proceso se realiza propiamente a temperatura constante y se indican las corrientes involucradas en la Fig.3.18.

En la Fig.3.19 se representa este proceso. El punto 12 corresponde a la salida de solución concentrada del absorbedor, a concentración constante se aumenta su presión alcanzando el punto 13.

La ecuación planteada para encontrar el comportamiento de la bomba es:

Balance de energía: Ecuación (3.8)

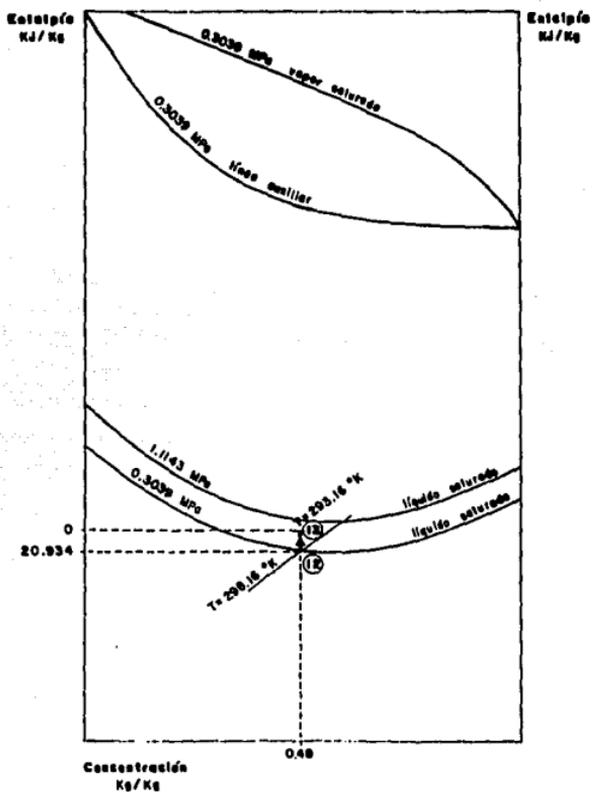


Fig. 3.19 Proceso de compresión de la bomba en el diagrama H-C.

3.3.10 Cambiador de Calor de Solución

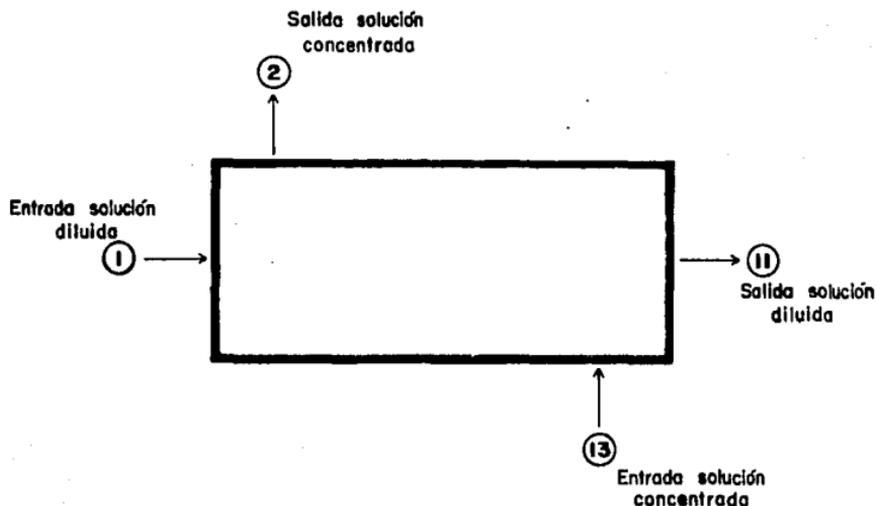


Fig. 3.20 Corrientes en el Cambiador de Calor de Solución.

La función de este cambiador de calor es aumentar la temperatura de la solución concentrada que entra al generador, y a su vez disminuir la de la solución diluida que sale del mismo, es un proceso a presión constante de 1.1143 MPa (11 atm). La Fig.3.20 indica las corrientes involucradas en este proceso.

En la Fig.3.21 se presenta el proceso de calentamiento, donde el punto 13 corresponde a la salida de solución concentrada de la bomba, a presión y concentración constantes, se eleva su temperatura hasta alcanzar el punto 2.

En la Fig.3.22 se representa el proceso de enfriamiento,

donde el punto 1 corresponde a la salida de solución diluida del generador, a presión y concentración constantes se disminuye su temperatura, alcanzando el punto 11.

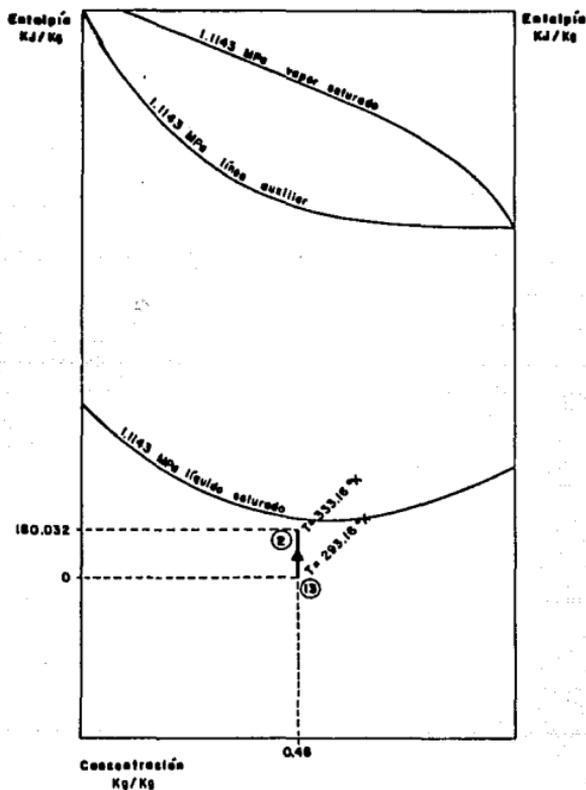


Fig. 3.21 Proceso de calentamiento de la solución concentrada en el diagrama H-C.

Las ecuaciones para conocer el comportamiento del cambiador de calor son:

Balace de energia: Ecuación (3.8)

Eficiencia en el cambiador de calor: Ecuación (3.10)

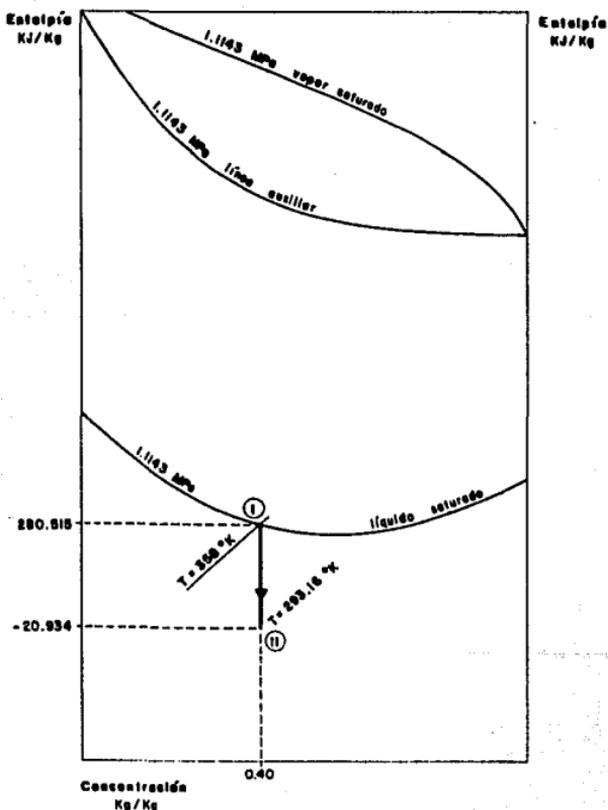


Fig. 3.22 Proceso de enfriamiento de la solución diluida en el diagrama H-C.

Una vez realizados los balances de cada uno de los elementos, es necesario conocer la eficiencia del refrigerador (η), la cual indica el comportamiento del sistema y está en relación a la energía transferida, de acuerdo al objetivo del sistema, y de la energía que se le suministra, definiéndose de la siguiente forma:

$$\eta = Q_{\text{evaporador}} / (Q_{\text{generador}} + W_{\text{bomba}})$$

También es necesario calcular la relación de flujo (RF), ya que este parámetro es una razón que indica la cantidad de refrigerante que se puede aprovechar para obtener enfriamiento útil durante el proceso, esta dado por la ecuación siguiente:

$$RF = M_{\text{sol. concentrada}} / M_{\text{amoníaco evaporado}}$$

CAPITULO IV

PROGRAMA DE COMPUTADORA

En este capítulo se especifica el objetivo y estructura del programa de computadora desarrollado para evaluar el Refrigerador Continuo de Absorción de NH₃-H₂O del IIM.

3 2

4.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.

Ya que el objetivo del presente trabajo es evaluar el Refrigerador Continuo de Absorción de NH₃-H₂O del IIM, y debido a que durante el periodo de operación la generación de datos es grande y la cantidad de información manipulada se incrementa con las propiedades requeridas para el análisis termodinámico de cada elemento y el global, surge la necesidad de crear un programa de computadora que realice esta actividad repetitiva con el fin de emplear menos tiempo.

El programa se desarrolló en lenguaje BASIC y está integrado por 4 módulos. El primero corresponde al programa principal, el cual toma información del archivo que contiene los datos registrados experimentalmente de la corrida que se va a analizar, indica la configuración del sistema y calcula la eficiencia global y la relación de flujo, creando un archivo con los resultados experimentales y un listado de éstos.

El segundo módulo, subrutinas de los elementos, recibe los datos experimentales del programa principal y realiza los balances de masa y energía para cada elemento y calcula su eficiencia.

El tercer módulo, subrutinas para entalpías, recibe del módulo 2 las presiones y temperaturas necesarias para calcular las entalpías y concentraciones de subenfriamiento, sobrecalentamiento, mezcla o saturación.

El cuarto módulo, subrutinas de las propiedades termodinámicas, recibe del módulo 3 las presiones, temperaturas y/o concentraciones para calcular las propiedades termodinámicas de saturación.

La Fig.4.1 muestra la estructura del programa.

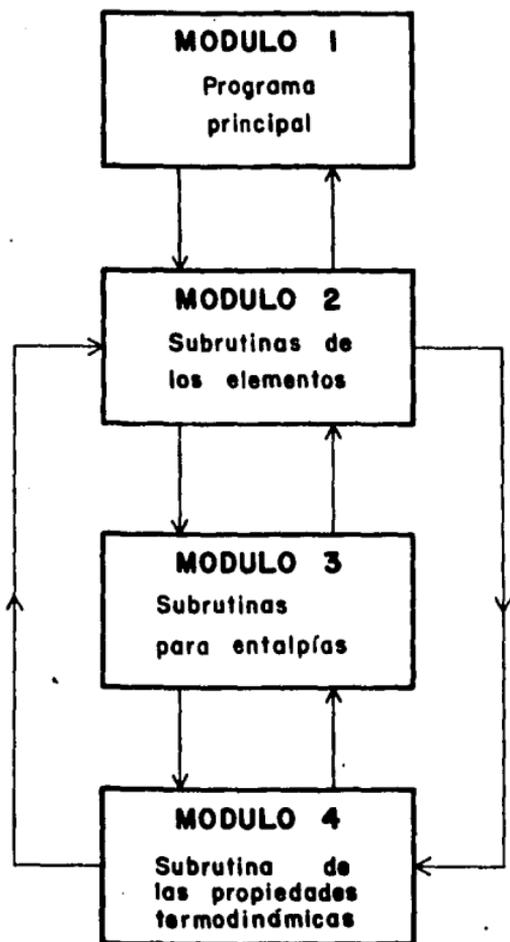


Fig. 4.1 Estructura del programa.

4.2 PROGRAMA PARA LA CREACION DE ARCHIVOS.

Se crearon archivos de datos experimentales con el fin de tener acceso fácil y directo a la información almacenada durante el análisis de resultados.

En los archivos se tienen almacenados los datos de las 15 corridas experimentales efectuadas para la evaluación. Cada archivo contiene la información de una corrida (temperaturas, presiones y flujos) que duró 3 horas, con registros a intervalos de 15 minutos, de tal manera que se tienen 12 grupos de datos y en cada uno se tomaron 21 temperaturas, 4 presiones y 4 flujos. La Fig.4.2 muestra el diagrama de flujo del programa para crear archivos.

El programa de creación de archivos recibe los datos tal como se llevaron durante la experimentación; los modifica de acuerdo a las ecuaciones de calibración de termopares, manómetros y rotámetros del Apéndice, realiza las conversiones de unidades y los almacena.

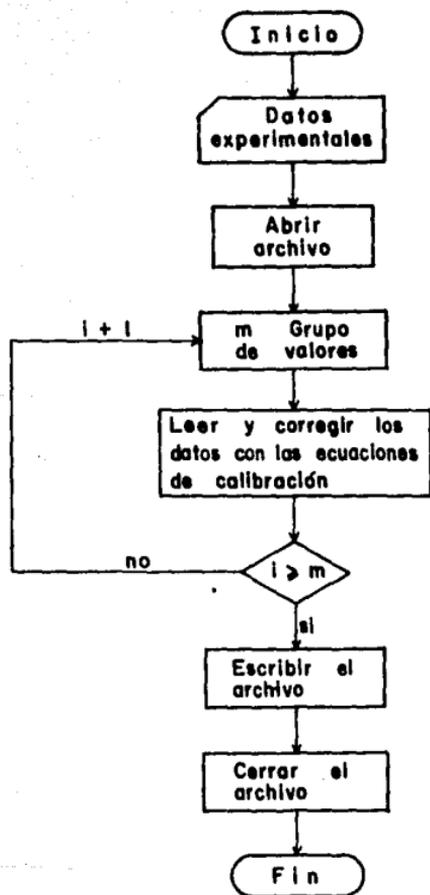


Fig. 4.2 Diagrama de flujo del programa para crear archivos.

4.3 MODULO 4: SUBROUTINAS DE LAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS.

Este módulo cuenta con seis subrutinas (2) y (3) para estados de saturación. calculan temperatura, presión, concentración de vapor, concentración de líquido, entalpía de vapor, entalpía de líquido y densidad de líquido para estados de saturación, las primeras cinco subrutinas son producto del trabajo realizado por el Dr. Kim Dao y sus colaboradores en el Laboratorio de Lawrence Berkeley, E.U.A. y la restante fue elaborada por personal del IIM, México. A continuación se presentan las subrutinas indicadas.

1.- La temperatura de saturación (Tv), como función de la concentración del líquido y de la presión, para presiones de 0.1013 a 3.4456 MPa (1 a 500 psia).

2.- La concentración del vapor (Cv), como función de la concentración del líquido y de la temperatura.

3.- La entalpía del vapor (Hv), como función de la temperatura y la concentración del líquido, para temperaturas entre 222.05 y 516.49 K (-60 y 470 F).

4.- La entalpía del líquido (Hl), como función de la concentración del líquido y de la temperatura, para temperaturas entre 222.05 y 516.49 K (-60 y 470 F).

5.- La presión de saturación (P), como función de la concentración del líquido y de la temperatura y la concentración del líquido (Cl), como función de la temperatura y la presión para presiones de 0.1013 a 3.4456 MPa (1 a 500 psia).

6.- La densidad del liquido saturado (ρ), como función de la concentración del liquido y de la temperatura.

Como ejemplo de estas subrutinas, se presenta el listado de la primera.

SUBROUTINA 1

```
10 REM SUBROUTINA QUE CALCULA LA TEMPERATURA DE SATURA-
20 REM CION (F). PARA PRESIONES ENTRE 1 Y 500 PSIA.
30 REM
40 REM
50 REM OBTENIDA DEL LAWRENCE BERKELEY LABORATORY EN UN
60 REM INTERCAMBIO DE INFORMACION CON EL DR. KIM DAO.
70 REM XX = CONCENTRACION DE AMONIACO EN LA MEZCLA (wt%)
80 REM PP = PRESION DE SATURACION (PSIA)
90 REM FT = TEMPERATURA DE SATURACION (F)
100 REM
110 REM
120 INPUT "CUALES SON LOS VALORES DE LA PRESION Y LA CONCENTRACION "; PP, XX
130 N = INT(4.99*XX+1)
140 X1=(2*N-1)/10
150 PPP=LOG(PP/250)
160 ON N GOTO 170, 190, 220, 250, 280
170 A=(3530.49+375.123*PPP)/(8.805062-PPP)
180 B=(3173.5665+465.258*PPP)/(9.072262-PPP)
190 C=(2467.315+420.219*PPP)/(8.181648-PPP)
200 IF N=1 THEN 320
210 B=(2155.2678+434.8823*PPP)/(8.405732-PPP)
220 A=(1727.3531+414.1704*PPP)/(7.944114-PPP)
230 IF N=2 THEN 320
240 B=(1404.8781+410.5236*PPP)/(7.599317-PPP)
250 C=(1234.3034+430.0346*PPP)/(7.766754-PPP)
260 IF N=3 THEN 320
270 B=(1025.3268+400.2729*PPP)/(7.28901-PPP)
280 A=(941.5864+401.6243*PPP)/(7.370678-PPP)
290 IF N=4 THEN 320
300 B=(879.6544+399.6774*PPP)/(7.441229-PPP)
310 C=(865.9878+410.998*PPP)/(7.816367-PPP)
320 A1=(A+C-2*B)/0.02
330 B1=(A-C)*(-1)^N/0.2-2*A1*X1
340 C1=B-(A1*X1+B1)*X1
350 FT=(A1*XX+B1)*XX+C1
360 PRINT "T=";FT
370 END
```

4.4 MODULO 3: SUBRUTINAS PARA ENTALPIAS.

Este módulo tiene tres subrutinas para calcular la entalpia, recibe del módulo 2 los datos necesarios (presiones y temperaturas) para calcular las propiedades termodinámicas. Los diagramas de flujo se presentan en las Figs.4.3 a 4.5.

La primera, subrutina A1, inicialmente calcula la concentración del liquido en función de la temperatura y la presión, utilizando para esto la subrutina 5 del módulo 4, posteriormente con la concentración calculada y la temperatura evalua la entalpia para liquido saturado, utilizando la subrutina 4 del módulo 4.

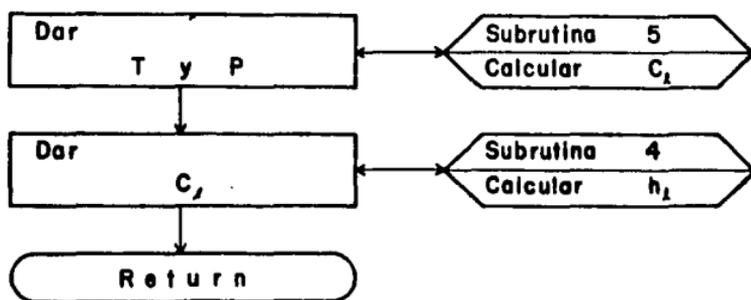


Fig. 4.3 Diagrama de flujo del cálculo de entalpia de liquido saturado. Subrutina A1.

La segunda, subrutina A2, primero calcula la concentración del líquido con ayuda de la subrutina 5 del módulo 4. en función de la temperatura y la presión; posteriormente con la subrutina 2 del módulo 4 calcula la concentración del vapor en función de la concentración del líquido calculada y la temperatura. finalmente con la concentración del vapor calculada y la temperatura evalúa la entalpía del vapor saturado con la subrutina 3 del módulo 4.

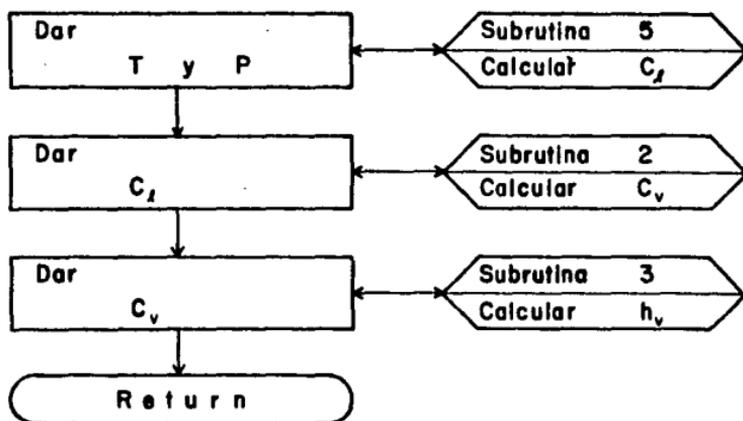


Fig. 4.4 Diagrama de flujo del cálculo de entalpía de vapor saturado. Subrutina A2.

La tercera, subrutina A3, calcula la concentración del líquido y dependiendo de su valor decide si es líquido saturado o subenfriado, si es subenfriado calcula la entalpía del líquido saturado para dos puntos diferentes pero cercanos y calcula el Cp

del líquido, finalmente calcula la entalpía con la ec.(3.5). Si decide que es líquido saturado, calcula la concentración del vapor y compara para definir si es mezcla o vapor sobrecalentado, si es mezcla calcula la entalpía del líquido y la del vapor y calcula la entalpía de mezcla utilizando las concentraciones del líquido y vapor. Si es vapor sobrecalentado calcula la entalpía del vapor en puntos cercanos y evalúa el C_p , finalmente determina la entalpía corregida por el C_p .

4.5 MODULO 2: SUBROUTINAS DE LOS ELEMENTOS.

Este módulo contiene ocho subrutinas que efectúan los balances de masa, energía y calculan la eficiencia para cada elemento. recibe del módulo 1 los datos necesarios para realizar los cálculos y a su vez se sirve de los resultados del módulo 3. Los diagramas de flujo se muestran en las Figs.4.6 a 4.13.

Los elementos evaluados son:

- 1.- Rectificador con convección natural de aire.

Recibe los datos de presión y temperatura de las corrientes 3, 4 y 4', evalúa la entalpía y la concentración para cada una con ayuda de las subrutinas del módulo 3, posteriormente calcula los flujos másicos con las ecs.(3.6) y (3.7) y finalmente evalúa el flujo de calor con la ec.(3.8).

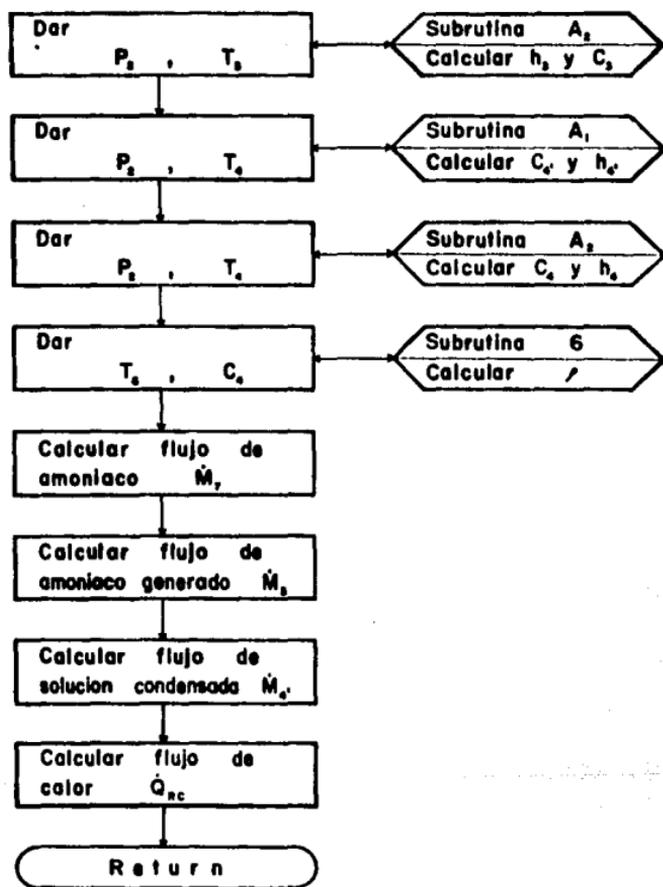


Fig. 4.6 Diagrama de flujo para evaluar al rectificador con convección natural de aire.

2.- Generador.

Recibe los datos de presión y temperatura de las corrientes 1, 2 y 3 y calcula sus correspondientes concentraciones y entalpías, evalúa los flujos másicos con las ecs.(3.6) y (3.7), con la ec.(3.8) determina el flujo de calor teórico, con la ec.(3.9) obtiene el flujo de calor real y finalmente con la ec.(3.10) calcula la eficiencia del equipo.

3.- Condensador.

Recibe datos de presión, temperatura y concentración de las corrientes 4 y 5 y evalúa su entalpía, obtiene los flujos de calor teórico y real con las ecs.(3.8) y (3.9) respectivamente y por último calcula la eficiencia del equipo con la ec.(3.10).

4.- Preenfriador.

Recibe datos de temperatura y presión de las corrientes 5, 7, 9 y 10 y evalúa las entalpías correspondientes para realizar el balance de energía y calcular los flujos de calor teórico y real con la ec.(3.8) y por último obtiene la eficiencia del equipo con la ec.(3.10).

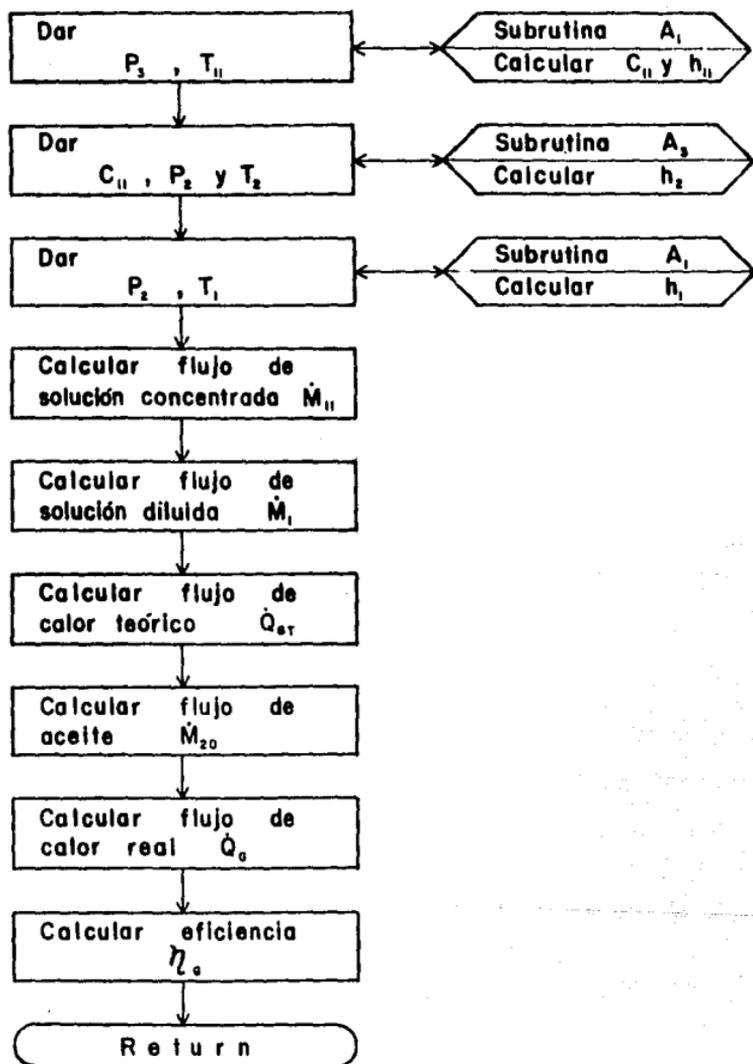


Fig. 4.7 Diagrama de flujo para evaluar al generador.

5.- Evaporador.

Ya que en las subrutinas anteriores se determinó la entalpía de las corrientes del evaporador, únicamente se evalúa el flujo de calor teórico y real con la ec.(3.8) y la eficiencia se calcula con la ec.(3.10).

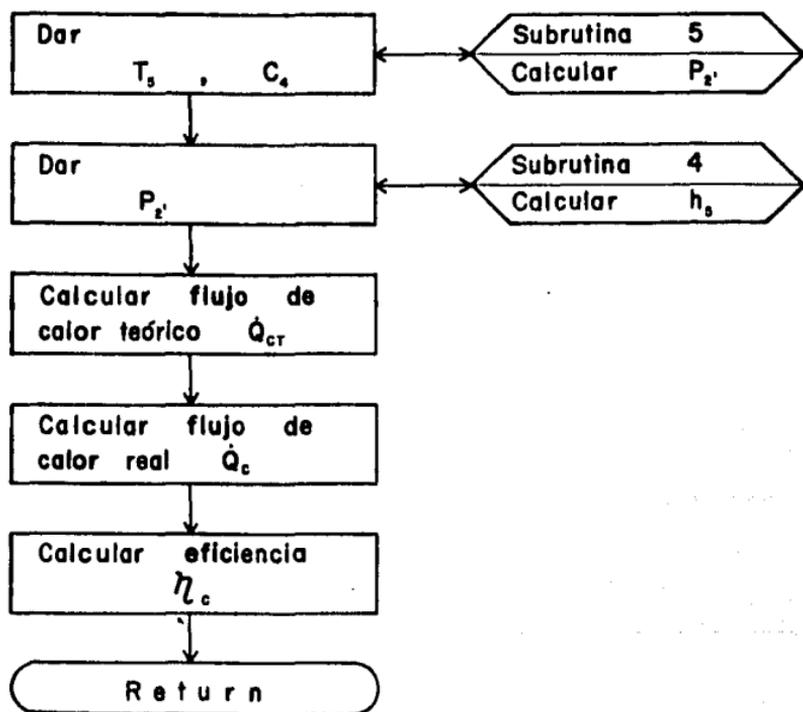


Fig. 4.8 Diagrama de flujo para evaluar al condensador.

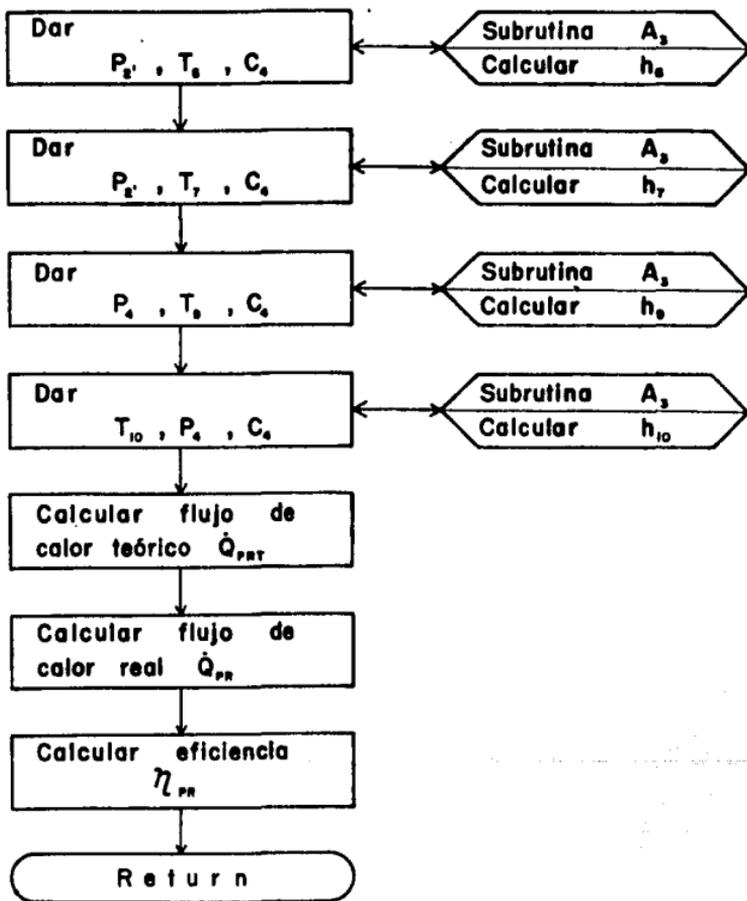


Fig. 4.9 Diagrama de flujo para evaluar al preenfriador.

6.- Cambiador de calor de solución.

Con los datos de temperatura y presión de las corrientes 1, 2, 11 y 13 se calculan las entalpías con las subrutinas del módulo 3, posteriormente se obtienen los flujos de calor teórico y real con la ec.(3.8) y con la ec.(3.10) se conoce la eficiencia del equipo.

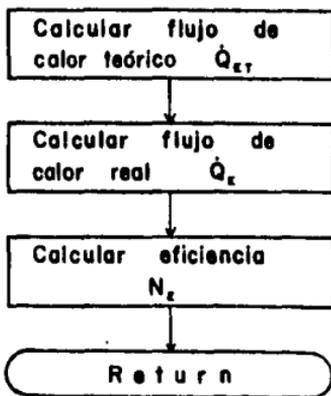


Fig. 4.10 Diagrama de flujo para evaluar al evaporador.

7.- Absorbedor.

Calcula el flujo másico de solución diluida y la concentración de la solución concentrada con las ecs.(3.6) y (3.7) y los flujos de calor teórico y real se obtienen con las ecs.(3.8) y (3.9), finalmente se conoce la eficiencia del equipo con la ec.(3.10).

8.- Bomba.

Calcula los trabajos teórico y real con la ec.(3.8) y obtiene la eficiencia del equipo con la ec.(3.10).

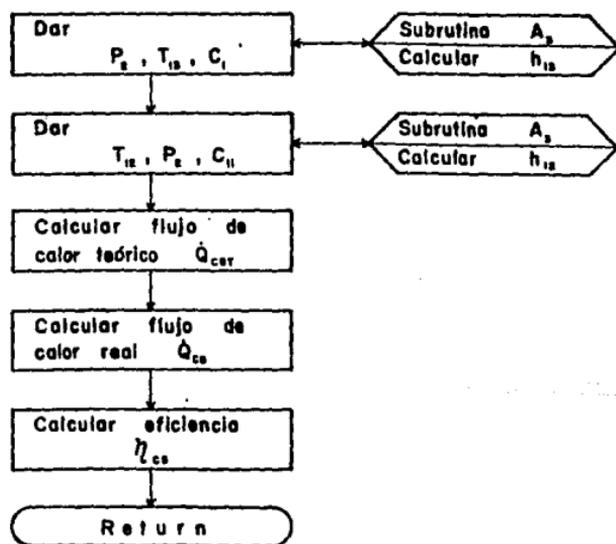


Fig. 4.11 Diagrama de flujo para evaluar al cambiador de calor.

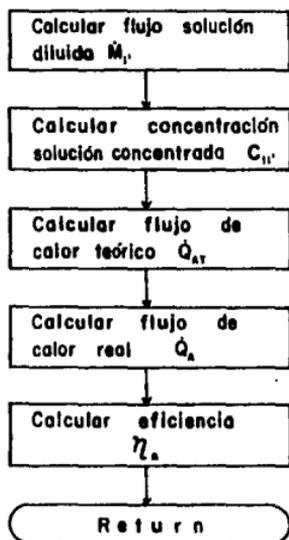


Fig. 4.12 Diagrama de flujo para evaluar al absorbedor.

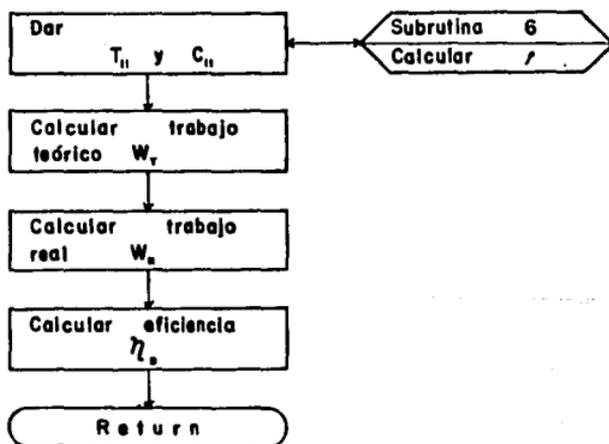


Fig. 4.13 Diagrama de flujo para evaluar a la bomba.

4.6 MODULO 1: PROGRAMA PRINCIPAL.

En este módulo se indica la corrida que se va a analizar, para extraer del archivo correspondiente todos los datos experimentales. Posteriormente envía éstos a las subrutinas de los elementos para el cálculo de los balances de masa y energía y de las eficiencias individuales. Finalmente con la ayuda de estos resultados calcula la eficiencia global y la relación de flujo para cada tiempo.

Finalmente se crea un archivo con los resultados experimentales y los resultados del programa, además elabora un listado de éstos. El diagrama de flujo del programa principal se muestra en la Fig.4.14.

ESTE TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

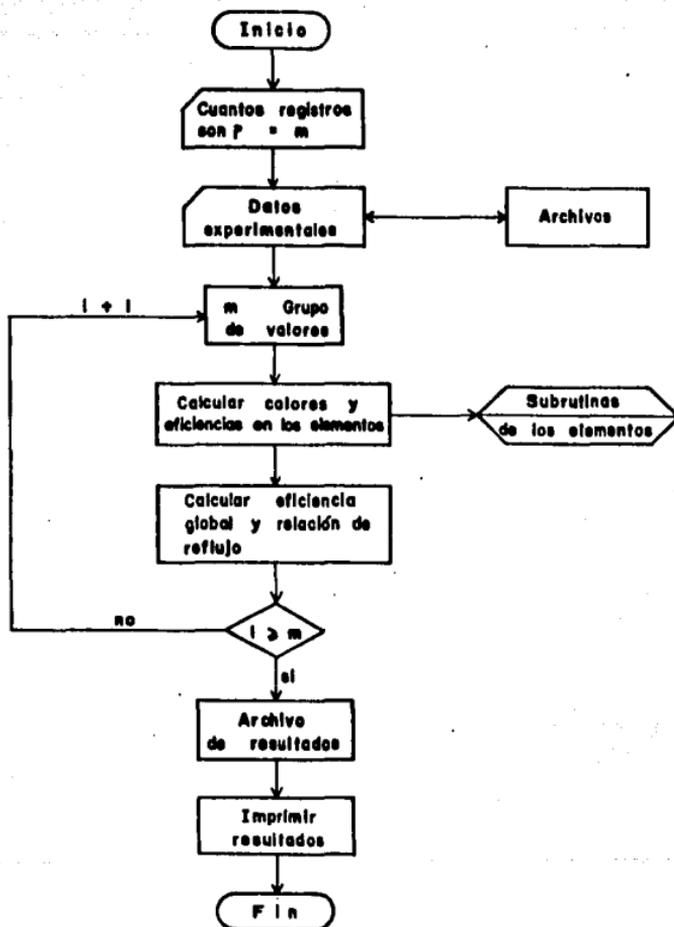


Fig. 4.14 Diagrama de flujo del programa principal.

CAPITULO V

PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se indican las condiciones de operación del Refrigerador Continuo de Absorción de NH_3 - H_2O del IIM, y se muestran los resultados del procesamiento de datos con los programas de computadora, así como su análisis y las conclusiones.

5.1 VARIACION DE PARAMETROS EXPERIMENTALES.

Inicialmente el Refrigerador Continuo de Absorción de NH_3 - H_2O del IIM se hizo funcionar bajo condiciones de diseño hasta alcanzar el régimen permanente, después se operó el sistema con cada una de las condiciones mostradas en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, alcanzando en cada una el régimen permanente. Cada corrida experimental duró 3 horas, con registro de datos cada 15 min.

Ya que el objetivo es evaluar el Refrigerador, se hace necesario conocer el efecto de la temperatura de generación en el comportamiento del mismo, por tal motivo se varió esta manteniendo constantes los demás parámetros a excepción de la presión en el absorbedor, que se ajustó para mantener constante la temperatura de salida de la solución concentrada. Posteriormente se varió en dos ocasiones el flujo másico de la solución concentrada, repitiendo el procedimiento anterior. Para la temperatura de

generación se trabajó en un rango de 353.16 a 373.16 K (80 a 100 °C) con incrementos de 5 K y para el flujo másico de solución concentrada de 0.016 a 0.0185 Kg/s con un incremento de 0.003.

Tabla S.1 Variación de parámetros para el flujo másico de 0.016 Kg/s.

| T _{GE} [K] | T _{CO} [K] | T _{EV} [K] | T _{AB} [K] | P _{GE} [MPa] |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 352.8 | 302.3 | 292.5 | 295.5 | 1.0469 |
| 356.8 | 301.4 | 291.0 | 299.9 | 1.0261 |
| 361.0 | 301.3 | 281.2 | 304.8 | 1.0261 |
| 365.7 | 302.6 | 282.2 | 302.2 | 1.0264 |
| 371.0 | 301.1 | 282.4 | 304.4 | 1.0261 |

Tabla S.2 Variación de parámetros para el flujo másico de 0.0172 Kg/s.

| T _{GE} [K] | T _{CO} [K] | T _{EV} [K] | T _{AB} [K] | P _{GE} [MPa] |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 352.1 | 300.5 | 291.2 | 296.4 | 1.0261 |
| 357.4 | 299.5 | 285.9 | 301.5 | 1.0261 |
| 362.9 | 298.9 | 285.2 | 301.0 | 1.0054 |
| 366.3 | 299.6 | 283.6 | 304.1 | 1.0158 |
| 370.5 | 296.1 | 282.6 | 304.1 | 1.0261 |

Tabla 5.3 Variación de parámetros para el flujo
másico de 0.0185 Kg/s.

| T GE | T CO | T EV | T AB | P GE |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| [K] | [K] | [K] | [K] | [MPa] |
| 353.2 | 300.6 | 293.9 | 297.8 | 1.0261 |
| 356.7 | 300.7 | 285.6 | 298.8 | 1.0261 |
| 358.4 | 299.5 | 283.4 | 300.9 | 1.0261 |
| 366.2 | 299.1 | 280.9 | 303.9 | 1.0261 |
| 369.1 | 299.1 | 282.2 | 302.4 | 1.0469 |

5.2 PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS.

Debido a que la eficiencia y la relación de flujo son los parámetros que permiten entender el comportamiento de una máquina continua de absorción, el análisis se centrará en éstos y en los parámetros relacionados con ellos. Así, en el caso de la eficiencia intervienen los flujos de calor tanto en el generador como en el evaporador; para la relación de flujo participan los flujos másicos en el evaporador y absorbedor. Los resultados de toda la experimentación se presentan en diez gráficas en función de los parámetros ya mencionados junto con las temperaturas de generación. Los gastos másicos de solución concentrada se han representado como "*", "+", "x", para 0.016, 0.0172 y 0.0185 Kg/s respectivamente.

tivamente. Las gráficas se muestran en las Figs.5.1 a 5.10.

En el procesamiento de datos se utilizó el programa de computadora descrito en el capítulo anterior. De cada serie de datos para cada temperatura de generación y gasto de solución concentrada, se tomó el grupo de menores variaciones en el tiempo. Las Figs.5.1 y 5.2 muestran los flujos de energía transferidos en el generador y evaporador contra las temperaturas de generación, para cada uno de los flujos másicos de solución concentrada. La Fig.5.3 presenta el flujo másico de amoníaco generado contra la temperatura de generación. La Fig.5.4 indica el comportamiento de la eficiencia del sistema respecto a la temperatura de generación. Las Figs.5.5 y 5.6 muestran la temperatura de generación y de absorción contra las relaciones de flujo. Las Figs.5.7 y 5.8 presentan los flujos de energía transferidos en el generador y evaporador contra las relaciones de flujo. La Fig.5.9 indica las variaciones de la masa de amoníaco generado contra la relación de flujo. Finalmente la Fig.5.10 muestra la eficiencia contra la relación de flujo.

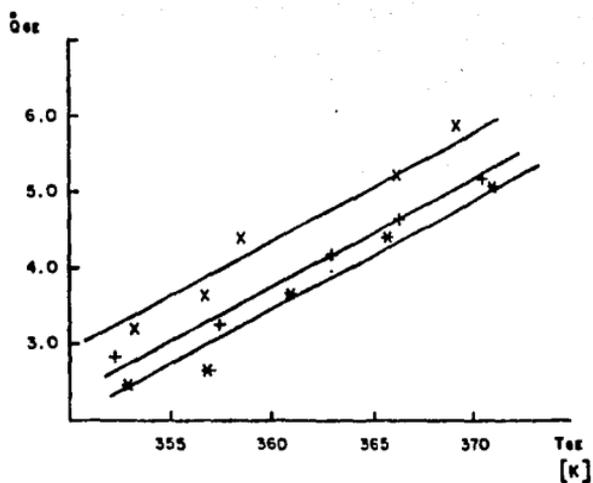


Fig. 5.1 Calor transferido en el generador contra la temperatura de generación.

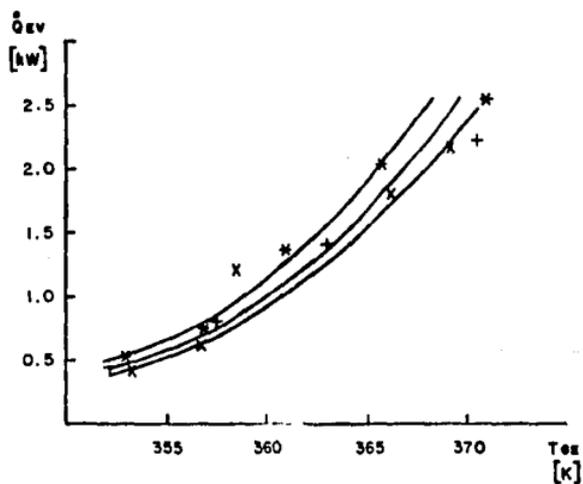


Fig. 5.2 Calor transferido en el evaporador contra la temperatura de generación.

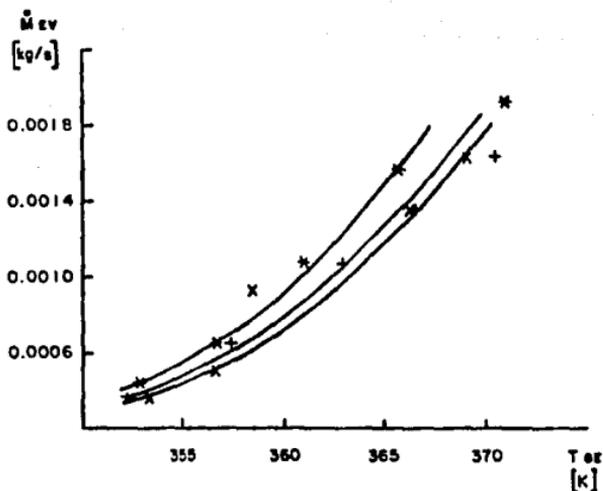


Fig. 5.3 Flujo másico de amoniaco generado contra la temperatura de generación.

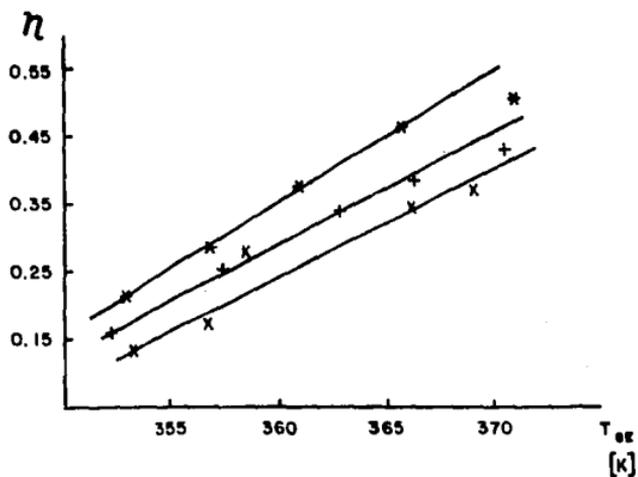


Fig. 5.4 Eficiencia contra la temperatura de generación.

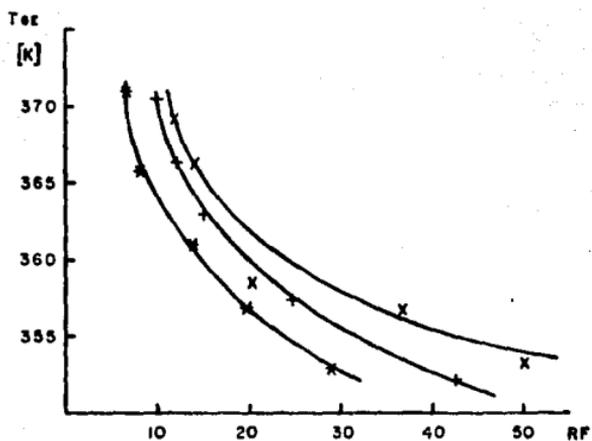


Fig. 5.5 Temperatura de generación contra la relación de flujo.

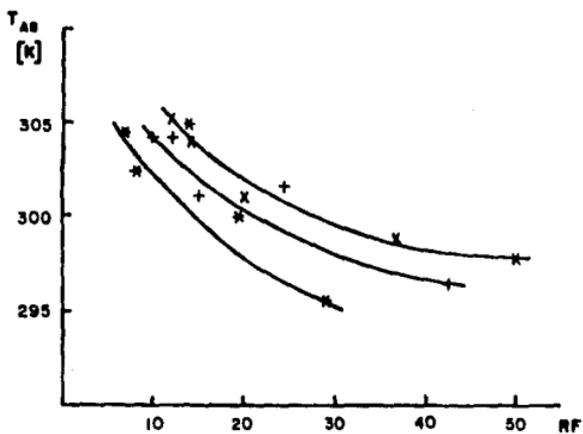


Fig. 5.6 Temperatura de absorción contra la relación de flujo.

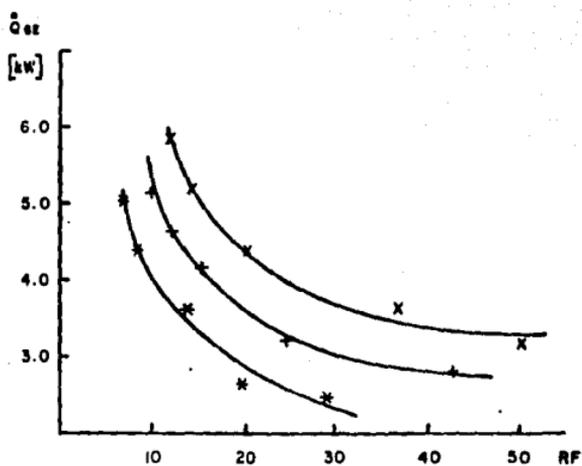


Fig. 5.7 Calor transferido en el generador contra la relación de flujo.

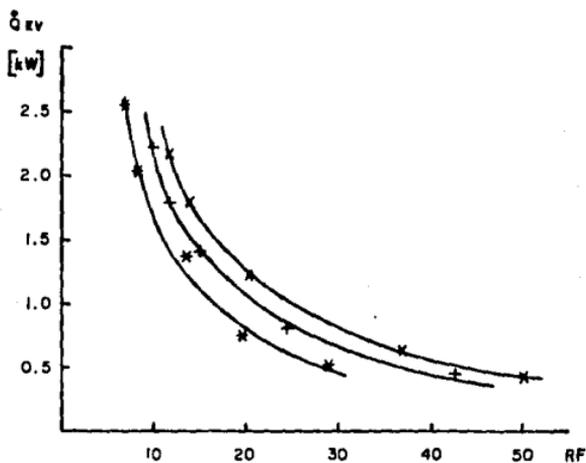


Fig. 5.8 Calor transferido en el evaporador contra la relación de flujo.

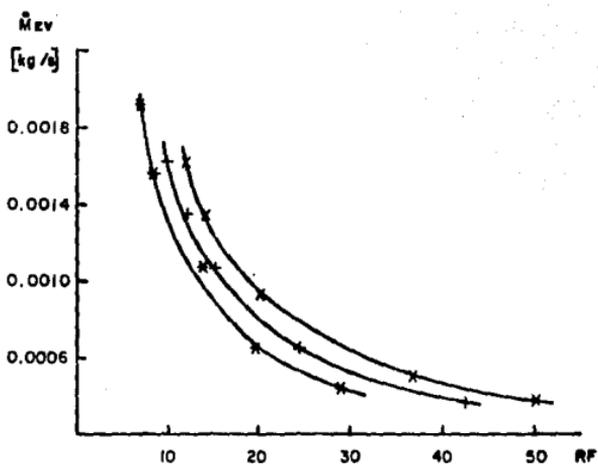


Fig. 5.9 Flujo másico de amoniaco generado contra la relación de flujo.

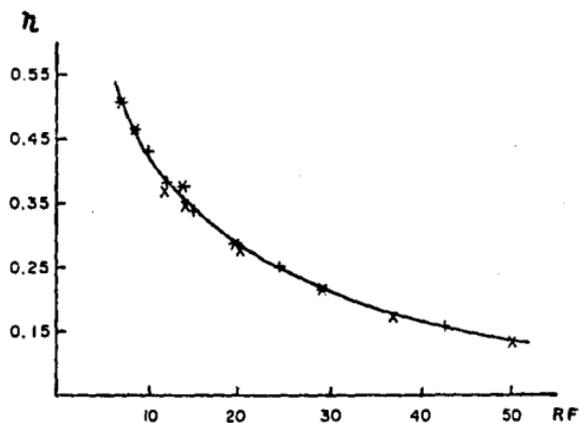


Fig. 5.10 Eficiencia contra la relación de flujo.

5.3 ANALISIS.

De la Fig.5.1 se aprecia que el calor transferido en el generador crece al aumentar la temperatura de generación para un mismo flujo de solución concentrada, y al aumentar este último hay incremento del calor transferido en el generador; comportamiento esperado, ya que a mayor flujo de solución concentrada se requiere mayor cantidad de energía.

De las Figs.5.2 y 5.3 se observa que el calor transferido en el evaporador y el flujo másico de amoníaco generado, crecen al aumentar la temperatura de generación para un mismo flujo de solución concentrada, sin embargo al aumentar este último, disminuye el calor transferido en el evaporador y la masa de amoníaco generado, ya que para una misma temperatura de generación, al aumentar el flujo de solución concentrada disminuye la cantidad de amoníaco generado, y por consiguiente disminuye también la cantidad de amoníaco para evaporar, lo que implica una disminución de la eficiencia, como se aprecia en la Fig.5.4.

De las Figs.5.5 y 5.6 se observa que cuando la temperatura de generación y la de absorción crecen, la relación de flujo disminuye para un mismo flujo de solución concentrada, lo cual se produce por una generación mayor de amoníaco. De la tendencia de estas gráficas se concluye que el generador está llegando a su límite de máxima generación.

De las Figs.5.7, 5.8 y 5.9 se observa que la tendencia es de crecimiento a medida que la relación de flujo disminuye, y aumen-

ta para una misma temperatura de generación al mismo tiempo que crece el flujo de la solución concentrada. El crecimiento en estas dos primeras gráficas con la disminución de la relación de flujo, es ocasionado por una mayor cantidad de vapor generado, requiriendo de una mayor transferencia de calor en el generador. Es así como de estas distribuciones junto con la de la Fig.5.5, un aumento del flujo de masa de solución concentrada requerirá de mayores flujos de calor en el generador a mayor temperatura, para lograr iguales niveles de vapor generado.

De la Fig.5.10 se observa que la eficiencia aumenta al disminuir la relación de flujo, independientemente del flujo de solución concentrada que se tenga. Esta situación se debe a que una menor relación de flujo implica una generación mayor de vapor.

5.4 CONCLUSIONES.

Se analizaron los resultados obtenidos del programa para evaluar el Refrigerador Continuo de Absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ del IIM, en el cual se variaron la temperatura de generación de 353.16 a 373.16 K (80 a 100 °C), y los flujos máxicos de solución concentrada de 0.016 a 0.0185 Kg/s, de la experimentación realizada se obtuvo lo siguiente:

CONCLUSIONES GENERALES.

- De la primera etapa de trabajo se observó que el Refrigerador funcionó el tiempo de operación de diseño, 6 horas continuas, y más sin ninguna falla, sin embargo no se alcanzó la capacidad de refrigeración esperada, debido a que en el evaporador no se tenía una transferencia de calor eficiente y la válvula de expansión del refrigerante está sobrediseñada.

- De la instrumentación utilizada se concluye que fue la mínima necesaria para poder definir el comportamiento de cada uno de los equipos, aunque se presentó corrosión en algunos termopares, fallas en el rotámetro de amoníaco por depender de la válvula de expansión y la escasa versatilidad de los selectores de temperaturas, se logró una toma confiable de datos.

- Es importante mencionar que en el diseño del Refrigerador, no se contempló la etapa de arranque y puesta en marcha, por lo que fue necesario definirla al iniciar la etapa experimental. Posteriormente se tuvo la oportunidad de conocer y operar un equipo similar de tecnología alemana, con lo cual se pudo comprobar que el sistema de operación era el mismo.

- De las consideraciones realizadas en el análisis termodinámico se concluye que fueron de gran ayuda, puesto que permitieron obtener un enfoque general del comportamiento de los equipos y del Refrigerador, sin haber entrado en conceptos rigurosos.

- De la creación del programa de computadora, se concluye que fue la mejor opción para poder analizar la gran cantidad de información que se generó durante la experimentación, asimismo el

uso de las subrutinas para el cálculo de propiedades termodinámicas fue una valiosa ayuda, ya que el acceso directo a esta información (diagramas y tabla) hubiera representado un alto error y un mayor tiempo de procesamiento.

CONCLUSIONES PARTICULARES.

- Al operar el Refrigerador Continuo de Absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ del IIM bajo las condiciones de diseño, se encontró una eficiencia del 30%, lo cual indica que el prototipo trabaja bien, ya que si se compara con sistemas similares, se han obtenido resultados parecidos.

- Al variar las temperaturas de generación de 353.16 a 373.16 K (80 a 100 C), y los flujos máxicos de solución concentrada de 0.016 a 0.0185 Kg/s, se encontró que al aumentar la temperatura de generación, se incrementó la eficiencia y la capacidad del Refrigerador hasta 0.5 y 2.5 Kw respectivamente. De lo cual se concluye que a mayores temperaturas operará mejor el Refrigerador, si no varía el gasto de solución concentrada; cabe mencionar que nunca se alcanzaron niveles de temperatura de generación donde se observara que el comportamiento del generador declinara.

- Se encontró que al aumentar los flujos máxicos de solución concentrada las eficiencias y capacidades del Refrigerador disminuyeron para iguales temperaturas de generación.

- Se observó que de los tres flujos máxicos de solución concentrada con que se experimentó, se obtuvieron las mejores eficiencias para el flujo de 0.016 Kg/s, independientemente de

la temperatura de generación, ésto es debido a que al aumentar el flujo de solución concentrada al generador, éste se encuentra cercano a su límite de saturación, por lo tanto es necesario mejorar el funcionamiento del generador.

Finalmente se concluye que de las condiciones de diseño, es necesario modificar la temperatura de generación (aumentarla), para alcanzar la mejor eficiencia de operación del Refrigerador.

APENDICE

CALIBRACION DE INSTRUMENTOS Y CURVAS DE AJUSTE

Doric

Es un lector electrónico de los voltajes generados por el termopar, los compensa y los transforma a temperaturas.

Calibración del Doric

Para llevar a cabo la calibración se utilizó una fuente de poder de C.D., un baño de hielo a temperatura constante, la Carta de Calibración (manual de operación del Doric) y el termopar, se estableció el voltaje necesario para obtener las medidas de temperatura mínima y máxima, de acuerdo a la carta y se ajustó el aparato. La Fig.A1 muestra las conexiones para la calibración del Doric.

Calibración de Termopares

Para su calibración se requirió de un Doric, un termómetro de 263.16 a 673.16 K (-10 a 400 °C) como referencia, un vaso de precipitados, una parrilla eléctrica con agitador magnético. En aceite a temperatura ambiente, se introdujeron el termopar conec-

tado al Doric y el termómetro, midiendo la temperatura con ambos, como se muestra en la Fig.A2. Después se inició el calentamiento y al alcanzar una temperatura determinada se registró con el Doric y el termómetro. De esta forma se tomaron varias lecturas para poder determinar la variación de la respuesta del termopar con respecto al termómetro. Los datos se ajustaron a una recta con ayuda del Método de Mínimos Cuadrados.

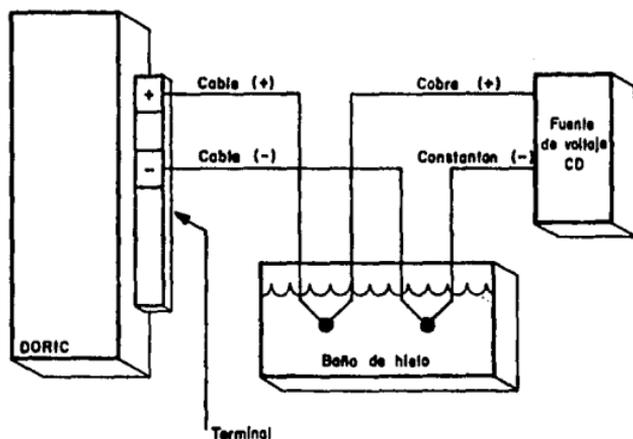


Fig. A1 Calibración del Doric.

Las Tablas A1 y A2 muestran las ecuaciones de calibración de los termopares.

Tabla A1 Coeficientes de las rectas de calibración de los termopares de Fierro-Constantan.

| No. DE TERMOPAR | ORDENADA AL ORIGEN | PENDIENTE |
|-----------------|--------------------|-----------|
| | (A) | (B) |
| 1 | 0.8657 | 0.9703 |
| 2 | 1.4892 | 0.9881 |
| 3 | 2.1993 | 0.9790 |
| 4 | 1.4496 | 0.9871 |
| 5 | 1.7842 | 0.9833 |
| 6 | 2.4396 | 0.9872 |
| 7 | 1.3726 | 0.9878 |
| 8 | 1.5243 | 0.9892 |
| 9 | 1.4964 | 0.9905 |
| 10 | 0.9411 | 0.9915 |
| 11 | 1.2974 | 0.9926 |
| 12 | 0.7935 | 0.9698 |
| 13 | 1.3471 | 0.9861 |

Ecuación de la forma: $Y = A + BX$

Tabla A2 Coeficientes de las rectas de calibración de los Termopares de Cobre-Constantan.

| No. DE TERMO PAR | ORDENADA AL ORIGEN | PENDIENTE |
|------------------|--------------------|-----------|
| | (A) | (B) |
| 1 | -1.0 | 1.0 |
| 2 | -1.0 | 1.0 |
| 3 | -1.1 | 1.0 |
| 4 | -1.2 | 1.0 |
| 5 | -1.2 | 1.0 |
| 6 | -1.1 | 1.0 |
| 7 | -1.2 | 1.0 |
| 8 | -1.3 | 1.0 |
| 9 | -4.0 | 1.0 |
| 10 | -4.5 | 1.0 |
| 11 | -4.4 | 1.0 |
| 12 | -3.7 | 1.0 |
| 13 | -4.6 | 1.0 |
| 14 | -4.4 | 1.0 |
| 15 | -4.4 | 1.0 |
| 16 | -4.3 | 1.0 |

Ecuación de la forma: $Y = A + BX$

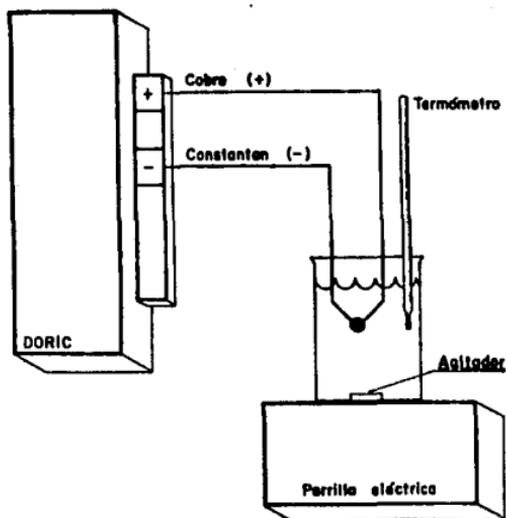


Fig. A2 Calibración de Termopares.

Calibración de Manómetros.

Para esta actividad se utilizó un transductor piezoeléctrico, conectado a una tubería con atmósfera presurizada con nitrógeno y a la cual estaban conectados los manómetros a calibrar. El transductor estaba conectado a una fuente de voltaje constante y a un multímetro, con el cual se registraba el voltaje producido por la presión existente en el medio. Como se muestra en la Fig.A3.

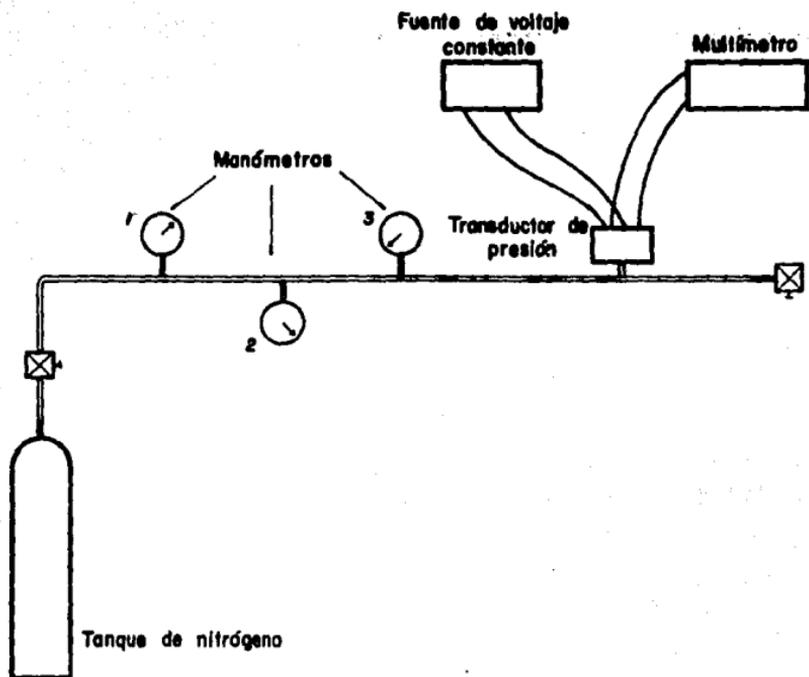


Fig. A3 Calibración de manómetros.

Se varió la presión de la atmósfera y se registró con los manómetros y el transductor. Posteriormente se graficaron las presiones del transductor contra las de los manómetros y se obtuvieron rectas de ajuste con ayuda del Método de Mínimos Cuadrados. La Tabla A3 muestra las ecuaciones de calibración para cada uno de los manómetros.

Tabla A3 Coeficientes de las rectas de calibración de los manómetros.

| No. DE MANOMETRO | ORDENADA AL ORIGEN | PENDIENTE |
|------------------|--------------------|-----------|
| | (A) | (B) |
| 1 | -0.0860 | 1.0193 |
| 2 | -0.0997 | 1.0230 |
| 3 | -0.0208 | 1.0416 |
| 4 | 0.0242 | 1.0384 |

Ecuación de la forma: $Y = A + BX$

Manómetros 1 y 2 son de alta presión

Manómetros 3 y 4 son de baja presión

Calibración de Rotámetros de agua de enfriamiento.

Con el rotámetro instalado en el equipo se alimentaron flujos distintos y constantes de agua. La medición se realizó a la salida del rotámetro con el vaso de precipitados y el cronómetro a un porcentaje de flujo estable, como se muestra en la Fig.A4. Esto se hizo para cada rotámetro. Los resultados obteni-

dos se ajustaron a rectas, por medio del Método de Mínimos Cuadrados, sus ecuaciones se muestran en la tabla A4.

Tabla A4 Coeficientes de las rectas de calibración de los rotámetros de agua.

| No. DE ROTAMETRO | ORDENADA AL ORIGEN | PENDIENTE |
|------------------|--------------------|-----------|
| | (A) | (B) |
| 1 | 0.6500 | 0.3388 |
| 2 | 1.7155 | 0.3140 |

Ecuación de la forma $Y = A + BX$

donde X es por ciento de flujo

Calibración del Rotámetro de aceite de calentamiento.

Con el rotámetro instalado en el equipo se alimentaron flujos distintos y constantes a temperaturas de 373.16, 383.16, 393.16 y 403.16 K (100, 110, 120 y 130 °C); la medición se realizó a la salida del rotámetro con el tanque y el cronómetro a un por ciento de flujo estable, como se muestra en la Fig.A5. Los resultados obtenidos se ajustaron a una curva por medio del Método de Mínimos Cuadrados. Los coeficientes obtenidos se muestran en la tabla A5.

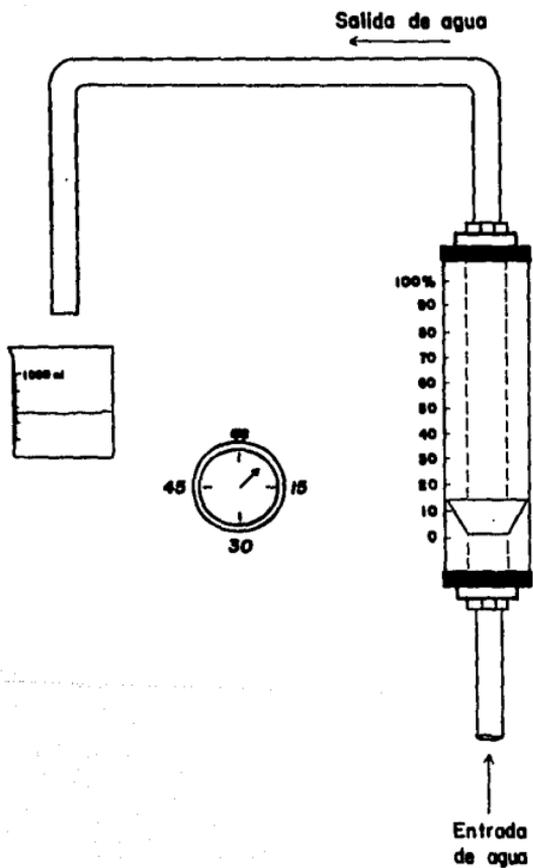


Fig. A4 Calibración de Rotámetros de agua.

Tabla A5 Coeficientes de las rectas de calibración
del Rotámetro de aceite.

| TEMPERATURA | COEFICIENTES | |
|-------------|--------------|--------------|
| (K) | (A) | (B) |
| 373.16 | 0.007994 | -4.32*10E-06 |
| 383.16 | 0.006711 | 2.53*10E-05 |
| 393.16 | 0.009808 | -2.91*10E-07 |
| 403.16 | 0.006811 | 5.36*10E-05 |

Ecuación de la forma $Y = AX + BX^2$

donde x es porciento de flujo.

Calibración del Rotámetro de amoniaco.

Se llenó de amoniaco el tanque y se conectó con el rotámetro a calibrar. Se hizo pasar un cierto volumen de amoniaco líquido, controlandose con las válvulas mostradas en la Fig.A6, en forma tal que la esfera se mantuviera a una altura constante. Conociendo el volumen de líquido disminuido en el tanque, previamente calibrado y el tiempo empleado se encontró el gasto volumétrico contra la altura de la esfera.

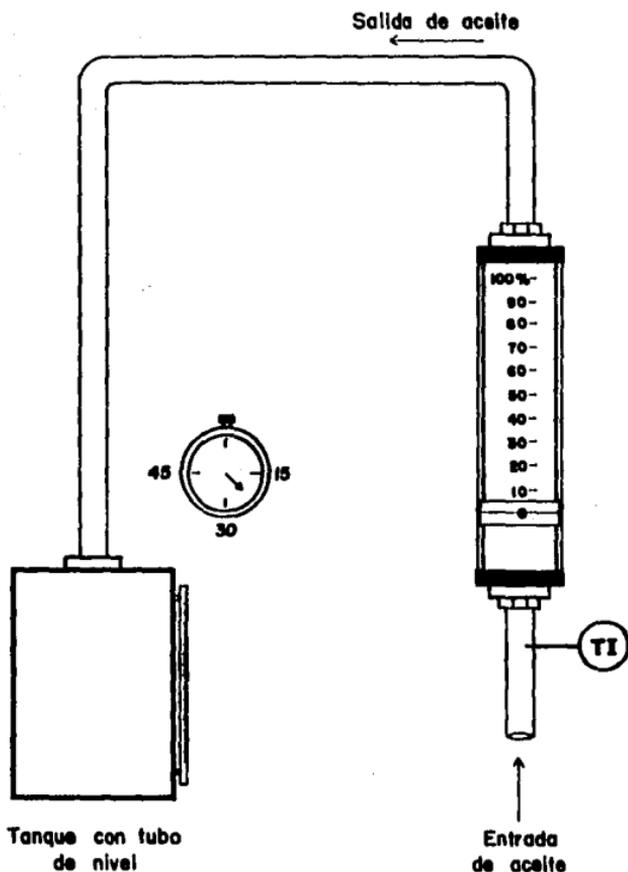


Fig. A5 Calibración del Rotámetro de aceite.

Los resultados obtenidos se ajustaron a una recta de calibración por medio del Método de Mínimos Cuadrados, la ecuación obtenida es:

| ROTAMETRO | ORDENADA AL ORIGEN (A) | PENDIENTE (B) |
|-----------|---------------------------|------------------|
| Amoniaco | 0.9232 | 1.4599 |

Ecuación de la forma $Y = A + BX$
 donde X es la altura en centímetros.

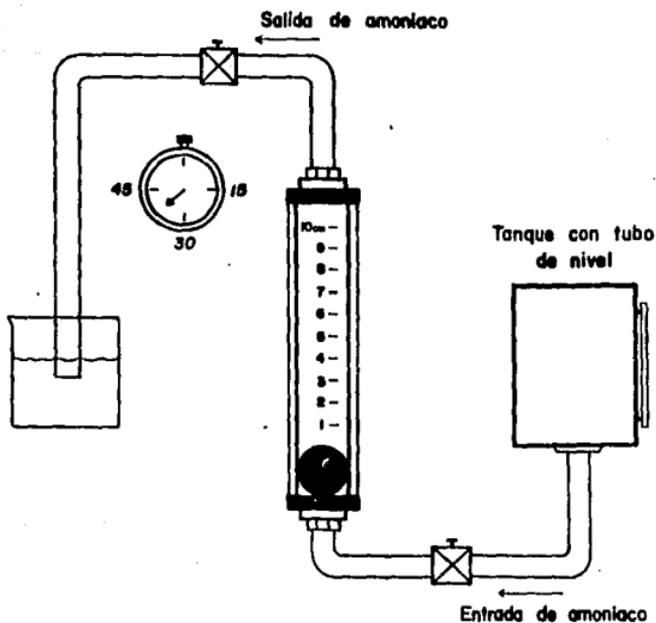


Fig. A6 Calibración del Rotámetro de amoniaco.

REFERENCIAS

1. Serratos Martínez Héctor. Producción de Hielo a partir de energía solar. Tesis UNAM, 1979.
2. Gráficas para mezclas de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.
Linde. Alemania.
3. Correcciones de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.
^{3 2}
Laboratorio de Lawrence Berkeley. EUA.
4. Tablas para mezclas de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.
^{3 2}
Institute of Gas Technology, Boletín 34. EUA.
5. G. Van Wylen y R. Sonntag. Fundamentals of Classical Thermodynamics, John Wiley, EUA, 1973.
6. Balzhiser R. y Samuels M. Engineering Thermodynamics. Prentice Hall, E.U.A. 1976.
7. Hall y Ibele. Engineering Thermodynamics. Prentice Hall. E.U.A. 1960.
8. ASHRAE. ASHRAE Handbook, Fundamentals. ASHRAE, E.U.A. 1981.
9. Primeros resultados experimentales del refrigerador continuo de absorción del IIM. J.I. Hernández, H.L. Guadarrama y L.M. Montes de Oca, Memorias de la X Reunión Nacional de la ANES, Guanajuato 1986. págs. 111-114.

10. Programa de computadora para procesar los datos de operación de un refrigerador continuo de absorción
J.I. Hernández, H.L. Guadarrama, L.M. Montes de Oca.
Memorias de la X Reunión Nacional de la ANES,
Guanajuato 1986. págs. 107-110.
11. Efecto del flujo de solución fuerte en el comportamiento de un refrigerador continuo de absorción de NH₃-H₂O. J.I. Hernández, R. Best, H.L. Guadarrama y L.M. Montes de Oca. Memorias de la XI Reunión Nacional de la ANES, Tabasco 1987.
12. Efecto de la temperatura de generación en el funcionamiento de un refrigerador continuo de absorción de NH₃-H₂O. J.I. Hernández, R. Best, H.L. Guadarrama y L.M. Montes de Oca. Memorias de la XI Reunión Nacional de la ANES, Tabasco 1987.