



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Estudio experimental de un sistema ($\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$) para su aplicación en un sistema de refrigeración por absorción”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

GENARO ISMAEL MEDINA LUNA

ASESOR: RODRIGO LEONARDO DE BENGOCHEA OLGUIN

Ciudad Universitaria

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO por hacer de mi una mejor persona, por ser mi segunda casa y por hacerme sentir orgulloso de ser universitario.

A la Facultad de Ingeniería y a mis profesores por transmitirme los conocimientos necesarios para ser un buen ingeniero.

A mi asesor Ing. Químico Rodrigo Leonardo De Bengoechea Olgin por dedicarme su tiempo y paciencia para realizar este trabajo.

A mis sinodales:
Ing. Adán Tonatiuh López Rodríguez
Ing. Augusto Sánchez Cifuentes
Ing. Genaro Muñoz Hernández
M.I. José Esteban Barrios Bonilla
Por su tiempo y consejos para mejorar este trabajo.

A la división de Máquinas Térmicas y de Física Experimental por las facilidades otorgadas para este trabajo.

A Maritza Tonatzin Peña Mendoza porque sin su apoyo, consejos y regaños no hubiera sido posible este trabajo.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



DEDICATORIAS

A mis padres María Eugenia Luna Tenorio y Genaro Medina Molina, a ustedes les dedico este trabajo como un pequeño reconocimiento a todo lo que me han dado, a todo ese apoyo incondicional que siempre me han brindado, gracias por todo lo que en estos 26 años me han enseñado e inculcado pero sobretodo gracias por el amor y cariño que me han hecho sentir en cada momento, se que esto lo disfrutaban tanto como yo. Mamá Papá... Los amo.

A mis hermanos Alondra y Edgar, gracias por enriquecerme con todos esos consejos y enseñanzas que me han dado y por hacer de mi una persona un “poquito” mas culta. Los quiero mucho.

A la Pandilla: Nacho (Ignacio), El gordo (Pedro), flpa (Tere), Gabiriskis (Gaby) por compartir con migo todos esos momentos y aventuras tan agradables y divertidas. Los quiero mucho.

A la Gordirry ó Chuletirry ó Bolirry (Maritza), por complementarme como persona y por ser el *AMOR* de mi vida. Te amo gor's.



Estudio experimental de un sistema $CuCl_2-NH_3$ para refrigeración por absorción.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN

Aceptación de Trabajo Escrito

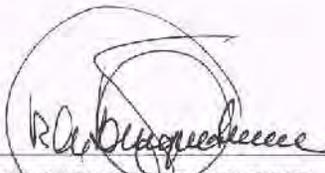
Mtro. José Gonzalo Guerrero Zepeda
Director de la Facultad de
Ingeniería de la U.N.A.M.
Presente.

En atención a su oficio en el que nos informa que hemos sido designados sinodales del Examen Profesional del señor MEDINA LUNA GENARO ISMAEL, registrado con número de cuenta 30019292-8 en la carrera de INGENIERÍA MECÁNICA, nos permitimos manifestarle la aceptación del trabajo desarrollado por el citado alumno.

Atentamente,



ING. AUGUSTO SANCHEZ CIFUENTES
FECHA DE ACEPTACION: 22/02/2011



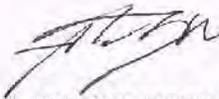
ING. RODRIGO DE BENGOCHEA
OLGUIN
FECHA DE ACEPTACION: 28/02/2011



M.I. JOSE ESTEBAN BARRIOS BONILLA
FECHA DE ACEPTACION: 25/II/11



ING. GENARO MUÑOZ HERNANDEZ
FECHA DE ACEPTACION: 23/II/2011



ING. ADAN TONATILH LOPEZ
RODRIGUEZ
FECHA DE ACEPTACION: 3-III-2011

FECHA DE EMISIÓN: 22 de Febrero de 2011.

JGCZ+MFB/KCH

EP-6



CONTENIDO

Nomenclatura	5
Lista de figuras	6
Lista de tablas	7
Glosario	7
Prólogo	8
I. INTRODUCCIÓN	
1.1 Importancia socioeconómica y ambiental de la refrigeración	12
1.1.1 Perspectiva de la refrigeración	14
1.2 Historia de la refrigeración	16
1.3 Métodos basados en medios químicos	18
1.4 Métodos basados en medios físicos	18
1.4.1, Elevación de la temperatura de un refrigerante	18
1.4.2, Cambio de estado de agregación	18
1.4.3, Expansión de gases	20
1.4.4, Métodos eléctricos	21
1.5 Principios de la refrigeración	22
1.5.1, Efecto de refrigeración	24
1.5.2, Ciclo invertido de Carnot	24
1.6 Ciclo de refrigeración por compresión mecánica de vapor	25
1.7 Ciclo de refrigeración por absorción	28
1.7.1, Sistema Amoniaco – Agua	34
1.7.2, Sistema Bromuro de Litio – Agua	35
1.8 Refrigerantes	36



1.9 Absorbentes	38
1.9.1, Combinación refrigerante – absorbente	38
1.10 Propiedades de las sustancias de trabajo	40
1.10.1, Amoniaco	40
1.10.2, Cloruro de cobre	41
1.11 Disoluciones	42
II. OBEJTIVOS	
2.1. Objetivo general	47
2.2. Objetivos particulares	47
2.3 Justificación	47
III. MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. Descripción del equipo experimental	50
3.2. Descripción del experimento	52
IV. RESULTADOS	
4.1. Resultados experimentales	58
V. CONCLUSIONES	
REFERENCIAS	



Nomenclatura

CFC: Clorofluorocarbono

Q_{sum} : Calor suministrado

Q_{ced} : Calor cedido

$W_{\text{net,ent}}$: Trabajo neto de entrada

COP: Coeficiente de actuación

Q_r : Calor rechazado

Q_a : Calor absorbido

T: temperatura

S: Entropía

W: trabajo

LiBr: Bromuro de litio

NH_3 : Amoniaco

H_2O : Agua

Q_C : Calor del condensador

Q_A : Calor del absorbedor

Q_E : Calor del evaporador

Q_G : Calor del generador

W_B : Trabajo de la bomba

F1: Fuerza inicial

F2: Fuerza final



Lista de figuras

1; Esquema simple de una máquina frigorífica o bomba de calor	23
2; Diagrama T-s del ciclo inverso de Carnot	24
3; Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	26
4; Sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor	27
5; Principios de la refrigeración por absorción	29
6; Ciclo básico de refrigeración por absorción	30
7; Esquema básico de una máquina frigorífica de absorción	34
8; Diagrama que muestra las mejoras en un sistema $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	35
9; Fórmula estructural del ion tetraaminocuprato (II)	45
10; Matrices Erlenmeyer y Kitasato	50
11; Balanza granataria de un solo plato	50
12; Llave de paso con tubo en “u” y tapones de corcho	51
13; Manómetro diferencial	51
14; Bomba de vacío	51
15; Cloruro de cobre y solución de amoníaco	52
16; Arreglo general del experimento	53
17; Medición de temperatura y presión	54
18; Primera etapa del experimento	54
19; Medición de temperatura	55
20; Medición de la masa del tetraaminocuprato (II)	56
21; Resultado de la primera etapa del experimento	58
22; Segunda etapa del experimento	59
23; Tercera etapa del experimento	60
24 y 25; Última etapa del experimento	61
26; Temperatura final vs concentración	62
27; Masa de NH_3 absorbida	63



Lista de tablas

1; Propiedades físicas y termodinámicas del amoniacó	41
2; Propiedades físicas y termodinámicas de cloruro de cobre	42
3; Ejemplos de disoluciones	43
4; Resultados experimentales	62

Glosario

- Adiabático: Proceso en el cuál el sistema no intercambia calor con el entorno.
- Anhidro: Término que se le da a una sustancia que no contiene agua.
- Criogenia: Conjunto de técnicas utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno.
- Delicuescentes: Capacidad de algunas sustancias de absorber humedad del medioambiente
- Isoentrópico: Proceso en el que la entropía permanece constante.
- Isoentálpico: Proceso en el que la entalpia permanece constante.
- Volátil: Sustancia que se transforma fácilmente en vapor cuando está expuesta al aire.



PRÓLOGO

El estudio de la refrigeración ha progresado en los últimos años dándole un auge especial a la refrigeración generada por energías alternas, la disponibilidad limitada de combustibles fósiles han influido en la selección de este tipo de sistemas, las preocupaciones ambientales respecto a muchos de los refrigerantes han provocado que se preste más atención en este tipo de sistemas de refrigeración, también la necesidad que por la refrigeración se tiene en regiones donde no hay un suministro de energía eléctrica hace que se ponga especial atención en la refrigeración por absorción. Éste trabajo tiene su origen en la necesidad de investigar y desarrollar nuevos pares de sustancias de trabajo (refrigerante-absorbente), como se menciona a lo largo del texto los pares de sustancias utilizados con mayor frecuencia en la actualidad presentan algunos inconvenientes, si bien es muy difícil que un par de sustancias satisfaga todos los requerimientos para un óptimo desempeño bajo cualquier condición durante un ciclo de refrigeración por absorción, es importante continuar investigando y evaluando diferentes alternativas para así encontrar pares de sustancias que en mayor grado satisfagan las necesidades en ciertas zonas o bajo ciertas condiciones. El propósito de este trabajo es sentar las bases para desarrollar un par de sustancias de trabajo utilizando cloruro de cobre y amoníaco para su aplicación en un sistema de refrigeración por absorción evaluando experimentalmente la absorción existente entre éste par de sustancias, ésta evaluación se lleva a cabo en los laboratorios de Máquinas Térmicas y Física Experimental de la Facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria, y consiste en poner por separado en dos recipientes al cloruro de cobre y al amoníaco, haciendo pasar vapores de amoníaco por una llave de paso hasta que hagan contacto con el cloruro de cobre, al hacer contacto las dos sustancias se presenta el fenómeno de absorción, se registran los cambios en temperatura y masa de ambos compuestos. A lo largo del texto se da una introducción de la refrigeración, de la situación nacional actual y de las perspectivas de la refrigeración por absorción, de las bases teóricas de ésta, de las formas que nos llevan a generarla, se da una explicación también del funcionamiento de un ciclo de refrigeración por absorción y una breve introducción a la naturaleza de la reacción que tiene lugar entre el par de sustancias evaluado. Finalmente se analizan y se muestran los resultados experimentales obtenidos y algunos de ellos se comparan con lo consultado en la bibliografía.

24Febrero** 2011**

Medina Luna Genaro Ismael



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



INTRODUCCIÓN



I. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia socioeconómica y ambiental de la refrigeración.

La refrigeración como medio de preservación de alimentos, ha sido uno de los principales problemas de la humanidad, el desarrollo de métodos de refrigeración artificial dio pie a la evolución de un sinnúmero de industrias en especial emparadoras y transportadoras de comida. Por tanto, la refrigeración posee una gran importancia económica y social para un número ilimitado de localidades en todo el mundo, al proveer un medio para conservar los productos expedidos a consumidores remotos y, al mismo tiempo, desarrollar regiones agrícolas y ganaderas a través de una mayor demanda de sus productos [13].

La capacidad de refrigeración de un país debe considerarse como un índice de progreso social y desarrollo económico. La refrigeración mejora la capacidad de vida de la población, no sólo en lo referente a su alimentación y salud, sino manteniendo sus espacios habitables dentro de un dominio confortable, teniendo esto una gran influencia en la productividad.

México como la mayoría de los países en vías de desarrollo, padece de un déficit de almacenamientos refrigerados en las áreas de producción y de transporte, atenuado más en las zonas rurales. En un futuro cercano con el incremento en la producción y consumo de alimentos producto del incremento de la población, y esperando mejorar la calidad de vida de los habitantes, las necesidades de contar con instalaciones refrigeradas se volverá uno de los problemas principales a resolver. Por otro lado las edificaciones en la mayor parte del país no cuentan con sistemas de aire acondicionado para regular el confort humano, estas dos grandes necesidades de refrigeración y aire acondicionado se relacionan con los altos índices de insolación en la mayor parte del país. Esto ha llevado a considerar el uso de sistemas de refrigeración por absorción ya que éstos sistemas pueden ser impulsados por una energía calorífica producto de la radiación solar o la geotermia.

México ha basado su economía de abasto energético en la extracción y explotación de sus ricos recursos petrolíferos. Actualmente dichos recursos deben aprovecharse de forma ordenada y responsable, dado que independientemente de su gran riqueza y disponibilidad, éstos no son ilimitados, el consumo de los combustibles fósiles implican problemas complejos, tales como la dependencia energética y deterioro del medio ambiente. Aunado a los problemas del abastecimiento de energéticos se presentan también la contaminación causada por la utilización de los mismos.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



Existen lugares en el país que cuentan con abundantes recursos en energías renovables que se pueden utilizar para obtener energía eléctrica o térmica, tal es el caso de muchas personas que viven en comunidades rurales aisladas, donde aún no está disponible el servicio eléctrico convencional. En éstas comunidades no se cuenta con sistemas para conservar alimentos y medicinas.

El aprovechamiento de las energías renovables propicia beneficios económicos y sociales para la población, tales como la conservación de recursos no renovables y la capacidad de llevar ciertos energéticos a zonas aisladas, por lo que el aprovechamiento de las energías renovables puede considerarse como un elemento favorable al desarrollo regional y tener una repercusión en la generación de empleos.

Por otro lado la tecnología de la refrigeración no sólo es capaz de conservar sino también de transformar. La complejidad y diversificación de las aplicaciones de la tecnología frigorífica van desde la climatización la cual se sitúa entre 18 y 24 °C hasta la criogenia.

El uso eficiente de esta tecnología está asociado a la integración de redes y cadenas de la refrigeración en donde se garantiza la vida útil y calidad de los productos. La falta de esta integración racionalizada en los organismos responsables de los procesos, manejo, transformación, conservación y distribución de los perecederos en un país es la causa de fuertes pérdidas en la producción y aprovechamiento global de los alimentos.

El sector salud requiere al igual que los alimentos de una infraestructura frigorífica capaz de conservar una gran variedad de productos perecederos como sueros, vacunas y medicamentos.

El uso de las fuentes alternas de energía aplicadas a la refrigeración podría en gran medida independizar las acciones de captura en el mar, en los lugares apartados de cosecha y suministrar los requerimientos de energía necesarios para apoyar al sector salud en la operación de clínicas y hospitales rurales en donde se carece, en algunos casos, del flujo eléctrico.

Es claro que el desarrollo de la industria tiene implicaciones del tipo ambiental. El impacto de esta tecnología en el ambiente puede analizarse desde dos puntos de vista: El primero, en lo referente a la disminución de contaminantes y residuos de combustión debido a la adopción de técnicas de ahorro y uso eficiente de energía, y el segundo a la reducción o casi eliminación de las emisiones de los productos clorofluorocarbonados (CFC), en particular del refrigerante R-12, el cual se asocia químicamente al ozono estratosférico, disminuyendo y limitando la regulación del calentamiento terrestre.



En México los eslabones que constituyen las diferentes cadenas de refrigeración están desarticulados y se cuentan con muchas dificultades de diseño y operación. En pocos casos se aplican los conceptos tecnológicos apropiados para mejorar la eficiencia de funcionamiento de las bodegas y el transporte refrigerado es deficiente, limitado y muy costoso. Hasta hoy el país no ha desarrollado la tecnología de producción y aplicación de la refrigeración para sus productos perecederos ni para la climatización de habitaciones.

La comercialización y transportación de productos perecederos alimenticios en México, se realiza en condiciones no siempre eficientes, grandes mermas y elevados costos son características comunes en los centros de abasto. Se ha demostrado, que tanto el diseño como la construcción de sistemas de refrigeración, han permanecido en estado incipiente en nuestro país, siendo todavía pocos los casos en los cuales conceptos nuevos y racionales son considerados y, en los cuales las muchas posibilidades de perfeccionamiento técnico sean experimentadas [10].

1.1.1 Perspectiva de la refrigeración. La tecnología de la refrigeración por absorción, está experimentando un resurgimiento que sigue a un periodo de aproximadamente 20 años de declive. Además del desarrollo de nuevos productos en la industria, en varios países se ha impulsado la investigación sobre ciclos avanzados y nuevas sustancias de trabajo, éstos esfuerzos han resultado en una serie de opciones tecnológicas que están siendo investigadas en la industria para determinar su alcance práctico. El resurgimiento del interés en ésta tecnología representa una nueva era en el desarrollo de sistemas de refrigeración por absorción [13].

Actualmente, alrededor del mundo se están realizando esfuerzos para implementar sistemas sustentables de energía con base en los problemas ecológicos que se han hecho notar en los últimos años. El enfoque que siguen los países desarrollados es el uso de sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración por absorción. En México éstos sistemas han tenido poca aplicación, sin embargo actualmente se investiga en el desarrollo de nuevos pares de sustancias de trabajo así como en el mejoramiento en el rendimiento de los sistemas de refrigeración por absorción. A continuación se describen algunos de los trabajos que se han llevado a cabo en el desarrollo de ésta tecnología.

Erickson en 1990 con apoyo de la empresa Energy Concepts Company en Maryland, Estados Unidos, presentan un sistema de refrigeración solar por absorción intermitente para la fabricación de hielo. El sistema no tiene partes móviles ni componentes eléctricos, consta de un colector parabólico compuesto, un rectificador, un condensador, un evaporador y dos recipientes de presión. Uno de estos sistemas fue instalado en la población de Maruata, una villa pesquera en el estado de Michoacán en 1992 apoyado por el gobierno federal a través del programa PRONASOL.



Erhard y Hahne en 1997, construyeron una máquina intermitente para enfriamiento con fines demostrativos. Utilizaron amoníaco como refrigerante y cloruro de estroncio (SrCl_2) como absorbente, la máquina cuenta con un evaporador, condensador, tanque de almacenamiento, un dispositivo absorbedor/desorbedor, un colector solar. El COP del sistema fue de 0.04 y posteriormente con algunas mejoras el equipo alcanzó un COP entre 0.045 y 0.082.

Antonopoulos y Rogdakis en 1996, describen el comportamiento de un sistema solar por absorción empleando Nitrato de Litio-Amoníaco ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$) y Tiocianato de Sodio-Amoníaco ($\text{NH}_3\text{-NaSCN}$), que operan como enfriador para verano y como bomba de calor para invierno.

Rivera y Rivera en 2003, presentan el desempeño termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción intermitente operado con energía solar. El sistema consiste en un generador-absorbedor, un condensador, una válvula de expansión, un evaporador y un concentrador parabólico compuesto. Los resultados muestran que es posible producir 11.8 kg de hielo con una eficiencia global del sistema de entre 0.15 y 0.4 [11].

Existe una gran variedad de sistemas de refrigeración por absorción que están incluidos en proyectos de desarrollo social y económico en nuestro país, como el proyecto Sonntlan de colaboración entre la república Federal de Alemania y México, que se dividió en dos subproyectos: Sonntlan Las Barrancas y Sonntlan Mexicali; el proyecto de enfriamiento solar en Mexicali, desarrollado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas y el Instituto de Investigación en Materiales, UNAM; el sistema Isaac (Ciclo Intermitente de Absorción de Amoníaco por Energía Solar), desarrollado por la compañía Energy Concepts de Maryland USA que se describió anteriormente, y el proyecto Puerto Lobos, el segundo desarrollo rural de PRONASOL. A continuación se describen dos de éstos proyectos.

El proyecto Sonntlan Las Barrancas estuvo encaminado a satisfacer las necesidades energéticas de una comunidad pesquera, incluyendo agua potable, electricidad, agua caliente y conservación de alimentos. Se incluyeron plantas de desalinización solar, sistemas fotovoltaicos entre otros. El desarrollo del proyecto ofreció también congelado y conservación de productos, los sistemas de enfriamiento fueron sistemas de absorción amoníaco/agua.

El proyecto Sonntlan Mexicali, consistió en seis casas unifamiliares que incorporaban elementos pasivos para reducir la demanda de enfriamiento, la demanda de enfriamiento se proveyó por un enfriador solar por absorción de bromuro de litio/agua [13].

Cómo se puede ver, la refrigeración por absorción está teniendo un resurgimiento en los últimos años, se está llevando a cabo investigación para mejorar el sistema, así como se está investigando nuevos pares de sustancias de trabajo con la finalidad de que la refrigeración y los beneficios que ella conlleva, estén disponibles para la mayoría de la población.



1.2 Historia de la refrigeración.

La refrigeración como medio de preservación de alimentos, ha sido uno de los principales problemas de la humanidad, se tiene referencia incluso del uso de los fenómenos naturales de la refrigeración para mejorar la calidad de vida de la gente y conservar sus alimentos a partir de la historia temprana de China [13].

El principio de la refrigeración nació con el descubrimiento de la condensación de los gases. Mientras Faraday investigaba la absorción de los vapores de amoníaco por medio de las sales de cloruro de plata, descubrió la condensación y evaporación espontánea de los vapores de amoníaco provocando enfriamiento. Éstos fenómenos físicos se han aplicado en los sistemas de refrigeración basados en el principio de la evaporación de líquidos con bajos puntos de ebullición a presiones normales [12]. Posteriormente la refrigeración artificial, entendiéndose como tal la refrigeración por medios no naturales, tiene su inicio en 1748, en la Universidad de Glasgow (Escocia), donde William Cullen efectúa experimentos con éter bajo vacío.

Los trabajos sobre las leyes de compresibilidad de los gases desarrollados en 1783 por Gay Lussac y Boyle, y la experimentación de Faraday sobre licuefacción de gases, de la misma época, fueron avances importantes para la correcta comprensión de los procesos de la producción de frío. No obstante, uno de los grandes impulsores en este campo es el francés Sadi Carnot (1824), cuyos estudios sobre las máquinas térmicas permanecen vigentes en la actualidad, a pesar de basar sus trabajos en la teoría del “calórico”.

Sir John Leslie se encargó de continuar los trabajos del Dr. Cullen, en la Universidad de Edimburgo, desarrollando en 1810 un sistema de enfriamiento por absorción, a baja temperatura, utilizando ácido sulfúrico como absorbente, y agua como refrigerante. En la misma época, Oliver Evans, publicó un texto en el que se especificaba la producción de frío industrial por la compresión y expansión de líquidos volátiles en ciclo cerrado.

La siguiente aportación se debe a Jacob Perkins, éste conocía los trabajos de Oliver Evans y Richard Trevithick, compañero de aquél. Así, los compresores que se fabricaron fueron fruto de las ideas de todos ellos. Perkins obtuvo una patente Británica acerca de un compresor y condensador de líquido volátil. El equipo de Perkins funcionó adecuadamente para producir hielo y alcanzó una gran publicidad en Europa como la posible solución para la fabricación comercial de hielo artificial.

En 1834, un relojero francés, Jean Peltier, descubre que el paso de una corriente eléctrica, a través de un circuito integrado por dos conductores diferentes, produce un efecto de enfriamiento, lo que junto a los trabajos de Seebeck constituyen la base de la refrigeración termoeléctrica.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



La invención de la primera máquina frigorífica de absorción se debe al ingeniero francés Ferdinand Carré en 1859, su formación como ingeniero químico le orientó hacia los fenómenos de afinidad. Recuérdese que la afinidad del ácido sulfúrico hacia el agua había sido ya descrita por los sucesores de Cullen, los cuales la utilizaron para activar la evaporación del agua y mejorar su aparato de producción de hielo. Esta máquina de absorción no es comercial hasta 1866, cuando fue puesta a punto por Edmond Carré, hermano pequeño de Ferdinand. Ferdinand Carré es el primero en utilizar el amoníaco como refrigerante. Su máquina de absorción continua se fabrica inmediatamente en París por Mignon y Rovart en 1860-1861. Un avance posterior en las máquinas de absorción se debe a los suecos B. von Platen y Karl G. Munters, y el italiano Guido Mauri, Teniendo como consecuencia la máquina "Electrolux".

Hacia 1885 las plantas de refrigeración del tipo de compresión reemplazaron con rapidez a los diseños de absorción. Si bien la planta de absorción era muy eficiente, en especial a temperaturas bajas, la mayoría de los operadores poseían un conocimiento deficiente de la máquina, y se quejaban de que tales máquinas no se prestaban a aumentar la producción a fin de satisfacer las demandas de hielo en los veranos cálidos.

En 1887, el botánico y geólogo Von Ettingshausen, descubre que cuando un campo magnético actúa normalmente sobre una corriente eléctrica, se genera un gradiente de temperaturas, perpendicular a ambas direcciones, lo que pone de manifiesto el efecto magneto-termo-eléctrico.

En el campo de la alimentación, los procesos en congelación rápida no solamente hicieron avanzar la ciencia y la economía de la conservación de productos alimenticios perecederos, sino que variaron la estrategia del almacenamiento en frío por congelación. La refrigeración del aire en grandes almacenes, restaurantes, hoteles y hospitales ha llegado a ser una práctica aceptada, y se han emprendido extensas investigaciones en relación con los métodos más idóneos para la refrigeración en automóviles, aviones y viviendas.

En la actualidad los almacenes refrigerados son considerados un factor esencial para la conservación económica de la mayor parte de las sustancias comestibles perecederas. Centenares de nuevas aplicaciones de refrigeración para conservación y protección existen en la actualidad en museos, bibliotecas, imprentas, elaboración de productos textiles, tratamiento de metales, etc.

El desarrollo de la técnica frigorífica, iniciada en 1748, ha llegado a ser uno de los factores esenciales de la vida cotidiana y de la economía de nuestros días, aumentando su importancia de manera progresiva con su introducción en nuevos campos industriales. Evidentemente, la evolución histórica comentada ha dado como resultado la implantación de una serie de métodos destinados a la obtención de refrigeración, atendiendo al origen del fenómeno en que se basan.



1.3 Métodos basados en medios químicos.

Estos métodos están basados en la disolución de un sólido en un líquido, proceso en el que la disgregación de las moléculas del sólido precisa un cierto consumo de energía, y de ahí su carácter endotérmico. Un ejemplo de aplicación es la mezcla, en proporciones iguales, de agua y nitrato de amonio, cuyo resultado es el descenso de la temperatura en unos veinte grados centígrados.

El enfriamiento no es el caso general ante una mezcla, ya que en ocasiones el proceso se acompaña de un desprendimiento de calor, producto de la reacción entre los componentes, que supera con creces la energía absorbida en el proceso de dilución. Dado su carácter discontinuo y baja generación de potencia frigorífica específica, su utilización queda prácticamente restringida a pruebas de laboratorio, sin incidencia en el área industrial.

1.4 Métodos basados en medios físicos.

La utilización de máquinas de refrigeración, fundamentadas en fenómenos físicos, abarca un buen número de posibilidades, que pueden subdividirse en los siguientes apartados.

1.4.1 Elevación de la temperatura de un refrigerante. La baja temperatura se obtiene en el fluido refrigerante, y el proceso de refrigeración o dicho con más propiedad de absorción de calor del producto a enfriar, se reduce a una mera transmisión de calor. Tal es el caso de la refrigeración indirecta, en la que un fluido elimina calor en un proceso. Evidentemente, la nueva utilización del caudal del refrigerante requiere a su vez la cesión de calor, por parte de éste, en una máquina destinada a su regeneración.

1.4.2 Cambio de estado de agregación. La necesidad de un aporte de calor a una sustancia para que tenga lugar su paso bien de sólido a líquido, de sólido a vapor, o de líquido a vapor, puede utilizarse en refrigeración. También ahora la baja temperatura se obtiene en el refrigerante, no obstante, a diferencia con el caso anterior, se pone en juego básicamente un calor latente y no únicamente uno sensible como era el caso de elevación de temperatura. En función del cambio de estado puede distinguirse:

Sublimación; El paso de sólido a vapor se produce espontáneamente, a presión atmosférica, sólo en algunas sustancias, como es el caso de la nieve carbónica o hielo seco, cuya sublimación tiene lugar a una temperatura de aproximadamente $-79[^\circ\text{C}]$, con un calor latente de cambio de estado de $139 [\text{Kcal/Kg}]$, evidentemente este vapor aún puede absorber un calor sensible hasta la temperatura ambiental.



Debe indicarse que otras sustancias pueden alcanzar la sublimación, siempre y cuando la presión ambiental sea la adecuada, tal es el caso del hielo que precisa un nivel inferior a los 4 [mm Hg], lo que dificulta su aplicación práctica como método de enfriamiento.

Fusión; Durante la fusión de un sólido se debe aportar una cantidad de calor, 'por unidad de masa, igual al calor latente de fusión, por tanto sustancias de bajo punto de solidificación son aptas para la refrigeración de otros productos. Una vez finalizada la fusión debe, bien renovarse el sólido o producir nuevas cantidades de éste.

Evaporación; De la misma forma que en sublimación o fusión, el calor latente de vaporización de un líquido puede ser una vía de absorción de calor a baja temperatura, con líquidos de bajo punto de ebullición. El aprovechamiento de este cambio de agregación pasa por dos vías:

- Con fluido perdido.
El vapor producido por adición de calor a una masa líquida se pierde, diluyéndose en la atmósfera, por lo que debe asegurarse que carezca de efectos nocivos sobre ésta. Tal es el caso del nitrógeno utilizado en túneles de congelación y transporte frigorífico.
- Con recuperación de los vapores resultantes.
El sistema de captación del fluido evaporado con destino a su reutilización, da origen a la siguiente serie de máquinas:
 - a) Máquinas de compresión; la absorción de vapores la realiza un equipo que consume potencia mecánica "el compresor", el cual los descarga a una presión superior, a la que estos vapores pueden condensarse por cesión de calor a un agente externo.
 - b) Máquinas de absorción; los vapores se recuperan utilizando la avidez, que por éstos tiene una solución líquida, la resultante es una nueva solución líquida, que es bombeada a un separador en el que, por aporte de energía calorífica, se produce una nueva separación de vapores que, como en la máquina de compresión, pueden ser condensados por transmisión de calor al exterior.
 - c) Máquinas de adsorción; de funcionamiento similar a las de absorción, diferenciándose en que los vapores son ahora recuperados por un sólido en lugar de una solución líquida.
 - d) Máquinas de eyección; el método de absorción de vapores es el efecto Venturi, creado por la inyección de una corriente a alta velocidad, el aumento de presión para alcanzar unas condiciones satisfactorias de condensación se logra mediante onda de choque y paso a través de un difusor.



De la explicación de estas máquinas, se puede observar que una vez producida la corriente de vapores, se siguen una serie de transformaciones destinadas a su nueva condensación, que se produce a una presión superior a la de utilización. Una expansión del líquido condensado hasta la presión de ebullición permite la obtención de un porcentaje de líquido a baja presión y temperatura, apto para continuar el proceso de enfriamiento. Por lo tanto, las máquinas reseñadas anteriormente pueden denominarse tanto de evaporación como de expansión de líquido, pues ambos procesos son necesarios para un correcto funcionamiento cíclico.

1.4.3 Expansión de gases. En el punto anterior se ha visto como la expansión de un líquido puede ser la base de distintas máquinas de refrigeración, si el descenso de presión tiene lugar en un gas, el resultado puede abarcar distintas posibilidades, atendiendo a la forma en que éste se produzca y al propio comportamiento del fluido.

Gas perfecto; se considera que el comportamiento del fluido se puede aproximar al del gas perfecto, en este caso cabe distinguir:

- **Expansión isoentálpica.**
Con una transformación en la que se mantiene constante el valor de la entalpía específica (estrangulamiento), el descenso en la temperatura asociado a la caída de presión es nulo.
- **Expansión isoentrópica.**
El descenso en la presión se realiza por paso a través de una turbina, produciendo trabajo y ocasionando, ahora sí, un descenso en la temperatura. Este proceso es la base de la denominada “Máquina de aire”, en la que este fluido es sucesivamente comprimido, enfriado y expansionado, para lograr el efecto frigorífico.
Por otra parte, existe un método denominado de “Vortex o Ranque-Hilsh”, que puede incluirse dentro de este apartado, dado que en esencia se trata de la introducción en un tubo de una corriente de aire comprimido de forma tangencial. Este tubo actúa como una rudimentaria turbina, dando como resultado enfriamiento del aire que ocupa su zona central y un calentamiento en la periferia.
- **Efecto Joule-Thompson.**
Si la expansión tiene lugar en un gas real, aunque ésta tenga lugar de forma isoentálpica, la temperatura final obtenida puede ser mayor o menor que la inicial, todo ello dependiendo del coeficiente de Joule-Thompson. Este coeficiente representa la pendiente de la línea isoentálpica en el punto considerado, y define con su signo la variación de la temperatura con la presión. El efecto de Joule-Thompson tiene su campo de aplicación en la producción de gases licuados a muy baja temperatura.



1.4.4 *Métodos eléctricos.* La utilización de fenómenos eléctricos o magnéticos en el campo de la refrigeración pasa por las siguientes posibilidades:

- Efecto Peltier (Termo-Eléctrico).
En este caso, se obtiene una fuente a baja temperatura y otra a alta temperatura, al provocar el paso de una corriente eléctrica por el circuito formado por dos elementos semiconductores.
- Efecto Ettinghausen (Magneto-Termo-Eléctrico).
La introducción de dos campos, eléctrico y magnético, perpendiculares entre sí, induce un campo térmico sobre un conductor en la tercera dirección espacial.
- Efecto Haas-Keenson (Magneto-Térmico).
La orientación forzada, mediante un campo magnético, de las moléculas de una sal paramagnética, seguida de su enfriamiento, provoca, al desaparecer el campo, una fuerte caída de temperatura, debido a la energía necesaria para la reconstrucción de la configuración inicial, que la sal convenientemente aislada debe tomar de sí misma.

La gran mayoría de las plantas destinadas a la refrigeración industrial, sea cual sea el tamaño, desde los frigoríficos domésticos hasta los más grandes sistemas industriales, utilizan el sistema de compresión de vapor para la refrigeración. Los demás sistemas enumerados se utilizan en determinadas circunstancias, y algunos de ellos en raras ocasiones, bien por estar en vías de perfeccionamiento. Por ejemplo, el sistema de absorción se utiliza en grandes plantas químicas, en aire acondicionado y en algunos refrigeradores domésticos. Esto se debe a que este sistema necesita una entrada de calor a una temperatura no demasiado alta, y por tanto encuentra aplicaciones donde ese calor está disponible como un deshecho.

El ciclo de aire, en el cual la temperatura se reduce por un proceso de expansión, del que se obtiene trabajo, fue utilizado muchos años en refrigeración marítima, debido principalmente a su seguridad. En la actualidad es usado para la refrigeración de las cabinas de aviones, si bien en este campo también encuentra una dura competencia con el sistema de compresión mecánica.

El sistema de eyección de vapor tuvo un cierto auge en un tiempo, como método que puede funcionar directamente con un suministro de vapor a baja presión, y no requiere gases tóxicos, pero hoy en día su uso es muy limitado.



La refrigeración termo-eléctrica presenta, con los materiales disponibles hasta el momento, una baja eficiencia, sobretodo con potencias elevadas, pero tiene muchos usos en circunstancias donde la eficiencia no es el parámetro fundamental, como pequeños sistemas refrigerados para especímenes microscópicos, instrumentos de medida, enfriamiento de componentes electrónicos, y en aplicaciones en las que la ausencia de partes móviles internas los hace atractivos [15].

1.5 Principios de la refrigeración.

Es obvio, por la experiencia, que el calor fluye en la dirección de la temperatura decreciente, es decir, de medios de alta temperatura a medios de baja temperatura, este proceso de transferencia sucede en la naturaleza sin requerir ningún dispositivo, sin embargo, el proceso inverso no puede ocurrir por sí solo. La transferencia de calor de un medio de baja temperatura a uno de alta temperatura requiere dispositivos especiales llamados refrigeradores, los refrigeradores como las máquinas térmicas son dispositivos cíclicos, el fluido de trabajo utilizado en el ciclo de refrigeración se llama refrigerante [2].

La refrigeración se define como el proceso en donde se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura, la refrigeración implica transferir la energía del cuerpo que pretendemos enfriar a otro, aprovechando sus propiedades termodinámicas.

Se emplea el término refrigeración para indicar el mantenimiento de un cuerpo a una temperatura menor que la de sus alrededores. Para mantener o producir esta baja temperatura, es necesario transferir calor desde el cuerpo o espacio por enfriar. Un refrigerador es un dispositivo que se emplea para lograr este efecto a base de gastar energía del exterior en forma de trabajo o de calor, o de ambos. Para que el refrigerador opere continuamente es necesario, además que ceda calor a un sumidero externo, por lo general la atmósfera. De esta manera, se puede considerar a los refrigeradores como máquinas de calor que trabajan en sentido inverso [8].

El fluido de trabajo utilizado en este sistema puede permanecer en una sola fase o puede cambiar de fase. La refrigeración suele asociarse a la conservación de alimentos y al acondicionamiento de aire, sin embargo, existen muchas otras necesidades de técnicas de refrigeración.

El funcionamiento general de un ciclo frigorífico simple está esquematizado en la figura 1. Los sentidos de Q_{sum} , Q_{ced} y $W_{\text{net,ent}}$ se muestran mediante flechas. En las máquinas frigoríficas se transfiere una cantidad de calor Q_{sum} desde una fuente a baja temperatura al dispositivo cíclico, y se descarga una cantidad de calor Q_{ced} a un sumidero a alta temperatura, estas transferencias de calor tienen lugar hacia y desde el fluido de trabajo que realiza el proceso cíclico en el interior del dispositivo. La transferencia neta de calor se efectúa debido a un sumidero neto de trabajo $W_{\text{net,ent}}$ (como puede ser la unidad motor-compresor en una máquina frigorífica real).



Debido al trabajo suministrado a la máquina frigorífica, el principio de conservación de energía obliga a que el valor de Q_{ced} sea mayor que Q_{sum} .



Figura 1: Esquema simple de una máquina frigorífica o bomba de calor [17].

El rendimiento térmico no es un parámetro apropiado para describir el comportamiento de las máquinas frigoríficas, en cambio, el comportamiento de estas máquinas se mide utilizando un parámetro llamado *coeficiente de actuación* o COP. Al igual que el rendimiento térmico el COP se define en función del resultado deseado dividido entre los costos a la entrada exigida, en los procesos de refrigeración, el resultado deseado es transferir calor al ciclo desde una región a baja temperatura y la entrada exigida es el trabajo neto comunicado. Por tanto una máquina frigorífica define su COP como:

$$COP = \frac{Q_{sum}}{W_{net,ent}}$$

El coeficiente de actuación para las máquinas frigoríficas es un número adimensional que siempre es mayor que cero [17].



1.5.1 Efecto de refrigeración. El efecto de refrigeración de un refrigerante, se mide por la cantidad de calor que es capaz de absorber desde que entra al evaporador como líquido, hasta que sale como vapor. Por lo tanto, los líquidos que poseen un alto calor latente de evaporación poseen un buen efecto de refrigeración.

Se puede decir, por lo anterior, que el efecto de refrigeración es la diferencia entre el calor que contiene el líquido, y el calor contenido en el vapor después de pasar por el evaporador [6].

1.5.2 Ciclo invertido de Carnot. Para empezar, debemos hacer la distinción entre un ciclo *invertido* y uno *reversible*. Un *ciclo invertido* es una expresión general que incluye todos aquellos en que el trabajo neto es una energía consumida y el calor neto es rechazado; Q_r es numéricamente mayor que Q_a . Un ciclo *reversible* es en el cual los procesos son llevados a cabo sin rozamiento y el calor se transmite con una caída infinitesimal de temperatura. Las consecuencias de esta definición son que el calor se recibe mientras la sustancia de trabajo está a la misma temperatura constante que la fuente; el calor es rechazado mientras la sustancia de trabajo está a la misma temperatura constante que el sumidero. Los ciclos invertidos se emplean para dos fines: 1) proporcionar un efecto de enfriamiento (una máquina refrigeradora) y 2) proporcionar un efecto de calentamiento (una bomba de calor) [5].

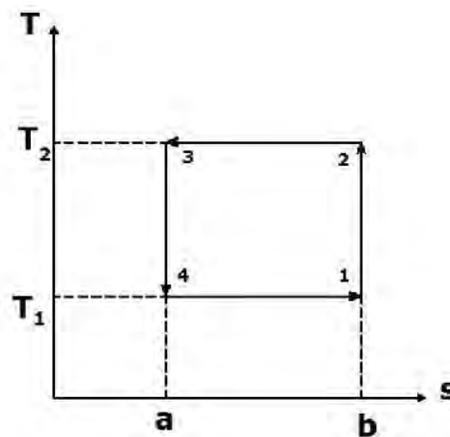


Figura 2: Diagrama T-s del ciclo inverso de Carnot [15].

En el proceso de 1 a 2; tiene lugar, mediante la adición de trabajo, una compresión isoentrópica (adiabática y reversible) en la zona de vapor húmedo del diagrama.

El proceso de 2 a 3; se produce la condensación completa del vapor, mediante la cesión reversible de calor a presión y temperatura constantes.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



De 3 a 4; la transformación seguida es una expansión isoentrópica desde el punto de líquido saturado “3” hasta la presión correspondiente a la temperatura fría, produciéndose con ello una mezcla de vapor y líquido (vapor húmedo, pto. 4) y una cierta cantidad de energía cedida por el sistema.

De 4 a 1; se produce la vaporización parcial del líquido presente en el estado “4”, siendo ésta una transformación a presión y temperatura constantes, que permite el cierre del ciclo en el punto que hemos tomado como inicial [15].

Los dos procesos de transferencia de calor no son difíciles de alcanzar en la práctica, porque al mantener una presión constante se fija de manera automática la temperatura de una mezcla de dos fases en el valor de saturación. Por consiguiente, los procesos 2-3 y 4-1 pueden ser aproximados en los evaporadores y condensadores reales. Sin embargo, los procesos 1-2 y 3-4 no pueden aproximarse lo suficiente en la práctica debido a que los procesos 1-2 incluyen la compresión de una mezcla líquido-vapor que requiere un compresor que manejaría dos fases, y los procesos 3-4 implican la expansión de un refrigerante con alto contenido de humedad.

La capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración, es decir, la rapidez de calor extraído del espacio refrigerado, con frecuencia se expresa en toneladas de refrigeración. La capacidad de un sistema de refrigeración que puede congelar una tonelada de agua líquida a 0 [°C] en hielo a 0 [°C] en 24 horas será una tonelada de refrigeración [2].

1.6 Refrigeración por compresión mecánica de vapor

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se emplea en refrigeradores, sistemas de aire acondicionado de aire y bombas de calor. Se compone de cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isoentrópica en un compresor
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

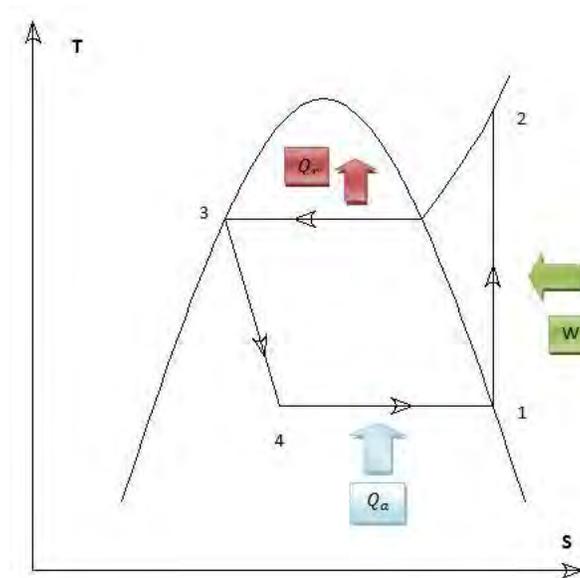


Figura3: Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor [2].

En un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra al compresor en el estado 1 como vapor saturado y se comprime isoentrópicamente hasta la presión del condensador. Durante el proceso de compresión isoentrópico, la temperatura del refrigerante aumenta hasta un valor bastante superior al de la temperatura del medio circundante. Después el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado en el estado 2 y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores. La temperatura del refrigerante en este estado se mantendrá por encima de la de los alrededores.

El refrigerante líquido-saturado en el estado 3 se estrangula hasta la presión del evaporador al pasar por la válvula de expansión. La temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso. El refrigerante ingresa al evaporador en el estado 4 como una mezcla saturada de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado. El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, con lo cual completa el ciclo [2].

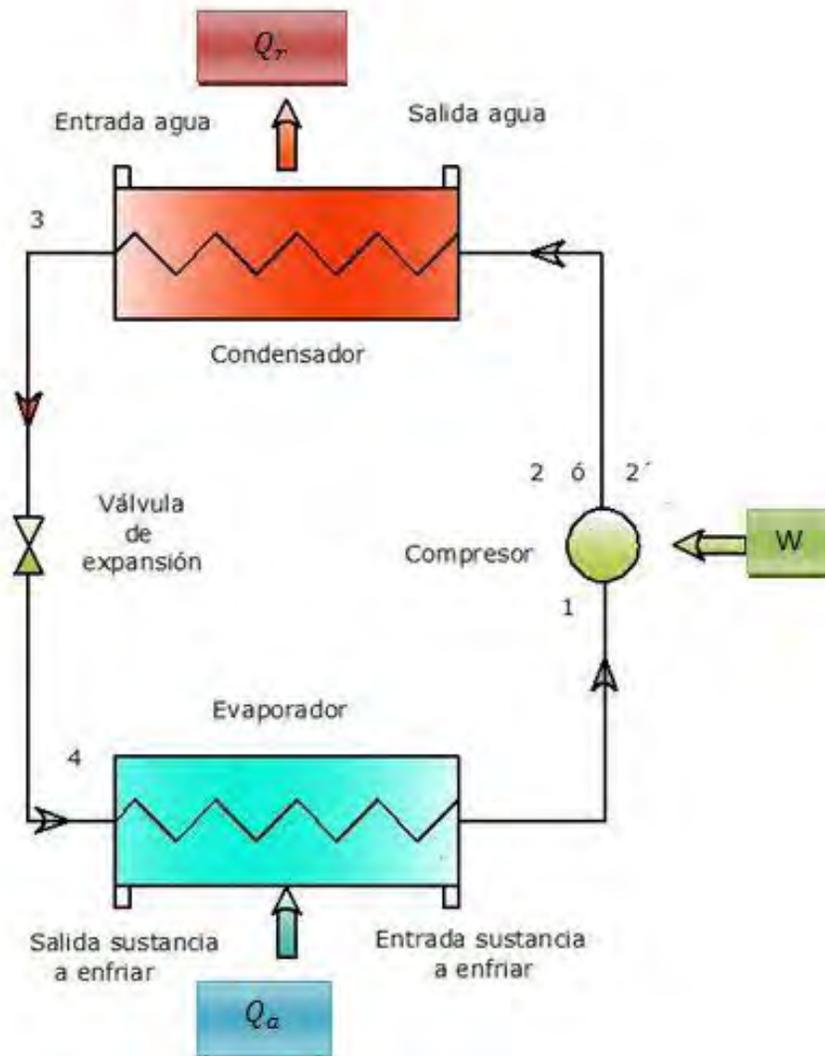


Figura 4: Sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor [5].

Al principio los sistemas de refrigeración por compresión de vapor eran grandes y su principal empleo era para producir hielo, carecían de control automático y eran accionados por una máquina de vapor. En la década de 1890 máquinas más pequeñas, activadas por motores eléctricos y equipados con control automático, empezaron a aparecer en las carnicerías y en las residencias. Por 1930, las mejoras continuas hicieron posible tener sistemas de refrigeración por compresión de vapor que eran eficientes, confiables, pequeños y económicos [2].



1.7 Refrigeración por absorción

Las máquinas frigoríficas de absorción se integran dentro del mismo grupo de refrigeración que las convencionales de compresión, ya que el efecto de refrigeración, o absorción de calor a baja temperatura, se consigue por evaporación de un líquido a baja presión. La diferencia entre estos dos métodos estriba básicamente, en el procedimiento seguido para la recuperación de los vapores formados durante el paso de líquido a vapor [15]

El sistema de absorción emplea el principio de que algunos vapores son absorbidos por determinadas sustancias, hay muchos pares de sustancias que tienen esta afinidad entre sí, todos nos damos cuenta de cómo la sal de mesa absorbe vapor de agua del aire, volviéndose así difícil de verter, otra combinación es el bromuro de litio (LiBr) y el agua, el LiBr absorbe gran cantidad de agua.

Consideremos un tanque parcialmente lleno con una solución líquida concentrada (contiene muy poca agua) de LiBr como se muestra en la figura 5, el espacio sobre el líquido está vacío, tiene tan poco gas como sea posible con lo que la presión es muy pequeña, se rocía agua en el tanque, debido a la baja presión, algo del agua se evaporará necesitando calor para hacerlo, bajo las toberas de aspersion se encuentra un serpentín por donde circula agua, esta agua suministra el calor necesario para evaporar la aspersion, y por lo mismo el agua se enfría, la temperatura a la cual se evapora el agua de aspersion depende de la presión en el tanque, de acuerdo con las relaciones de presión y temperatura de saturación para el agua.

El LiBr absorbe agua cuando ambos fluidos hacen contacto, al final el LiBr absorbe toda el agua que puede, la cantidad de vapor de agua se acumula en el tanque, elevando su presión y por lo mismo aumenta su temperatura de evaporación por sobre las temperaturas útiles para refrigerar. Para tener un sistema práctico de absorción que trabaje en forma continua, la solución diluida de LiBr se debe volver a concentrar y usar de nuevo.

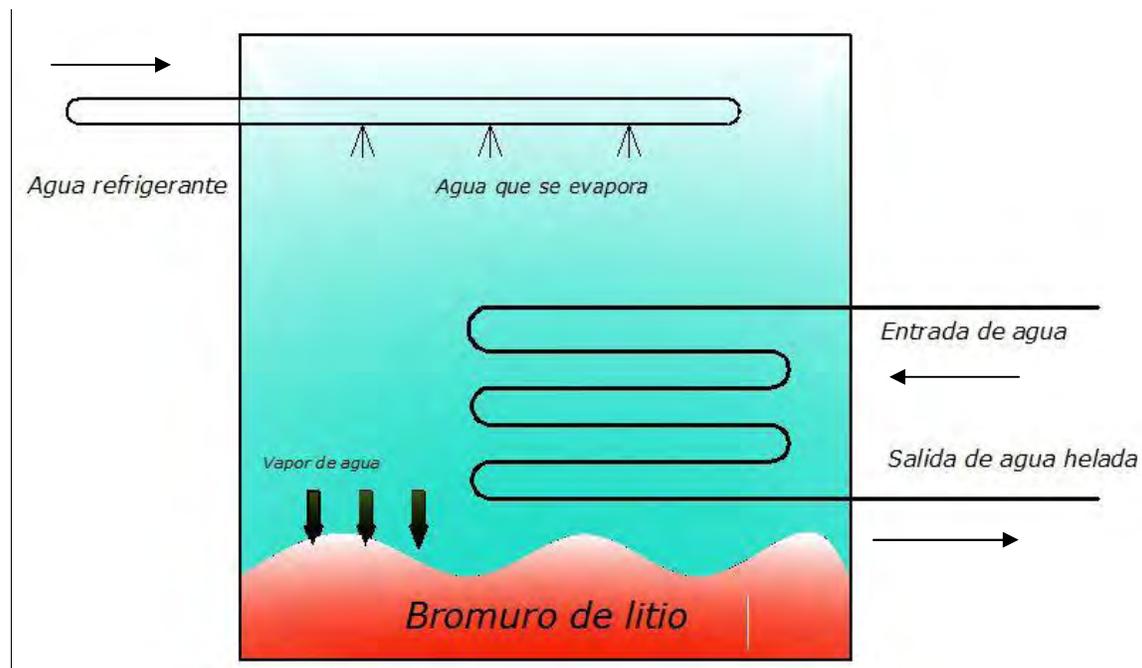


Figura 5: Principio de la refrigeración por absorción [13].

El ciclo de refrigeración por absorción emplea un refrigerante volátil, por lo común amoníaco (NH_3) o agua, el que alternativamente se vaporiza bajo la presión baja en el evaporador absorbiendo calor latente del material que está siendo enfriado y se condensa a la presión alta que se tiene en el condensador entregando el calor latente del medio condensante.

La principal diferencia entre los ciclos de absorción y de compresión, es la fuerza motivante que hace circular al refrigerante a través del sistema, y que proporciona el diferencial de presión necesario entre los procesos vaporizante y condensante, en el ciclo de absorción el compresor de vapor empleado en el ciclo de compresión de vapor es reemplazado por un absorbedor un generador y una bomba, el cual realiza todas las funciones que efectúa el compresor en el ciclo de compresión de vapor, además, mientras que la energía de entrada requerida en el ciclo de compresión de vapor es suministrada por el trabajo mecánico del compresor, la energía de entrada en el ciclo de absorción es en forma de calor suministrada directamente al generador, por lo general, la fuente de calor suministrada al generador es vapor de baja presión o agua caliente, aunque para los sistemas pequeños por lo general el calor se suministra por la combustión de un combustible adecuado, tal como gas natural, propano o petróleo destilado, directamente en el generador o por una resistencia eléctrica instalada en el generador.

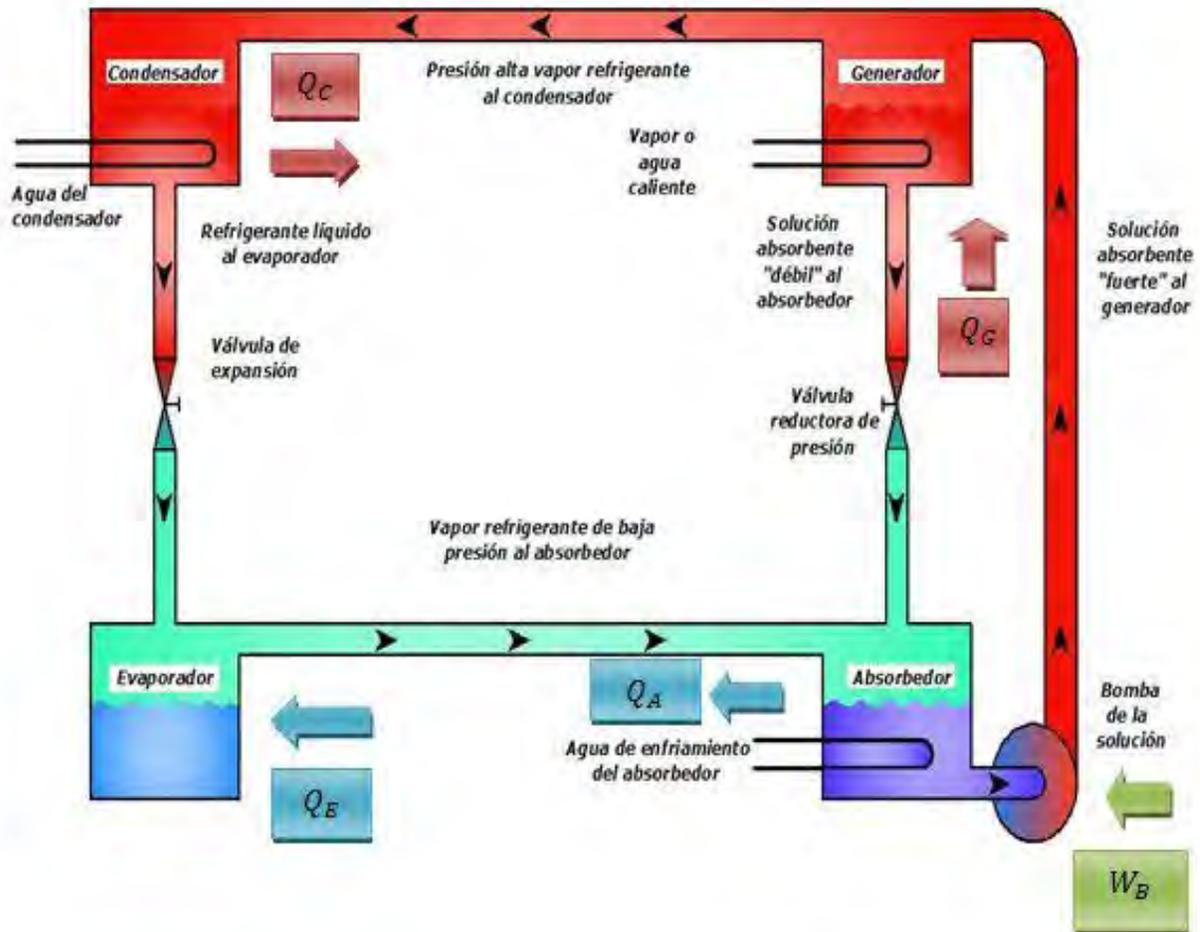


Figura 6: Ciclo básico de refrigeración por absorción [4].

El sistema consiste en cuatro componentes básicos como se muestra en la figura 6: un evaporador y un absorbedor, los cuales están localizados en el lado de baja presión del sistema y de un generador y condensador, los cuales están localizados en el lado de alta presión del sistema, se emplean dos fluidos, un refrigerante y un absorbente, el ciclo del flujo para el refrigerante es del condensador al evaporador posteriormente pasa al absorbedor seguido del generador y finalmente se regresa al condensador, mientras que el absorbente pasa del absorbedor al generador y se regresa al absorbedor.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



El refrigerante líquido de alta presión proveniente del condensador pasa a través de un dispositivo de expansión el cual reduce la presión del refrigerante hasta la presión baja que se tiene en el evaporador, el refrigerante líquido se vaporiza en el evaporador absorbiendo calor latente del material que está siendo enfriado, el vapor de baja presión así formado sale después del evaporador a través de un conducto hacia el absorbedor, en donde éste es absorbido y se queda en la solución junto con el absorbente.

El refrigerante fluye del evaporador al absorbedor porque la presión del vapor de la solución absorbente-refrigerante que se tiene en el absorbedor es menor que la presión del vapor refrigerante que se tiene en el evaporador, la presión del vapor de la solución absorbente-refrigerante que se tiene en el absorbedor determina la presión en el lado de baja presión del sistema y en consecuencia, la temperatura vaporizante del refrigerante en el evaporador, a su vez la presión del vapor de la solución absorbente-refrigerante depende de la naturaleza del absorbente, de su temperatura y de su concentración, a menor temperatura del absorbente y a mayor concentración (el menor porcentaje de refrigerante en la solución), se tendrá la menor presión en la solución.

A medida que el vapor refrigerante del evaporador es disuelto en la solución absorbente, disminuye el volumen del refrigerante. A fin de mantener la temperatura y la presión del vapor de la solución absorbente al nivel requerido, el calor liberado en el absorbedor, el cual es igual a la suma del calor latente de condensación del vapor refrigerante y del calor de la dilución del absorbente, deberá ser descargado a los alrededores, por lo general al mismo sumidero de calor o medio condensante utilizado para la descarga de calor del condensador.

A fin de que se efectúe la transferencia de calor del absorbedor al sumidero, la temperatura del absorbente deberá ser mayor que la que se tiene en el sumidero. Puesto que la eficiencia en el absorbedor aumenta a medida que se reduce la temperatura de la solución absorbente, se deduce que la eficiencia del absorbedor depende en parte de la temperatura del refrigerante disponible.

Debido a que el vapor refrigerante al disolverse en la solución absorbente aumenta la resistencia (porcentaje de refrigeración) y la presión del vapor de la solución, es necesario reconcentrar continuamente la solución a fin de mantener la presión del vapor de la solución a un nivel suficientemente bajo para proporcionar la presión y temperaturas bajas requeridas en el evaporador, la reconcentración se obtiene eliminando de continuo la solución absorbente "fuerte" del absorbedor recirculándola a través del generador, donde "hierve" la mayor parte del vapor refrigerante, por la aplicación de calor y la solución "débil" resultante es regresada al absorbedor para absorber más vapor refrigerante del evaporador.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



Ya que el absorbedor está en el lado de baja presión del sistema, y el generador en el lado de alta presión, la solución fuerte debe ser bombeada del absorbedor al generador, y la solución débil regresada del generador al absorbedor a través de una válvula reductora de presión, la presión de la solución absorbente es aumentada del lado de baja presión a la presión que se tiene en el lado de alta presión a medida que está siendo bombeada del absorbedor al generador, no se tendrá compresión del refrigerante en el proceso, ya que la compresión del refrigerante tiene que ser efectuada en el absorbedor, en consecuencia, la potencia requerida por la bomba de la solución es relativamente pequeña.

En el generador, el refrigerante es separado del absorbente mediante calentamiento de la solución y vaporización del refrigerante, el vapor refrigerante de alta presión obtenido pasa entonces al condensador, donde es condensado cediendo su calor latente al medio condensante, después de lo cual está listo para su recirculación en el evaporador.

La solución del absorbente débil que se queda en el generador es regresada al absorbedor por el tubo de retorno tal como antes se describió, la resistencia relativa de la solución débil es controlada por la cantidad de calor suministrada al generador.

Para tener la eficiencia máxima del sistema, el diferencial de presión entre los lados de baja y alta presión del sistema deberán mantenerse tan pequeño como sea posible, conservando la presión en el lado de baja presión tan alta como sea posible y que además sea consistente con los requerimientos de refrigeración y la presión en el lado de alta presión, tan baja como sea posible con el medio condensante disponible. La presión en el lado de baja presión es determinada principalmente por la presión en la solución del vapor absorbente, la cual a su vez depende de la temperatura y concentración de la solución, ya que el control de temperatura de la solución está limitado por la temperatura del agente refrigerante disponible, el control en el lado de temperatura y presión bajas (evaporador) se obtiene usualmente variando la concentración de la solución absorbente.

Se puede mejorar la eficiencia del sistema teniendo un cambiador de calor entre la solución fuerte que va al generador, y la solución débil de alta temperatura que regresa del generador hacia el absorbedor, ya que la temperatura de la solución fuerte que va al generador es aumentada, mientras que la temperatura de la solución débil que va al absorbedor se disminuye, el cambiador de calor proporcionará una reducción tanto en el calor suministrado al generador como el enfriamiento requerido por el absorbedor.



Además, como en el ciclo de compresión de vapor, se tiene formación de vapor en el refrigerante líquido, con las consecuentes pérdidas del efecto refrigerante, esto sucede a medida que el refrigerante líquido que viene del condensador, sufre una caída de presión a su paso a través del dispositivo de expansión, en su paso al evaporador. Por lo tanto, se aumentará el efecto refrigerante y se mejorara la eficiencia del sistema con el subenfriamiento del refrigerante líquido que va del condensador al evaporador, instalando un cambiador de calor con el vapor refrigerante de temperatura baja que va del evaporador al absorbedor [4].

Una característica del sistema de refrigeración por absorción, es que se requiere muy poco trabajo mecánico para hacer funcionar la unidad. En vez de gran cantidad de energía mecánica consumida por el compresor del sistema de compresión de vapor, sólo una pequeña cantidad de trabajo mecánico se gasta en la bomba. El costo principal del funcionamiento es el costo de la energía térmica consumida en el generador [14].

Con la finalidad de desarrollar ecuaciones que nos permitan obtener, balances de masa y de energía, para cada una de las etapas del sistema de refrigeración por absorción, a continuación se presenta un esquema básico de una máquina frigorífica por absorción.

Los vapores del refrigerante producidos en el evaporador (pto. "1"), son aspirados hacia el absorbedor debido a la afinidad que por estos muestra una solución "pobre" en refrigerante, produciendo una mezcla rica en este componente (pto. "5") a baja presión, por lo que para recuperar el refrigerante, esta solución debe ser comprimida hasta el nivel de alta presión, proceso que tiene lugar en la bomba de la solución (pto. "6"). En estas condiciones se introduce en generador, en el que por adición de calor tiene lugar la separación; por un lado vapores de refrigerante (pto. "2"), y por otro la solución líquida restante pobre en refrigerante (pto. "7") que se lleva nuevamente al absorbedor para aprovechar su avidéz por los vapores de refrigerante puro, ahora bien, dado que esta solución pobre se encuentra a alta presión, debe expandirse (pto. "8"), previamente a su entrada al absorbedor, para alcanzar la baja presión reinante en este equipo, los vapores de refrigerante son condensados en un intercambiador por cesión de calor a un agente externo, con lo que se obtiene un caudal líquido de refrigerante a alta presión (pto. "3"), el paso a través de un expansor produce la baja presión y una vaporización parcial de éste, con lo que a la salida del órgano de estrangulación (pto. "4") coexisten las fases líquida y de vapor. Es la fracción líquida la que se encuentra en condiciones de absorber calor (producción de frío) en el evaporador de la instalación, mediante su ebullición, con lo que a la salida de este intercambiador (pto. "1") el estado es de vapor saturado o recalentado. En la figura 6 se observa la cesión de calor al exterior de una potencia térmica en el absorbedor, lo que se debe al proceso exotérmico que tiene lugar en la mezcla de vapores de refrigerante y solución pobre procedente del generador.

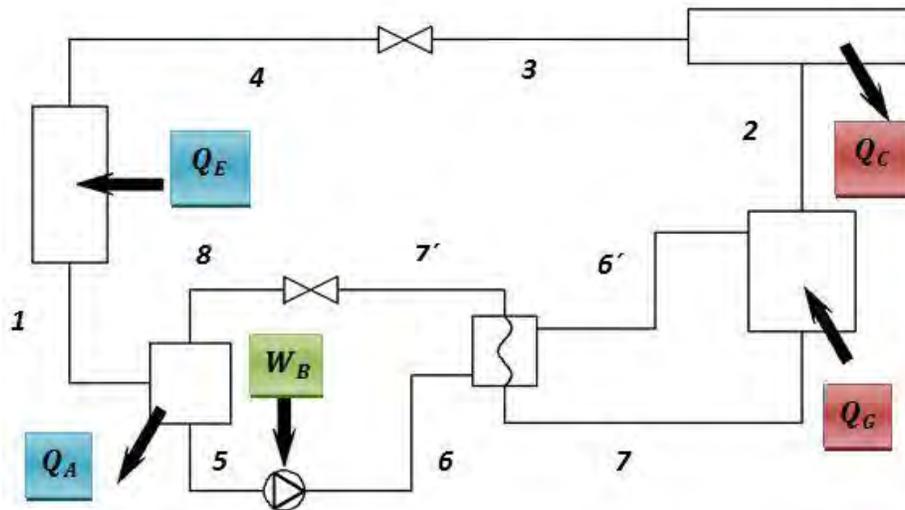


Figura 7: Esquema básico de una máquina frigorífica de absorción [15].

1.7.1 Sistema NH_3 -Agua. Los sistemas NH_3 -agua son muy usados en refrigeradores domésticos y en sistemas comerciales e industriales, donde la temperatura en el evaporador es muy cercana o por debajo de los $0\text{ }^\circ\text{C}$. La combinación NH_3 -agua es excepcionalmente buena, satisface algunos de los criterios más importantes pero tiene algunas pequeñas fallas. El absorbente agua tiene una gran afinidad por el vapor de NH_3 , y los dos son sumamente solubles en un rango muy amplio de condiciones de operación. Ambos fluidos son altamente estables y son compatibles con casi todos los materiales que se encuentran en los sistemas de refrigeración. El refrigerante NH_3 tiene un calor latente de valor alto, pero es ligeramente tóxico, lo cual limita su uso en aplicaciones de aire acondicionado, así como las presiones de operación son relativamente altas. Probablemente la principal desventaja de este sistema es el hecho de que el absorbente (agua) es razonablemente volátil, de modo que el vapor refrigerante (NH_3) al salir del generador por lo general contiene cantidades apreciables de vapor de agua, las cuales al pasar a través del condensador hacia el evaporador, se aumentará la temperatura del evaporador y reducirá el efecto refrigerante por tenerse refrigerante no vaporizado fuera del evaporador. Por esta razón la eficiencia del sistema NH_3 -agua puede mejorarse usando un analizador y un rectificador cuya función es la de eliminar el vapor de agua a la salida del generador antes de que llegue al condensador, como se muestra en la siguiente figura [4].



Un fenómeno importante en el sistema LiBr es la cristalización, si el LiBr se concentra demasiado, pasa de líquido a forma sólida, (cristalina). La concentración máxima posible disminuye a medida que baja la temperatura de la solución. Por lo tanto, si una solución que se aproxima a su concentración máxima se le baja la temperatura, ésta se cristalizará, o solidificará.

Éste es un serio problema en los sistemas de absorción porque, si se presenta, el LiBr cristalizado obstruye la tubería y la máquina cesa de trabajar. Hay tres factores que pueden ocasionar una caída de temperatura de la solución:

- Falla de corriente.
- Temperatura del agua de condensación demasiado baja.
- Fugas de aire en el sistema

Si se presenta la cristalización, es necesario calentar la tubería donde se haya bloqueado [13].

1.8 REFRIGERANTES

El refrigerante es una sustancia que es capaz de producir un efecto de enfriamiento sobre el medio que lo rodea, sea un espacio o un cuerpo y que de manera general fluye y evoluciona en un ciclo al interior de un circuito de una máquina frigorífica. En el caso de refrigeración por medio de vaporización, estas sustancias deben tener una temperatura de ebullición, a presión normal, inferior a la temperatura ambiente.

Para cada uno de los diferentes métodos de refrigeración existen para determinadas condiciones de funcionamiento, uno o varios refrigerantes apropiados que garantizan un óptimo de eficiencia y seguridad, en relación con sus propiedades químicas y físicas, existiendo ciertas condiciones mínimas y propiedades que deben satisfacer, tales como:

- *Comportamiento indiferente frente a los materiales utilizados.*
El refrigerante no debe combinarse o reaccionar con los materiales utilizados para la construcción de la máquina frigorífica.
- *Estabilidad química.*
El refrigerante no debe sufrir ningún tipo de transformación química dentro del dominio de temperaturas y presiones de operación.
- *Ausencia de toxicidad.*
Es importante que el refrigerante no tenga efectos nocivos sobre la salud, ni sobre el medio.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



- *No debe ser explosivo ni inflamable.*
Por motivos de seguridad se exige que el refrigerante este operado fuera de los dominios de peligrosidad, en lo referente a los riesgos de explosión y flamabilidad.
- *Fácil detección de fugas.*
Por aspectos de seguridad, operación y economía, es necesario que la circulación del refrigerante se realice en conductos herméticos y que las fugas en caso de ocurrir sean inmediatamente detectadas, prefiriéndose aquellos refrigerantes que tengan un olor penetrante.
- *Ningún efecto sobre el lubricante.*
Si en el circuito del ciclo de refrigeración se utiliza algún tipo de lubricante, el refrigerante no debe ocasionar ningún cambio químico, ni influir en sus propiedades lubricantes.
- *La presión de evaporación debe ser superior a la presión atmosférica.*
En el caso de la refrigeración por vaporización, la presión de vapor del refrigerante debe ser dentro de lo posible algo superior a la presión atmosférica. De esta manera se evita la introducción de aire al interior del sistema.
- *Baja presión de condensación.*
La generación de altas presiones de condensación, requiere de estructuras que soporten esta presión, aumentando el costo. Se sugiere trabajar el refrigerante a condiciones de operación no muy próximas del punto crítico, con el objeto de realizar más fácilmente la condensación.
- *Gran potencia frigorífica específica.*
Entre mayor sea su capacidad o potencia de enfriamiento, se requerirá una menor cantidad de refrigerante en circulación para una potencia de enfriamiento determinada.
- *Costo y disponibilidad.*
El refrigerante no debe ser muy costoso y debe estar disponible en el mercado, sobre todo si se requiere de un abastecimiento continuo, como en el caso de los ciclos de refrigeración abiertos.
Es necesario reconocer que no existe un refrigerante ideal que cumpla con todos los requerimientos antes mencionados, para cada uso específico. El criterio inicial para la selección de un refrigerante es definir los límites térmicos en los cuales debe operar.
Las propiedades de los refrigerantes son también un punto importante a considerar durante su selección, entre ellas se tienen:
- *Propiedades térmicas.*
Las propiedades térmicas en general, permiten conocer el comportamiento de las sustancias frente a los cambios de estado o bien el análisis de los diferentes factores externos que intervienen para que estos cambios se produzcan.



- *Presión de vapor.*
Para compuestos puros, el equilibrio entre las fases de refrigerante líquido y el refrigerante vapor, permite determinar la temperatura de evaporación y de condensación, así como la presión en función de estas temperaturas.
- *Volumen específico y densidad.*
El volumen específico es el valor inverso de la densidad, y ambos varían en función de la temperatura y de la presión, siendo más importante este efecto si el refrigerante se encuentra en fase de vapor. Conociendo el volumen específico se puede determinar la cantidad de vapor generado por la vaporización de una cierta cantidad de refrigerante líquido.
- *Calor específico.*
El calor específico indica la cantidad de calor necesaria para absorberse o disiparse, para obtener la variación de un grado de temperatura de una cierta masa de una sustancia.
- *Calor latente.*
El calor latente indica la cantidad de calor necesaria por unidad de masa de la sustancia, para efectuar la transición de un estado de agregación a otro. En el caso de los refrigerantes existen grandes variaciones de estos calores [12].

1.9 Absorbente

El absorbente puede ser líquido o sólido, y la operación puede ser continua o intermitente, si la operación es continua una bomba o un gas inerte puede ser usado para la circulación del refrigerante. Los sólidos absorbentes más comunes son el cloruro de calcio, bario y estroncio. Sílica gel, hecha de silicatos de sodio, ácido sulfúrico y carbón activado. El mejor sólido absorbente es el que no se ve afectado por la continua presencia de refrigerante, el que es un buen conductor de calor y el que es capaz de mantener grandes cantidades de refrigerante por unidad de peso. Naturalmente si la máquina utiliza un absorbente sólido, el problema de destilación es muy simple, basta con volatilizar el refrigerante y llevarlo después hasta el condensador, sin embargo, si el absorbente es un líquido, como agua y especialmente si los dos líquidos se vaporizan a temperaturas similares, el problema llega a ser mayor requiriéndose de varios pasos antes de llevar el refrigerante al condensados [4].

1.9.1 Combinaciones refrigerante-absorbente. Para que sea adecuado usar un sistema de refrigeración por absorción, se tienen ciertos criterios que la combinación refrigerante-absorbente debe de satisfacer, por lo menos en cierto grado. Obviamente que el absorbente tenga una afinidad fuerte por el vapor refrigerante, y los dos deben en cierto grado ser mutuamente solubles en el rango deseado de condiciones de operación, los dos fluidos deben ser seguros, estables y no corrosivos tanto por separado como combinados. Idealmente el absorbente debe tener baja volatilidad, de tal manera que el vapor refrigerante a la salida del generador deberá contener poco



o nada del absorbente, y las presiones de trabajo deberán ser razonablemente bajas y de preferencia cerca de la presión atmosférica, para minimizar peso de equipo y fugas hacia adentro y fuera del sistema. El refrigerante deberá tener un valor de su calor latente razonablemente alto, de modo que la razón requerida de flujo refrigerante no resulte ser excesiva [4]. El refrigerante y el absorbente en un ciclo de refrigeración por absorción forman lo que se denomina un par de sustancias de trabajo. A continuación se mencionan algunos pares de sustancias de trabajo utilizados en sistemas de absorción.

El par agua-amoniaco es el más conocido, tiene una gran variedad de aplicaciones desde refrigeradores comerciales hasta sistemas de refrigeración. Mayormente se encuentra en aplicaciones de refrigeración, con bajas temperaturas de evaporación inferiores a 0 [°C]. Una de sus desventajas es la evaporación del agua junto con el refrigerante, lo que evita tener un buen efecto de enfriamiento, degradando su eficiencia.

El par agua-bromuro de litio se emplea extensamente en aplicaciones de refrigeración para producir agua fría y aire acondicionado, donde no es necesario enfriar por debajo de 0 [°C]. El agua tiene el calor latente de vaporización más altos de todos los líquidos. Dentro de las desventajas de este par está su baja presión de trabajo, la corrosión a los metales y que el bromuro de litio no es soluble en agua en un rango muy alto de concentraciones.

Los pares agua-sales inorgánicas. Las sales consideradas dentro de estos pares de trabajo son el cloruro de calcio, cloruro de litio y nitrato de litio. Las mezclas de sales inorgánicas son excelentes debido a que no tienen presión de vapor, sin embargo, sólo son solubles en agua en un rango limitado de concentraciones.

El par alcohol-agua, se puede utilizar el metanol y el etanol, el metanol tiene el calor latente de vaporización mayor de los dos alcoholes y se ha utilizado también con el bromuro de litio. Tiene la ventaja contra el agua-bromuro de litio de operar bajo los 0 [°C], pero el metanol es tóxico, flamable y corrosivo a altas temperaturas.

En los pares de amoniaco y aminas con sales inorgánicas, el tiocianato de sodio, tiocianato de litio, nitrato de litio, y cloruro de calcio son los que más se han usado con amoniaco. Las aminas se han investigado como sustitutos del amoniaco, tales como la metilamina, etilamina y dimetilamina. La más atractiva es la metilamina, ya que presenta un calor latente de vaporización alto, buena estabilidad, presión de vapor menor al amoniaco y no requiere rectificación. Su desventaja es la viscosidad a temperatura ambiente [11].



1.10 Propiedades de las sustancias de trabajo

Es de suma importancia analizar las características y propiedades de las sustancias de trabajo, antes de realizar el experimento a fin de evitar accidentes, en este caso las sustancias son amoníaco (NH_3) y cloruro de cobre (CuCl_2), estas características y propiedades se muestran a continuación:

1.10.1 NH_3 . El NH_3 es el refrigerante más extensamente empleado particularmente en la industria y en refrigeración comercial. Cuando esta libre de agua se le conoce como amoníaco anhidro y cuando está mezclado con agua (como se le usa en los sistemas de refrigeración por absorción) se le conoce como agua amoniacal. Su calor latente es excepcionalmente alto, arriba de 5.58 [Kcal/mol]. La lubricación no presenta dificultades con el amoníaco al seleccionar aceites minerales adecuados. El agua mezclada con el amoníaco no se congela en las válvulas de expansión; para otros refrigerantes si puede tenerse congelamiento [9].

Es un gas incoloro con olor característico, muy soluble en agua. El gas es más ligero que el aire, en caso de fuga o descompresión rápida de este gas, existe el riesgo de congelamiento por contacto debido a que se almacena a presión como líquido. El amoníaco se utiliza principalmente como fuente de nitrógeno en la generación de fertilizantes, como refrigerante, en la manufactura de ácido nítrico y otros reactivos químicos como ácido sulfúrico, cianuros, amidas, nitritos e intermediarios de colorantes; como fuente de nitrógeno en la producción de monómeros de fibras sintéticas y otros plásticos.

Propiedades químicas: El amoníaco es estable a temperatura ambiente, pero a altas temperaturas se descompone en hidrógeno y nitrógeno. La velocidad de descomposición depende del material donde se encuentre almacenado. Generalmente, las disoluciones con concentraciones inferiores a 5% no producen vapores inflamables a ninguna temperatura. Conexiones accidentales que pongan en contacto oxígeno y amoníaco en forma gaseosa, generan explosiones violentas. Por otra parte, pueden presentarse reacciones violentas e incluso explosivas entre amoníaco y los siguientes reactivos: acetaldehído, boro, haluros de boro, calcio, ácido clórico, monóxido de cloro, cromo, cloruro de cromo entre otros. El amoníaco reacciona con mercurio en presencia de trazas de agua, generando compuestos explosivos, por lo que no debe utilizarse manómetros con mercurio al trabajar con amoníaco, pues existe el riesgo de explosión al despresurizar el sistema. En general, el amoníaco es incompatible con muchos compuestos como: sales de oro y plata, halógenos, metales alcalinos, clorato de potasio, haluros de oxígeno entre otros. Las disoluciones acuosas de amoníaco generan amoníaco gaseoso y en general son incompatibles con ácidos, cobre, aleaciones de cobre, hierro galvanizado y aluminio.



Tabla 1: Propiedades físicas y termodinámicas del amoniaco

Propiedades físicas y termodinámicas		
Fórmula (Anhidro)		NH_3
Punto de ebullición	-33.35	[°C]
Punto de congelación	-77.7	[°C]
Densidad líquido (-33.35 °C y 1 atm)	0.6818	
Presión de vapor (a 25°C)	760	[mm Hg]
Temperatura de auto ignición	651	[°C]
Solubilidad en agua (% en peso)	33.1	[0°C]
Calor específico (0 °C)	2097.2	[J/kg K]
Calor de formación del gas (0 K)	-39.2	[KJ / mol]
Calor de vaporización	5.58	[Kcal / mol]
Capacidad calorífica (25°C)	8.38	[cal / mol / °]
Peso molecular	17.03	[g/mol]
Composición		N 82.25 % H 17.75 %

[18]

1.10.2 CuCl_2 . El CuCl_2 es un sólido en forma de cristales verdes delicuescentes, soluble en agua y alcohol. Su obtención es mediante carbonato de cobre tratado con ácido clorhídrico, cristalizando el producto. Es tóxico por ingestión e inhalación, se usa principalmente en la pirotecnia, preservación de la madera, desulfurante de fracciones del petróleo, como pigmento para vidrio y cerámica, teñido y estampado de tejidos etc.



Tabla 2: Propiedades físicas y termodinámicas del cloruro de cobre

Propiedades físicas y termodinámicas		
Fórmula	$\text{CuCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$	
Punto de ebullición	Pierde $2\text{H}_2\text{O}$ a 100	[°C]
Solubilidad en agua	73 [g] en 100 [ml] de agua	
Densidad sólido	3.386	[kg/L] a 20 [°C]
Peso molecular	170.48	[g/mol]
Concentración	99%	

[7]

1.11 Disoluciones

Muy pocos de los materiales que encontramos en la vida diaria son sustancias puras; la mayoría de ellos son mezclas. Muchas de estas mezclas son homogéneas; esto es, que sus componentes están distribuidos uniformemente a nivel molecular. Las mezclas homogéneas se denominan disoluciones (soluciones), un ejemplo de disoluciones son el aire que respiramos, es una mezcla de varias sustancias gaseosas, los océanos son una disolución de muchas sustancias disueltas en agua, así como los líquidos que corren a través de nuestro cuerpo son disoluciones y contienen una gran variedad de nutrientes esenciales, sales etcétera.

Las disoluciones pueden ser gaseosas, líquidas o sólidas. Una disolución se forma por un solvente y uno o varios solutos, el solvente es el componente cuya fase se conserva cuando se forma la disolución, si todos los componentes se encuentran en la misma fase, el solvente es aquel que se encuentra en mayor cantidad.



Tabla 3: Ejemplos de disoluciones.

Estado de la disolución	Estado del solvente	Estado del soluto	Ejemplo
Gas	Gas	Gas	Aire
Líquido	Líquido	Gas	Oxígeno en agua
Líquido	Líquido	Líquido	Alcohol en agua
Líquido	Líquido	Sólido	Sal en agua
Sólido	Sólido	Gas	Hidrógeno en platino
Sólido	Sólido	Líquido	Mercurio en plata
Sólido	Sólido	Sólido	Plata en oro

La concentración de una solución se puede expresar ya sea cualitativamente o cuantitativamente. Los términos diluido y concentrado se utilizan para describir una disolución cualitativamente. Una disolución con una concentración relativamente pequeña de soluto se dice que está diluida; una disolución en la cual existe una gran concentración se dice que está concentrada.

Una forma de expresar cualitativamente la concentración de una solución es el porcentaje en peso, y está dado por la ecuación:

$$\text{Porcentaje en peso del componente} = \frac{\text{Masa del componente en la solución}}{\text{Masa total de la solución}} \times 100$$

Una disolución se forma cuando una sustancia se dispersa uniformemente en otra sustancia, cuando ocurre el proceso de disolución en que participa un soluto sólido, y la concentración de las partículas del soluto en la disolución aumenta, crece la posibilidad de que éstas choquen contra la superficie del sólido que contiene a la disolución, éstas coaliciones pueden dar como resultado que las partículas del soluto permanezcan fijas al sólido (recipiente) ocasionando el proceso opuesto al de disolución llamado, cristalización.

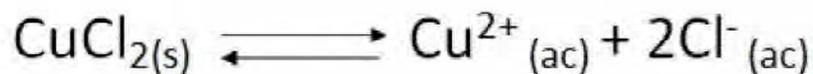
El estudio de la química se simplifica al clasificar las sustancias en grandes categorías, por lo general las categorías son contrarias como en el caso de los ácidos y las bases. La clasificación de sustancias en ácidos fue sugerida originalmente por su sabor agrio, aquellas sustancias que podían invertir o neutralizar la acción de los ácidos fueron consideradas como bases. Un concepto general más consistente para los ácidos y las bases es la teoría de Lewis de los ácidos y las bases, Lewis



propuso una definición de ácido y base que pone de relevancia los pares de electrones compartidos: *Un ácido se define como un receptor de un par de electrones y una base como un donador de un par de electrones*. Los ácidos tienden a reaccionar con las bases tal es el caso de la hidratación, en donde hay una interacción ácido-base y donde la molécula de agua actúa como base de Lewis [1].

Cuando los electrones de un átomo son removidos ya sea, cedidos o ganados hacia un átomo o molécula eléctricamente neutro, una partícula llamada ion es formada, un ion con una carga negativa es llamado anión, y un ion con una carga positiva es llamado catión "(Chang 1994)". Una propiedad característica de los iones metálicos es la de poder actuar como ácidos de Lewis, o receptores de pares de electrones con las moléculas de agua o de NH_3 que actúan como bases de Lewis, o donadores de pares de electrones.

En el caso de CuCl_2 , el cloruro de cobre se disuelve en presencia de amoníaco. Este proceso se puede apreciar como la suma de dos reacciones, en primer lugar hay un equilibrio de solubilidad en agua del CuCl_2 , y en segundo lugar hay una interacción ácido-base de Lewis entre Cu_2^+ y NH_3 .



hidratación del CuCl_2 .

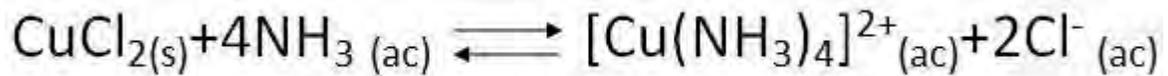
La presencia del NH_3 desequilibra la solubilidad inicial entre el agua y el CuCl_2 , pasando de tener Cu_2^+ en estado acuoso a tener $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, para una base de Lewis como lo es el NH_3 , para poder interactuar con los iones metálicos en soluciones acuosas es necesario que el NH_3 desplace a las moléculas de H_2O .



Formación de un ion complejo



Finalmente sumando las semireacciones, en primer lugar la hidratación del CuCl_2 y en segundo lugar la formación del ion complejo cuando interacciona el NH_3 tenemos:



Suma de las semirreacciones

Se le da el nombre de ion complejo a la unión de un ion metálico con una de las bases de Lewis, tal como el $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ [2]. Uno de los fenómenos más comunes que ocurren cuando se forman iones complejos es el cambio de color en la solución, para el caso de $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ también llamado tetraaminocuprato (II), se torna de color azul profundo y presenta una forma estructural:

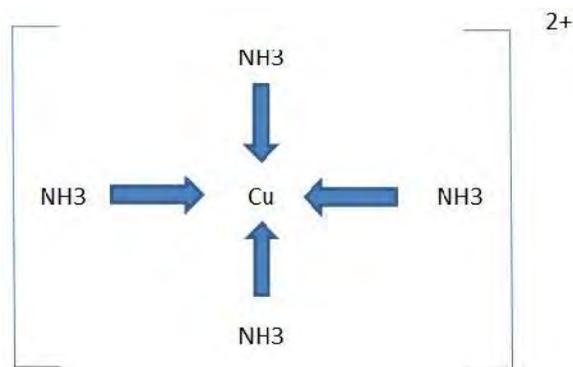


Figura 9: Fórmula estructural del ion Tetraaminocuprato (II) [16].



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



OBJETIVOS



II. OBJETIVOS

2.1 objetivo general. Como se mencionó anteriormente, el propósito de este trabajo es sentar las bases para desarrollar un par de sustancias de trabajo utilizando cloruro de cobre y amoníaco para su aplicación en un sistema de refrigeración por absorción. El objetivo general de éste trabajo fue evaluar experimentalmente la absorción existente entre el cloruro de cobre y una solución amoníaco-agua, motivados por las perspectivas que en estos momentos presenta la refrigeración por absorción y debido a las necesidades de refrigeración que actualmente se tienen en el país.

2.2 objetivos particulares. Los objetivos particulares que se derivan del anterior son:

- Determinar la cantidad de vapor de solución de amoníaco absorbido por el cloruro de cobre.
- Verificar si hay capacidad de enfriamiento resultado de la interacción entre el CuCl_2 y la solución $\text{H}_2\text{O-NH}_3$.
- Cuantificar el incremento en la temperatura en la solución absorbente al presentarse la absorción.

2.3 Justificación.

La refrigeración por absorción representa una gran promesa para extender los beneficios de la refrigeración en áreas que no cuentan con suministro de electricidad, aunado a las preocupaciones ambientales debidas a la emisión de contaminantes y residuos de combustión que tienen lugar en la generación de energía eléctrica, hacen interesante el desarrollo de vías alternativas de enfriamiento. Sin embargo, la refrigeración por absorción no ha logrado tener todavía todo lo deseable de simplicidad y bajo costo.

Una opción de solución en cuanto a la simplicidad, es la reducción en los elementos que componen el ciclo de refrigeración por absorción, éste no es el caso de la mezcla amoníaco-agua en donde es necesario para tener un buen efecto de enfriamiento, agregarle al sistema al menos dos elementos más, un rectificador y un analizador. En el caso de la mezcla bromuro de litio-agua, las principales desventajas es por un lado el no poder alcanzar temperaturas por debajo de los 0°C debido a que el refrigerante utilizado es agua, y por otro lado se necesita tener consideraciones especiales en el diseño ya que puede presentarse la cristalización.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



Como se pudo observar en la revisión bibliográfica, los pares de sustancias utilizados en los sistemas de refrigeración por absorción que operan actualmente son los mismos en la mayoría de los casos, amoníaco-agua y bromuro de litio-amoniaco ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{LiBr-H}_2\text{O}$), algunos otros pares de sustancias de trabajo están siendo investigados como lo son: cloruro de estroncio-amoniaco ($\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$), nitrato de litio-amoniaco ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$) y tiocianato de sodio-amoniaco ($\text{NH}_3\text{-NaSCN}$). Por otro lado en la bibliografía consultada se encontró que las sales metálicas presentan una cierta afinidad por los vapores de amoniaco, tal es el caso de el cloruro de plata y el cloruro de cobre, en el caso del cloruro de plata, fue ésta sustancia en la que inicialmente se desarrollaron las bases de la refrigeración por absorción, la ventaja que pueden presentar estas sustancias son que no se necesitaría la adición de un rectificador ni de un analizador en el ciclo. En el aspecto económico entre éstas 2 sustancias, se llevó a cabo una cotización entre ambas y se escogió analizar el cloruro de cobre debido a que su costo es 10 veces menor.

De acuerdo a la revisión que se realizó, se concluye que es una buena opción seguir trabajando en la investigación de nuevos pares de sustancias ya que presentan buenas perspectivas de desarrollo, así en el presente trabajo se analiza la absorción existente entre el cloruro de cobre y amoniaco.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



MATERIALES

Y MÉTODOS



III. MATEIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del equipo experimental

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de física experimental de la Facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria. Para el desarrollo de este trabajo se contó con material de laboratorio como lo son 2 matraces, uno de los cuales fue un matraz Erlenmeyer y el otro un matraz kitasato, con una capacidad de 250 y 200 [ml] respectivamente, una balanza granataria y un termómetro.



Figura 10: Matraces Erlenmeyer y Kitasato.



Figura 11: Balanza granataria de un solo plato



Un tubo en “U” de vidrio pyrex con un diámetro interno de 4 [mm], longitud de 30 [cm] y altura de 15 [cm] con una llave de paso de plástico en el centro y 2 tapones de corcho, uno en cada extremo como se muestra en la figura.



Figura 12: Llave de paso con tubo en “u” y tapones de corcho.

Un manómetro diferencial con un rango de 0-30 [in Hg] vacuométricas.



Figura 13: Manómetro diferencial.



Figura 14: Bomba de vacío de $\frac{1}{2}$ [HP].



Finalmente se utilizaron 100 [g] de CuCl_2 , y una solución de amoníaco-agua.



Figura 15: cloruro de cobre y solución de amoníaco.

3.2 Descripción del experimento

El experimento propuesto se basa en el fenómeno de absorción que presentan algunos pares de sustancias, en este trabajo se evaluó experimentalmente la afinidad entre un compuesto CuCl_2 (absorbedor) y una solución amoníaco-agua (refrigerante).

En el matraz Erlenmeyer se colocó la solución amoníaco-agua mientras que en el matraz Kitasato se colocó el compuesto CuCl_2 . Como se mencionó anteriormente el amoníaco es un compuesto volátil, por lo que, al descender la presión al recipiente que contiene al NH_3 se facilita su evaporación, y con esto se alcanza en dicho espacio un efecto de refrigeración.

Con la ayuda de la bomba de vacío, y una vez que se colocó tanto al compuesto como a la solución en cada uno de los matraces, por medio de la boquilla del matraz Kitasato se le aplicó un vacío al sistema mientras la llave de paso se mantenía cerrada, (nótese que de un lado del arreglo se alcanzó una presión vacuométrica y del otro lado se mantuvo la presión atmosférica).

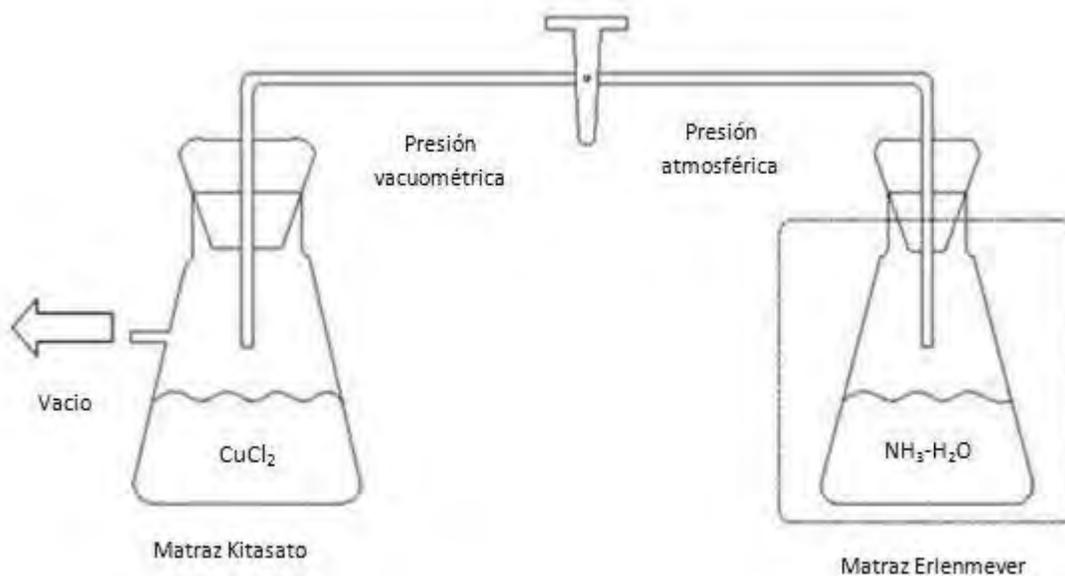


Figura 16: Arreglo general del experimento

Una vez que se alcanzó el vacío en el arreglo y con la bomba apagada, se procedió a abrir la llave de paso y así facilitar la evaporación del amoníaco contenido en la solución $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, lo que ocasionó que el vapor de amoníaco fluyera (debido a la diferencia de presiones en el sistema) del matraz Erlenmeyer hacia el matraz Kitasato el cual contenía al compuesto absorbente. Al hacer contacto el vapor de amoníaco con el compuesto CuCl_2 se presentó el fenómeno de absorción. Este experimento se repitió cuatro veces, variando en cada una de ellas la concentración del compuesto absorbente.

Durante el experimento se registraron cambios en las magnitudes físicas de temperatura y masa, para llevar a cabo estos registros se midieron la cantidad de masa de la solución amoníaco-agua y del compuesto CuCl_2 antes de cada experimento, así como también las temperaturas de cada una de las sustancias. Al finalizar cada etapa del experimento se registraron nuevamente la temperatura de cada sustancia, así como de la masa del nuevo compuesto absorbente obtenido en el matraz Kitasato (tetraaminocuprato II) producto del fenómeno de absorción. Cada una de las etapas del experimento se realizó bajo una presión vacuométrica de 22 [in Hg], y en cada una de las etapas se fue variando la concentración del compuesto absorbente.

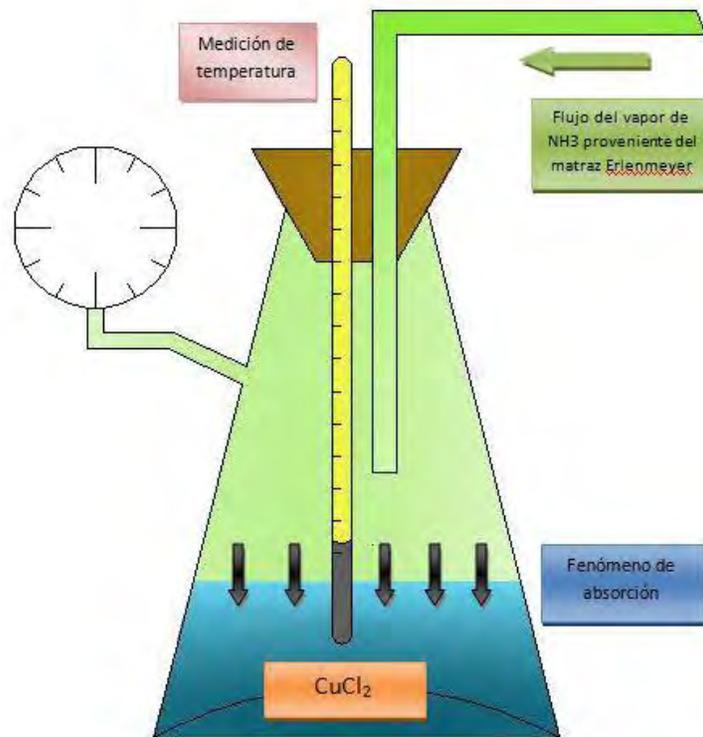


Figura 17: Medición de temperatura y presión.

En la primera prueba del experimento se dispuso de 10 [g] de CuCl_2 , en el matraz Erlenmeyer se colocaron 150 [ml] de refrigerante, una vez teniendo cada sustancia en cada uno de los matraces sellados con los tapones de corcho, se procedió a aplicar un vacío al sistema, al alcanzar 22[in Hg] vacuométricas y con la bomba apagada se abrió la llave de paso, al cabo de 2 minutos se registraron los datos de temperatura y masa y se dio por concluida esta primera prueba.



Figura 18: Primera etapa del experimento.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



En la segunda etapa del experimento se utilizó una solución acuosa de CuCl_2 como absorbente, esta solución consistió en 70% CuCl_2 con 30% de agua, se midió la masa de la solución absorbente y se realizó el mismo procedimiento que en la etapa anterior, la llave se mantuvo cerrada hasta alcanzar una presión de 22 [in Hg] vacuométricas en el sistema, posteriormente se abrió la llave de paso durante un tiempo de 2 minutos, al alcanzar los dos minutos se cerró la llave, se midió la temperatura en el matraz que contenía al refrigerante y en el matraz que contenía al absorbente así como la masa de la solución absorbente.

Durante el desarrollo de las diferentes etapas del experimento se fue variando la concentración de la solución absorbente, para ello se utilizó la ecuación del *porcentaje en peso* descrita anteriormente.

- Para esta segunda etapa se utilizó una solución al 70% de CuCl_2 :

$$\text{Porcentaje en peso del componente} = \frac{17 [\text{g}] \text{CuCl}_2}{\{17 [\text{g}] \text{CuCl}_2\} + \{7.3 [\text{g}] \text{H}_2\text{O}\}} \times 100$$

Porcentaje en peso del componente = 70%

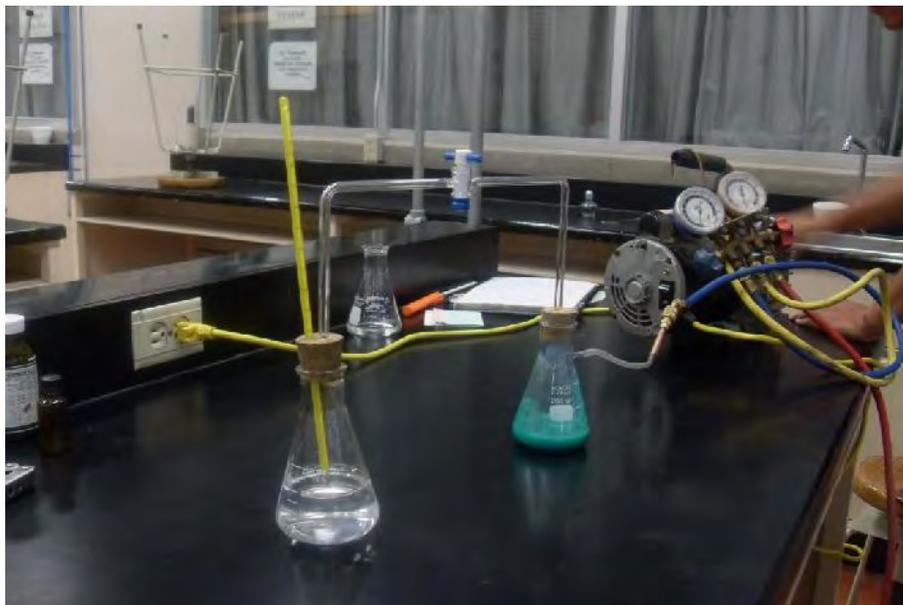


Figura 19: Medición de temperatura.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



En la tercera etapa del experimento se utilizó una solución 50% agua y 50% CuCl_2 , repitiendo cada paso de las etapas anteriores. Finalmente en la última etapa se utilizó una solución 70% agua por 30% CuCl_2 , el desarrollo de esta etapa fue similar al de las etapas anteriores.

- Para la tercera etapa se utilizó una solución al 50% de CuCl_2 :

$$\text{Porcentaje en peso del componente} = \frac{21 [\text{g}] \text{CuCl}_2}{\{21 [\text{g}] \text{CuCl}_2\} + \{21 [\text{g}] \text{H}_2\text{O}\}} \times 100$$

Porcentaje en peso del componente = 50%

- Para la última etapa se utilizó una solución al 30% de CuCl_2 :

$$\text{Porcentaje en peso del componente} = \frac{20 [\text{g}] \text{CuCl}_2}{\{20 [\text{g}] \text{CuCl}_2\} + \{46.6 [\text{g}] \text{H}_2\text{O}\}} \times 100$$

Porcentaje en peso del componente = 30%

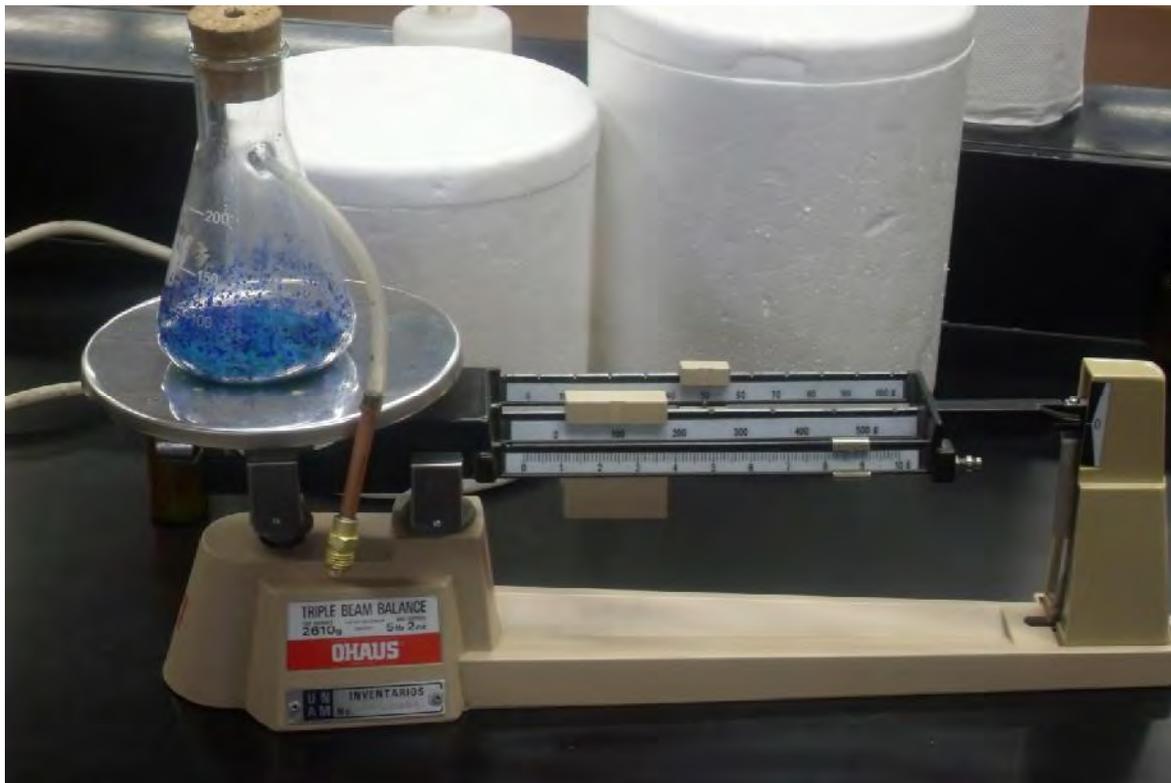


Figura 20: Medición de la masa del tetraaminocuprato II.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



RESULTADOS



IV. Resultados

4.1 Resultados experimentales

Durante las etapas de este trabajo, se buscó registrar diferentes cambios en las magnitudes físicas de temperatura y masa de las sustancias involucradas. Como se mencionó anteriormente, antes de proceder a la generación de vacío se medían estas dos magnitudes físicas (masa y temperatura), una vez alcanzado el vacío máximo (22 pulgadas de mercurio) se abría la llave de paso por 2 minutos, al finalizar éste periodo de tiempo, se registraban de nuevo estas magnitudes.

En la primera etapa del experimento en donde se utilizaron 10 [g] de CuCl_2 , se registró una temperatura inicial en el refrigerante y del absorbente de $17[^\circ\text{C}]$, al término de la prueba no se registró cambio alguno ni en la temperatura del refrigerante, ni en la del absorbente así como tampoco en la masa del absorbente.



Figura 21: Resultado de la primera etapa del experimento.



En la segunda etapa del experimento, en donde la diferencia con la primera etapa fue la concentración de la solución absorbente, siendo ésta 70% CuCl_2 y 30% H_2O , se registro una temperatura inicial en el refrigerante de 17 [°C], una masa inicial en la solución absorbente de 24.3 [g] y una temperatura en ésta solución de 17 [°C]. Al término de la prueba, se registraron una serie de cambios en la magnitudes físicas de las sustancias, hubo un descenso en la temperatura del refrigerante de 2 [°C], no se registró cambio en la temperatura de la solución absorbente y la masa final del absorbente fue de 25.3 [g].

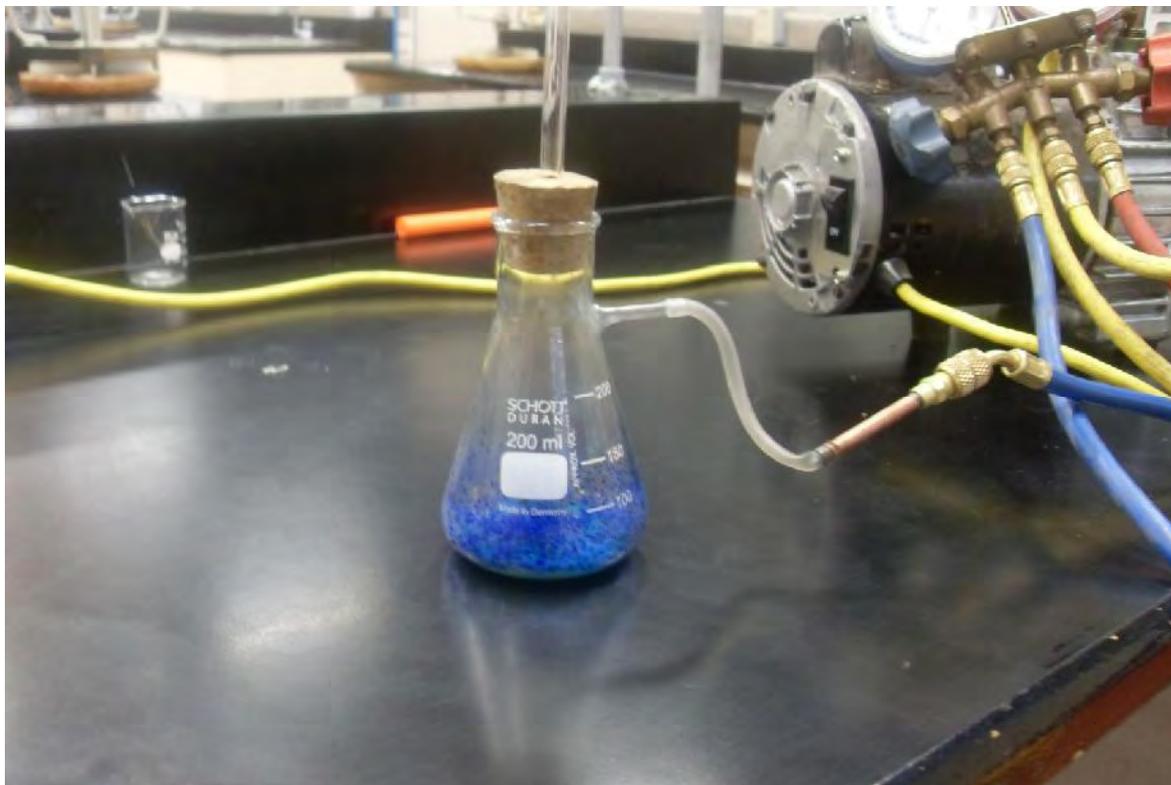


Figura 22: Segunda etapa del experimento.

Otro cambio que es evidente a simple vista, es el cambio en la coloración de la solución absorbente, a diferencia de la primera etapa del experimento, en esta segunda etapa es más evidente este cambio en la coloración del absorbente.



Para la tercera etapa del experimento, se contó con una concentración en la solución absorbente de 50% de H_2O por 50% de CuCl_2 , al igual que en las etapas anteriores, la temperatura inicial tanto del refrigerante como del absorbente fue de 17 [°C], la masa inicial del absorbente fue de 42 [g]. Al término de la prueba, se registró un cambio en la temperatura del refrigerante de 5 [°C], pasando de 17 a 12 grados al finalizar la prueba, al igual que el refrigerante, el absorbente sufrió un cambio en su temperatura, pasando de 17 a 23 [°C] al término de la prueba, en lo que respecta a la masa del absorbente, paso de 42 [g] inicialmente a 44.2 [g] de absorbente al finalizar la tercera etapa del experimento.

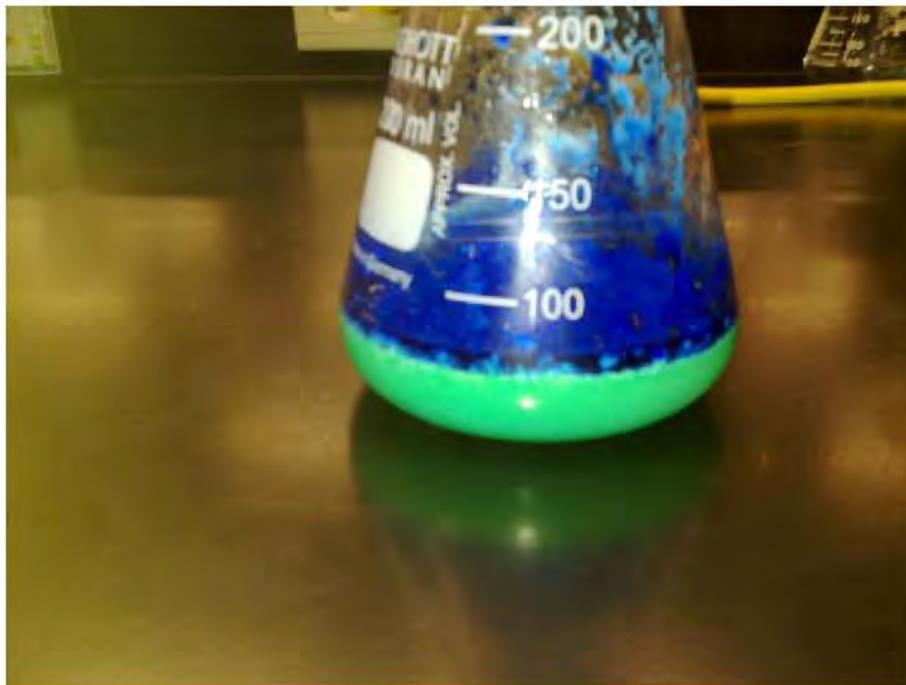
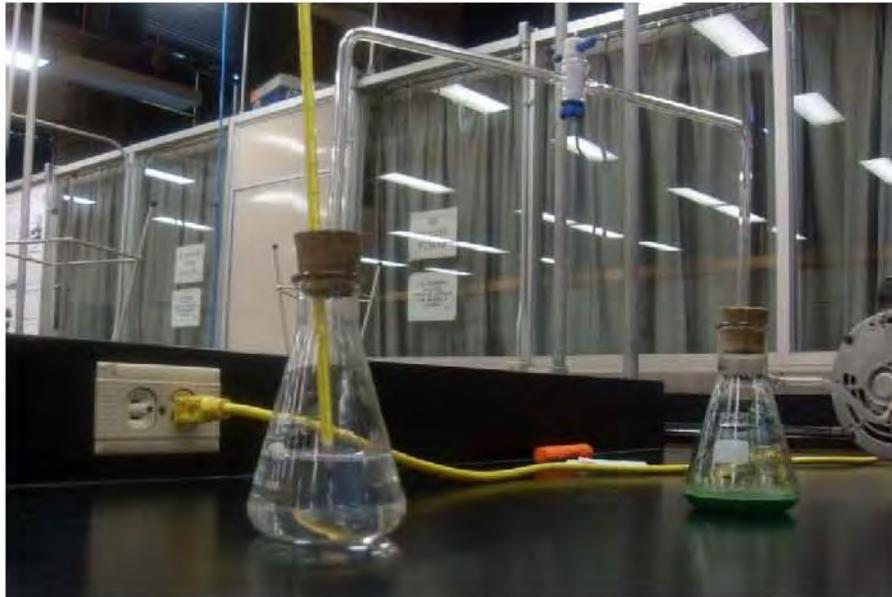


Figura 23: Tercera etapa del experimento.

Finalmente se realizó una cuarta etapa, esta última etapa consistió en cambiar la concentración de la solución absorbente, ahora utilizando un 70% de H_2O y un 30% de CuCl_2 , las temperaturas iniciales del refrigerante y del absorbente fueron de 17[°C], la masa inicial del absorbente fue de 66.6 [g], al término de la prueba, se registró un descenso en la temperatura del refrigerante de 7 [°C], en el absorbente se registró un aumento en la temperatura de 7 [°C], el cambio en la masa del absorbente fue de 2.9 [g] pasando de 66.6 a 69.5 [g].



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



Figuras 24 y 25: Última etapa del experimento.



A continuación se muestra una tabla de las variables tanto al inicio como al final del experimento, así como dos gráficas que ilustran el comportamiento de las temperaturas finales del refrigerante, absorbente y cantidad de refrigerante disuelto en la solución absorbente, dependiendo del porcentaje de agua presente en la solución $\text{CuCl}_2\text{-H}_2\text{O}$.

Tabla 4: Resultados experimentales.

	1	2	3	4
Temp. inicial absorbente [°C]	17	17	17	17
Temp. inicial NH_3 [°C]	17	17	17	17
Masa inicial absorbente [g]	10	24.3	42	66.6
% CuCl_2	100	70	50	30
% H_2O	0	30	50	70
Temp. final absorbente [°C]	17	17	23	24
Temp. final NH_3 [°C]	17	15	12	10
Masa final absorbente [g]	10	25.3	44.2	69.5
Concentración [%]	100	70	50	30
Masa absorbida [g]	0	1	2.2	2.9

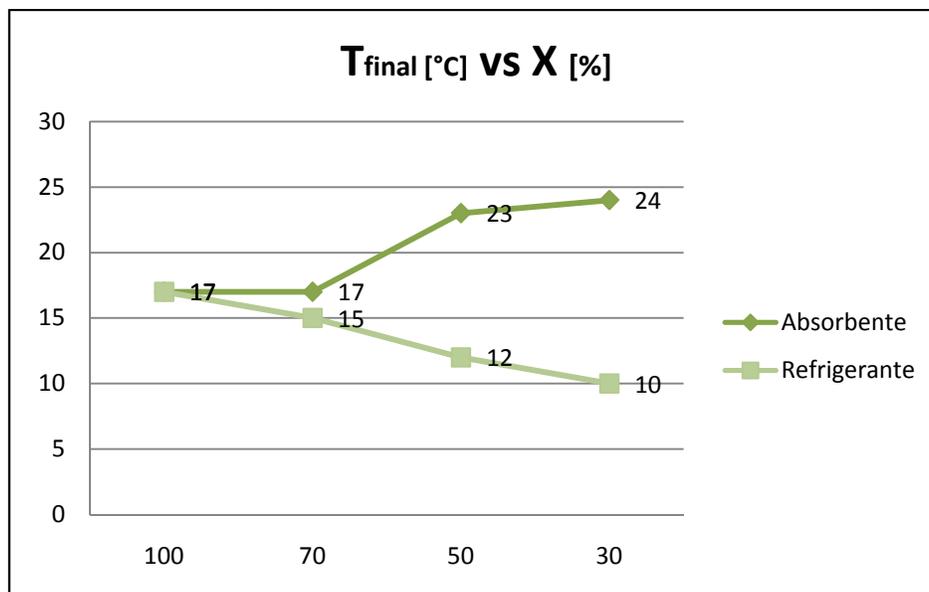


Figura 26: Temperatura final vs concentración

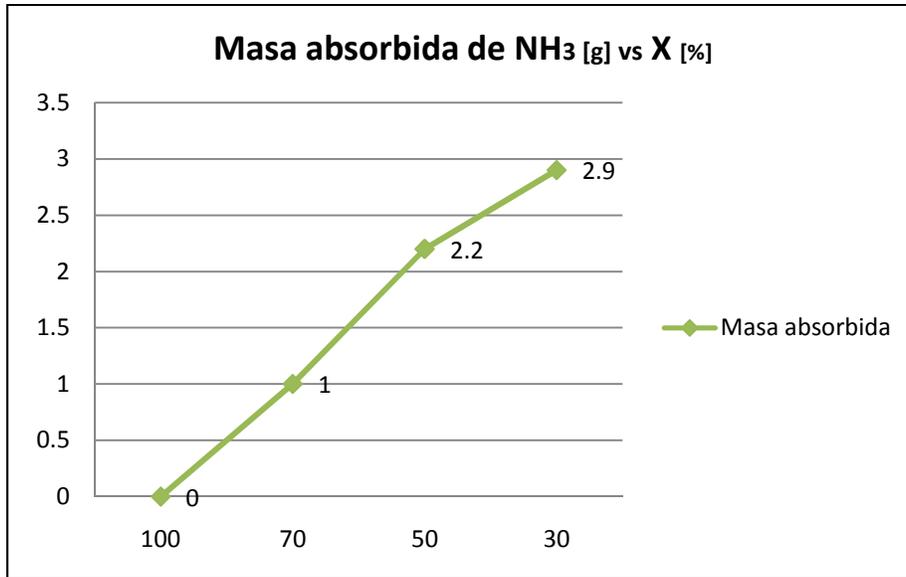


Figura 27: Masa de NH_3 disuelta en la solución absorbente



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



CONCLUSIONES



V. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de éste trabajo, se construyó un dispositivo con la finalidad de evaluar experimentalmente la afinidad existente entre el CuCl_2 y el NH_3 , la construcción de este dispositivo trató de simular una unidad evaporadora y una unidad absorbedora dentro de un ciclo de refrigeración por absorción.

Las experiencias realizadas a lo largo de las diferentes etapas de estos experimentos, mostraron que existe una afinidad entre las sustancias utilizadas, amoníaco como refrigerante y cloruro de cobre como absorbente, sin embargo, esta afinidad se acentúa bajo la presencia de agua en la solución absorbedora. En la primera etapa se logró constatar que con una solución de cloruro de cobre sin la presencia de agua, no se presenta una absorción con el amoníaco, esto se puede deber a que las condiciones de trabajo no fueron totalmente puras, es decir, el compuesto absorbente no se considera totalmente puro ya que en condiciones normales, la superficie del sólido se encuentra cubierta de especies absorbidas como carbono, oxígeno, hidrocarburos, azufre y agua derivadas fundamentalmente de los gases de la atmósfera. Para lograr una superficie limpia, se debe calentar el sólido intensamente al alto vacío, por otro lado se puede romper el cristal en el vacío para obtener una superficie limpia.

Al realizar el experimento con una solución absorbente con el 30% de agua (segunda etapa), se observó que el refrigerante sufrió un descenso en su temperatura, lo que indica que hubo evaporación de una parte de amoníaco necesitando absorber calor de la misma solución refrigerante para hacerlo, lo suficiente para alcanzar un descenso de 2 grados centígrados en la solución refrigerante. Se registró un aumento en la cantidad de masa de la solución absorbente, lo que indica que efectivamente se presentó en esta segunda etapa, una afinidad entre ambas sustancias, prueba de ello es el aumento de de 1 [g] en la masa final del absorbente, sin embargo, no se registró aumento alguno en la temperatura final de la solución absorbente, la reacción exotérmica que tiene lugar al presentarse el fenómeno de absorción no fue registrada, el termómetro con el que se contó no fue capaz de registrar este cambio, debido principalmente a la falta de uniformidad en el contacto entre la solución absorbente y el bulbo del termómetro. Esta etapa se diferencia de la primera etapa por la presencia de agua en el absorbente, lo que comprueba que la presencia de agua en la solución absorbente ayuda a que se lleve a cabo la absorción.

Para las dos últimas etapas del experimento, se constata que con la presencia de agua en un 50 y 70 % en la solución absorbedora, aumenta la absorción entre el par de trabajo utilizado y por otro lado, se verifica que debido a la interacción entre las sustancias utilizadas existe una capacidad de enfriamiento en la solución refrigerante, los resultados nos indican que se mantiene el incremento en la absorción de amoníaco y con esto, se incrementa la temperatura de reacción



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



en la absorción. El compuesto obtenido producto de la absorción, presentó una tonalidad azul profunda lo que concuerda con lo consultado en la bibliografía, esto es otro indicativo de que efectivamente se llevó a cabo una reacción entre el amoníaco y el cloruro de cobre, dando lugar a una absorción y generando un efecto de enfriamiento.

En general y debido a los cambios en las magnitudes físicas medidas en este experimento, como lo fue la medición de temperatura y masa apoyados por el cambio de coloración en el compuesto formado producto de la absorción, se pudo constatar que existe una afinidad entre el cloruro de cobre y el amoníaco, se deduce que es posible la utilización de este par de sustancias en un sistema de refrigeración por absorción. Sin embargo, esta posible utilización debe ser sustentada por futuros trabajos de investigación, será necesario en primer lugar determinar las temperaturas necesarias que se tienen que alcanzar en la solución absorbidora producto del fenómeno de absorción (tetraaminocuprato II) para lograr la separación del amoníaco del cloruro de cobre, a fin de reutilizar el amoníaco.

Ahora bien, posteriormente será necesario realizar un análisis para encontrar la concentración óptima de la solución cloruro de cobre-agua que se utiliza en el absorbedor, a fin de determinar las presiones de operación en el sistema y por ende la temperatura de evaporación del refrigerante.

Finalmente al realizar este trabajo se hace el planteamiento de una recomendación, dado que hay un resurgimiento en el desarrollo e investigación de la refrigeración por absorción y tomando en cuenta que en la Facultad de Ingeniería, específicamente en el área de aire acondicionado y refrigeración no se cuenta con una práctica de refrigeración por absorción que ilustre de manera clara el principio de éste sistema, se recomienda que es necesario establecer y desarrollar un dispositivo evaporador-absorbedor como el utilizado en este trabajo, a fin de apoyar a los estudiantes a comprender de una manera más clara y responsable el funcionamiento de un sistema de refrigeración por absorción, motivando a sí, el interés en la investigación y el desarrollo de esta alternativa de refrigeración.



REFERENCIAS.

- [1] Theodore L. Brown, H.EugeneLeMay Jr. y Bruce E. Bursten. *Química la ciencia central 5ta edición*. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 1993. 494 pp.
- [2] Yanus A. Cengel., Michael A. Boles. 2003. *Termodinámica 4ta edición*. Mc Graw Hill. 548 pp.
- [3] Raymond Chang. 1976. *Química 5ta edición*. Mc Graw-Hill, Inc. 1994. 54 pp.
- [4] Roy J. Dossat. 1980. *Principios de Refrigeración*. Compañía Editorial Continental SA de CV. México. 1999. 527 pp.
- [5] Virgil Moring Faires. 1973. *Termodinámica 2da edición*. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. México. 517 pp.
- [6] Eduardo Hernández Goribar. 1973. *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*. Limusa. México. 227 pp.
- [7] Hawley, Gessner y Goodrich. 1993. *Diccionario de Química y de Productos Químicos*. Ediciones Omega S.A. Barcelona. 258 pp.
- [8] Francis F. Huang. 1981. *Termodinámica, fundamentos y aplicaciones 2da edición*. Compañía Editorial Continental SA de CV. México. 1994. 82 pp.
- [9] Burguess H. Jennings y Samuel R. Lewis. 1979. *Aire Acondicionado y Refrigeración*. Compañía Editorial Continental SA de México. 574 pp.
- [10] Juan Francisco Márquez Mendoza. 2000. *Estrategias de la CONAE en la promoción de las energías renovables en México*. Memorias del ISES MILLENNIUM SOLAR FORUM 2000. 699 pp.
- [11] José Francisco Martínez Ortega. 2007. *Optimización de un Sistema de Refrigeración Solar para la Producción de Hielo*. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Energía. UNAM. México.



Estudio experimental de un sistema $\text{CuCl}_2\text{-NH}_3$ para refrigeración por absorción.



- [12] Elizabeth Méndez Rodríguez. 2002. *Estudio Experimental del Sistema Termoquímico Cloruro de Bari- Amoniac para el Diseño, Construcción e Instrumentación de un Sistema de Refrigeración Solar para la Producción de Hielo*. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Energía. UNAM. México.
- [13] Naghelli Ortega Avila. 2002. *Estudio teórico de un colector tipo CPC acoplado al generador de un sistema de refrigeración por absorción*. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Energía. UNAM. México.
- [14] Edward G. Pita. *Acondicionamiento de aire principios y sistemas 2da edición*. Compañía Editorial Continental SA de CV. 1997. 372 pp.
- [15] W. F. Stoecher. 1965. *Refrigeración y Acondicionamiento de Aire*. Mc Graw Hill. 181 pp.
- [16] Enrique Torrella Alcaraz. 1996. *La producción de frío*. Universidad Politécnica de Valencia. España. 15 pp.
- [17] Arthur I. Vogel. *Química analítica cualitativa 6ta edición*. Editorial Kapelusz. Buenos Aires. 1983. 114 pp.
- [18] Kenneth Wark, Jr y Donald E. Richards. *Termodinámica 6ta edición*. Mc Graw Hill. México. 2001. 872 pp.
- [19] <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/18amoniaco>