

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



FACTIBILIDAD EN EL USO DE  
50 ISOBUTANO-50 PROPANO COMO SUSTITUTO  
A LOS ACTUALES REFRIGERANTES

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

MAYRA ELIZABETH ALANIS ALANIS

CD. UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 1998

TL

TP497

.A5

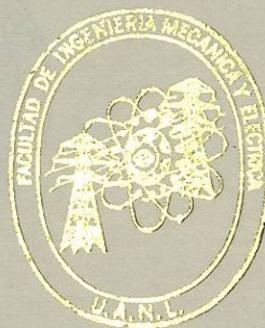
1998

c.1



1080092522

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



FACTIBILIDAD EN EL USO DE  
50 ISOBUTANO-50 PROPANO COMO SUSTITUTO  
A LOS ACTUALES REFRIGERANTES

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

MAYRA ELIZABETH ALANIS ALANIS

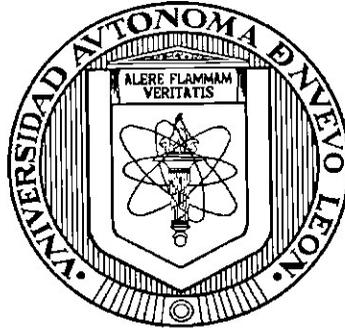
CD. UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 1998

TL  
TP497  
.A5  
1998



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**FACTIBILIDAD EN EL USO DE 50 ISOBUTANO - 50 PROPANO  
COMO SUSTITUTO A LOS ACTUALES REFRIGERANTES**

**T E S I S**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:  
MAYRA ELIZABETH ALANÍS ALANÍS**

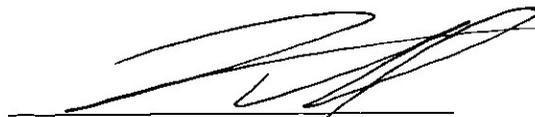
**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.**

**DICIEMBRE DE 1998**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

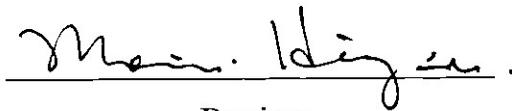
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “ Factibilidad en el uso de 50 isobutano – 50 propano como sustituto a los actuales refrigerantes” realizada por. Mayra Elizabeth Alanís Alanís sea aceptada para su defensa como opción al grado de Ingeniero Mecánico Electricista.

El comité de tesis



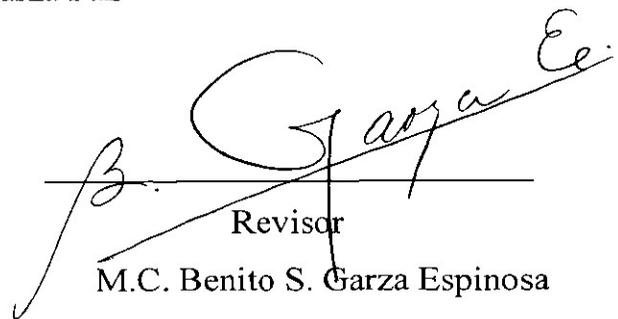
Asesor

M.C. Jesús Garza Paz



Revisor

Dr. Moisés Hinojosa Rivera



Revisor

M.C. Benito S. Garza Espinosa

San Nicolás de los Garza, N.L., Diciembre de 1998

# DEDICATORIA

## **A DIOS**

Por permitirme llegar a esta etapa de mi vida y brindarme todas estas oportunidades.

## **A MIS PADRES**

Leopoldo Alanís Garza y Estéfana Alanís de Alanís, por todo su apoyo y cariño que me han brindado y por ser de alguna manera los responsables de todo lo que soy.

## **A MIS HERMANOS**

Leopoldo, Claudia Estéfana, Jacqueline Ivonne, Miriam Alejandra y a Jhonathan David, por todos los momentos buenos y malos que hemos compartido juntos, por su cariño y comprensión.

## **A MIS SOBRINOS**

Aarón, Brandon y el que viene, por ser la alegría de mi ser.

## **A TI PEPE (QEPD)**

Que demostraste valor y furia hasta el último momento.

*Y de manera MegaGigaEspecial a quien ha sido mi fuerza e inspiración, a ti, por ser mi loquillo enamorado.*

A toda mi familia y personas que me han ofrecido su amor y amistad desinteresadamente.

# AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ya que les debo toda mi formación académica.

Al M.C. Jesús Garza Paz que en todo momento me ha apoyado incondicionalmente y guiado mis pasos, gracias por brindarme tu amistad, tiempo y por realizar juntos esta tesis.

Al Dr. Moisés Hinojosa Rivera por sus observaciones y consejos para la elaboración de esta tesis y por su amistad desinteresada.

Al M.C. Benito Garza por sus consejos en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Ubaldo Ortiz Méndez por apoyarme y confiar en mí en todo momento.

Al Dr. Virgilio González González que con sus consejos y recomendaciones voy creciendo íntegramente.

M.C. Roberto Villarreal Garza por su apoyo incondicional.

A mis maestros Ing. Guadalupe Valdéz, M.C. Tomás Morales Quiñones, Ing. Joel Marroquín, Ing. Leonardo Ayala, Ing. Mariano Ochoa, Ing. Lorenzo Hernández, M.C. Heriberto Ruiz Caballero, M.C. Francisco Delgado, por haberme dado su apoyo durante mi etapa de estudiante.

A mis amigos Sergio Mtz., Alfredo Lozano, Margil Rmz., Carlos Garza (mi primo), Ramiro Gzz., Rodolfo Rdz.(el reno), que me han brindado su amistad desinteresadamente y apoyado incondicionalmente en todo momento.

A Jorge Aldaco Castañeda, que me ha aconsejado que desaparezca de mi vocabulario ¿Qué onda, tú este?, Francisco Garza Méndez (Alias Paco), que sigo esperando la clase de “Cocina pizza con *Paco*” y a Héctor Mendoza Fuerte, por su sabia filosofía (te la crees) y de alguna otra manera a los tres por ser los responsables de las desveladas que me he dado, por ser como son, sencillos, sinceros y por ser mis grandes super MegaGigaamigos (y conmigo, formamos los cuatro fantásticos).

A mis mascotas, campanita michelle y a su hijo gatito motitas y a la negra que forman parte de vida y ocupan un espacio en mi locker así como a el rufo y reynaldo que son los guardianes de la casa. En especial al diabolus y a bonny.

A **PIPO (QEPD)** por divertirme durante mi infancia con sus aventuritas y en vacaciones largas con su programa “Super Vacaciones”.

A **IRON MAIDEN, RAINBOW, METALLICA, YNGWIE MALMSTEEN** que me quitan un peso de encima, perdón *pesos*, por comprar sus producciones.

# Í N D I C E

## Resumen

<b>Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>Capítulo 2.- TRANSPORTE DE ENERGÍA</b>	
2.1 Operaciones Unitarias	3
2.2 Fenómenos de Transporte	5
2.3 Convección	8
2.4 Calor Latente	11
<b>Capítulo 3.- FLUJOS DE CALOR</b>	
3.1 Preservación Criogénica	13
3.2 Procesos de Refrigeración	15
3.3 Refrigerantes	24
<b>Capítulo 4.- DISTORSIÓN AMBIENTAL</b>	
4.1 Formación del Ozono	30
4.2 Hidrocarburos Halogenados	34
4.3 Propuesta Americana	36
4.4 Propuesta Europea	37
<b>Capítulo 5.- EXPERIMENTACIÓN</b>	
5.1 Diseño de Experimentos	38
5.2 Operación con el Refrigerante 22	39
5.3 Operación con la Mezcla No-Azeotrópica	44
<b>Capítulo 6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	47
<b>Capítulo 7.- CONCLUSIONES</b>	49
<b>Capítulo 8.- RECOMENDACIONES.</b>	51
<b>Referencias Bibliográficas</b>	52
<b>Índice de Tablas y Figuras</b>	53

# RESUMEN

El trabajo presentado consiste en la evaluación de una mezcla no-azeotrópica, como propuesta de solución al problema ambiental, determinando su factibilidad económica mediante el análisis comparativo con los refrigerantes de uso actual. La composición química de la mezcla no-azeotrópica seleccionada es 50% de isobutano y 50% de propano.

Se utilizó para el estudio un sistema de refrigeración por compresión, con un compresor de émbolo recíprocante, utilizado en el proceso de destilación para una industria de transformación química. El refrigerante original empleado en dicho proceso es el R-22, de manera que la experimentación consistió en evaluar los estados termodinámicos que este refrigerante presenta en el sistema, para realizar un análisis comparativo con los efectos que la mezcla no-azeotrópica produce en el mismo, bajo las mismas condiciones de requerimiento en su operación.

Sometido el sistema a las mismas condiciones de operación, se observó que al utilizar la mezcla no-azeotrópica el trabajo específico térmico requerido para el ciclo termodinámico disminuye; por consiguiente, se abate el diferencial entre las zonas de alta y baja presión, así como la potencia consumida y la corriente de operación, aumentando como respuesta, el coeficiente de rendimiento.

Con los resultados obtenidos se concluye que el coeficiente de operación para las condiciones de operación descritas se incrementa en un 9%. Por otro lado, el requerimiento de energía eléctrica disminuye, dando lugar a un ahorro de energía de 8%.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

A mediados de los años 70's, se detectaron algunos cambios en las condiciones climatológicas normales del medio ambiente, consecuencia de la actividad industrial desarrollada tan intensamente durante este siglo, concientizando al ser humano como responsable y único causal de dichas modificaciones.

Entre otras alteraciones, se descubre un “agujero” en la capa superior de la atmósfera, donde supuestamente debería encontrarse la inestabilidad del oxígeno, formadora de ozono. Dicha anomalía se encuentra geográficamente en el polo magnético positivo del planeta, situado entre la isla de Tasmania y el continente Antártico, con un diámetro medio actual de 10 kilómetros.

A través de dicha apertura, la radiación ultravioleta, que forma parte de la emisión solar total, penetra la atmósfera, incidiendo directamente sobre la superficie del océano, sin que algo le absorba en su trayectoria. Un grupo de investigadores se dio a la tarea de buscar una explicación ante la ocurrencia de este fenómeno, concluyéndose que el problema era generado por un exceso de producción de partículas ajenas al hábitat original, algo conocido como contaminación ambiental, provocada por diversas sustancias, destacándose principalmente a los refrigerantes que estaban en uso por aquel entonces, muchos de los cuales todavía lo están.

Un sinnúmero de investigaciones realizadas a lo largo de las últimas décadas se han dedicado al estudio y caracterización de los refrigerantes<sup>1,2,3,4</sup>, sobre todo replanteando los criterios de selección para llevar a cabo su sustitución, con el objetivo de que su impacto ambiental sea menor.

Por otra parte, la eficiencia con la cual se dispone de la energía es un tópico de gran interés para el sector industrial hoy en día, ya que los flujos de energía son considerados como equivalentes a flujos de capital. Cuando se estudia y mejora un sistema desde una perspectiva energética, lo que realmente se está obteniendo es una optimización de tipo económico.

El tema de ahorro energético no es tan novedoso como parece; a mediados del siglo XVIII, ya se concebía la idea de buscar alternativas de mayor rentabilidad en la producción industrial; por ejemplo, dentro de los primeros trabajos desarrollados por el ingeniero James Watt, el rendimiento de las máquinas que se utilizaban como fuente de energía mecánica se incrementó al introducir dispositivos térmicos como el condensador y el intercambiador de calor para la operación dentro de un ciclo termodinámico, ahorrando combustible al llevar a cabo dicha medida, y por ende, ahorrando efectivo.

A pesar de ser un tema ya antiguo, en la actualidad el ahorro de energía ha cobrado un gran auge en la presente década, principalmente por la creciente escasez de energéticos, además de contar con un mercado cada vez más competitivo.

A lo largo del presente trabajo se presentará un esquema de los causales de la distorsión ambiental, la importancia de los refrigerantes en la misma, y diversas propuestas de solución para abatir este conflicto. Además, su análisis se efectúa desde una perspectiva económica, buscando una solución sustentable y que minimice los flujos de capital.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo consiste en analizar una mezcla no-azeotrópica, que forma parte de una propuesta de solución al problema ambiental, determinando su factibilidad económica en análisis comparativo con los refrigerantes de uso actual.

# CAPÍTULO 2

## TRANSPORTE DE ENERGÍA

### 2.1 Operaciones Unitarias.

Desde los albores de la humanidad, hasta mediados del siglo XVIII, la actividad económica de un pueblo se basaba en una producción de tipo artesanal, ésto es, un producto elaborado mediante la energía directa, ya sea del hombre, de algún animal, o de una acción intrínseca de la naturaleza, y sobre todo, sin un control sobre la misma. En ese mismo siglo, James Watt<sup>5</sup> se interesó por incrementar el rendimiento de las máquinas que se utilizaban como fuente de energía mecánica, que eran inventos anteriores de Savery y Newcomen, para accionar bombas de agua.

Watt se dio cuenta que la causa principal de la ineficacia de la máquina se debía a que la cámara de vapor debería de ser previamente enfriada para poder condensar el vapor, de esta manera se producía el vacío en la misma. Posteriormente, se tenía que llenar de vapor la cámara, la cual se encontraba ahora fría, para lo que requería un recalentamiento previo, por lo que una cierta cantidad de vapor se desperdiciaba en cada ciclo, de esta manera se requería de cierta cantidad de combustible, exclusivamente, para deshacer el condensado.

La solución que Watt le aportó a éste problema fue la de introducir, por vez primera dentro de un ciclo termodinámico, un condensador, un intercambiador de calor en el cual entraba el vapor, donde permanecía frío, mientras que la cámara podía mantenerse caliente, en consecuencia el proceso de enfriar-calentar se realizaban a un mismo tiempo. Una vez llevada a cabo esta adecuación, la máquina de vapor incrementó significativamente su rendimiento.

Ya involucrado en la actividad industrial, y siendo pionero en el ahorro de energía al desarrollar el primer condensador, realizó un logro de mayor trascendencia para la actividad humana, por vez primera se controló la energía que se encontraba en la naturaleza, desarrollando un regulador centrífugo que modulaba el flujo e interacción del calor, dando inicio a una nueva etapa de la humanidad: la *Revolución Industrial*.

A partir de que el hombre logró el control de la energía, dio inicio una serie de aprovechamientos de otras fuentes yacentes en la naturaleza como la combustión interna, la energía eléctrica o, más recientemente, la energía nuclear, de manera que un sinnúmero de transformaciones tuvieron lugar en los materiales, conocidos desde este momento como materias primas; estos cambios eran de tipo tanto físico como químico, para obtener como resultante un producto terminado. La secuencia de transformaciones se le llama procesos industriales, entre los cuales se conocen la destilación, la absorción de gases, la filtración, la evaporación, entre muchos otros.

Una forma de estudiar mejor estas transformaciones<sup>6</sup> fue observando la similitud existente entre los distintos cambios químicos o físicos dentro de los diferentes procesos, a lo cual se le denominó *Operaciones Unitarias*; de manera que la destilación pudo ser analizada mejor, ahora desde un punto de vista más objetivo, independientemente que su operación sea con petróleo o tequila, el proceso en cuestión posee un comportamiento similar.

A medida que las operaciones unitarias fueron concebidas, se intuyó que entre las mismas existían analogías, por lo que se concluyó que eran tan sólo tres procesos los actuantes, ya sean independientes o combinados en su interacción, que son la transferencia de movimiento, la transferencia de masa y la transferencia de energía, conocidos ahora como *Fenómenos de Transporte*.

## 2.2 Fenómenos de Transporte.

Como fue descrito en líneas anteriores, la colapso de los procesos industriales dio origen a una teoría unificada, conocida, hoy por hoy, como fenómenos de transporte. A continuación se describirá cada uno de ellos.

En la *transferencia de movimiento*, interviene el interactuar de sistemas fluidos, así como, las fuerzas que producen dicho movimiento. Newton fue la primera persona que realizó un estudio analítico y sistemático de este fenómeno, en la segunda ley del movimiento describe como la fuerza es directamente proporcional al cambio de movimiento en un sistema<sup>7</sup>; así mismo, describe como el esfuerzo cortante que actúa sobre un fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad del mismo, dando origen al concepto de viscosidad<sup>8</sup>. Estudios posteriores incluyeron a las fuerzas de acción a distancia (como la gravedad), a las fuerzas que actúan sobre el fluido (como la presión), e incluso al esfuerzo cortante en una transferencia microscópica.

La transferencia de un constituyente de una región de alta concentración a otra con baja concentración se conoce como *transferencia de masa*. Cuando se tiene un sistema que contiene dos o más componentes, cuyas concentraciones varían de un punto a otro, presentará una tendencia natural a transferir la masa, haciendo mínimas las diferencias de concentración dentro del sistema, y estableciendo un equilibrio.

La transferencia de masa es muy importante en muchos procesos tales como la difusión de neutrones dentro de reactores nucleares, la rapidez de las reacciones químicas catalizadoras y biológicas, el templado de metales, los acabados superficiales, y muchos más.

Entre los parámetros que rigen este fenómeno de transporte se encuentran el tiempo de residencia, la concentración solvente-soluto, la temperatura de proceso, y en algunos casos, la dinámica propia del sistema.

A manera de ejemplo, cuando se añade azúcar al café, ésta se disuelve más rápidamente si efectuamos un trabajo mecánico con la cuchara, mediante una agitación, en lugar de permitir que se disuelva en reposo.

Por otra parte, la transferencia de masa, conocida también como difusión, sigue las leyes descubiertas el siglo pasado por Fick<sup>9</sup>; estableciéndose que la temperatura, el tiempo y la concentración, dadas entre solutos y solventes, serán los parámetros que regularán directamente este proceso.

El tercero de los fenómenos de transporte, y que este trabajo va a estudiar con mayor profundidad, versa sobre la *transferencia de energía*, la cual estudia principalmente, la propagación del calor a través de diferentes medios; éste fluirá cuando en el sistema ocurra un diferencial de temperatura y, consecuencia de la Segunda Ley de la Termodinámica descrita por Clausius, tenderá a un equilibrio, por lo que un flujo de energía ocurrirá en el sistema.

Básicamente, son tres los mecanismos en la transferencia de calor, la conducción, la convección y la radiación; ya sea que actúen en combinación, o independientes entre sí.

La transferencia de calor por conducción es un proceso en la cual la energía fluye por un contacto directo entre las partículas, de una sistema a otro, consecuencia a un diferencial de temperatura.

El caso particular de los metales posee otro mecanismo adicional, al tener electrones libres, la conducción se da a través de éstos, en forma anexa al mecanismo descrito con anterioridad; por lo tanto para este tipo de materiales la conducción esperada es mayor.

En base a lo anterior, se deduce que la transferencia de calor es diferente de acuerdo al material; si se tiene un metal la transferencia de calor es mayor en comparación a los cerámicos y polímeros.

El mecanismo de transferencia de calor por conducción lo estudió formalmente por vez primera Fourier, a principios del siglo pasado, definiendo que para una sustancia homogénea, la densidad de flujo de energía era directamente proporcional al negativo del gradiente de temperatura ocuriente en el sistema<sup>10</sup>, describiéndose como:

$$\frac{Q}{A} \propto -\nabla T$$

Otro mecanismo para que la transferencia de calor tenga lugar es la radiación. Este fenómeno ocurre cuando un cuerpo empieza a emitir ondas electromagnéticas, de manera que otro cuerpo absorbe esta energía, transformándola en calor.

Durante el siglo pasado, Ludwig Boltzman caracterizó el mecanismo de la radiación; para 1884, descubrió que, para un cuerpo negro, la densidad del flujo de transferencia de calor era directamente proporcional a la temperatura absoluta de este emisor elevada a la cuarta potencia. Lo cual se expresa matemáticamente como:

$$\frac{Q}{A} \propto T^4$$

La concepción de que un material sea un cuerpo negro es meramente ideal, por lo que la transferencia de calor de los materiales reales será tan sólo una proporción de la que pueda emitir un cuerpo negro. La razón entre la emisión real y la total de un cuerpo negro se llama emisividad, y se considera como una propiedad de los materiales.

Por último, el primero de los mecanismos de transferencia de calor estudiados, y que hasta la fecha sigue siendo el único que no ha podido ser caracterizado plenamente es la convección.

## 2.3 Convección.

La convección es un fenómeno similar en comportamiento a la conducción, la diferencia estriba que para el caso de la conducción entre dos sustancias, ésta se da en forma estacionaria, mientras que para el caso específico de la convección, además del contacto existente, debe de realizarse un movimiento relativo entre ambos sistemas.

Para 1701, Newton estudió el fenómeno, y definió que la densidad de flujo de la transferencia de calor era directamente proporcional al diferencial de temperatura, a lo que se le conoce como la Ley de Enfriamiento de Newton.

Para convertir la proporcionalidad de la relación anterior en una ecuación matemática, debe de incluirse una constante que defina las características propias del sistema, algo que Newton llamó coeficiente de transferencia de calor, más tarde Fourier lo nombró conducción exterior, y posteriormente se le denominó coeficiente de película.

La convección es una forma de transmisión de calor, en la cual ocurre un transporte de energía complementado con un transporte de movimiento, por lo que se relaciona el cambio de energía entre superficies con un fluido adyacente.

A partir de la Ley de Enfriamiento de Newton, la ecuación que rige la rapidez de transferencia de calor por convección se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = hA\Delta T$$

donde  $\dot{Q}$  queda definido como el flujo de calor,  $h$  como el coeficiente de película,  $A$  es el área de la sección transversal que atravesará el flujo, dicho de otra manera. el factor geométrico del sistema, y por último se tiene  $\Delta T$  definido como el diferencial de temperatura. De esta manera, se observa como se relacionan los mecanismos del movimiento del fluido, las propiedades del mismo y la geometría del sistema específico.

Por lo tanto, el coeficiente de película es una constante cuyo valor es función de parámetros propios del fluido, como los son la conductividad térmica, la difusividad térmica, la viscosidad y la densidad; es función también de parámetros de flujo como el tipo de régimen, ya sea laminar o turbulento; y de parámetros externos al flujo, como la gravedad, la temperatura del sistema, la presión, la fricción, entre otros más.

Debido a estas razones, la convección no ha podido ser completamente caracterizada hasta el día de hoy, teniéndose ya algunos adelantos interesantes dentro de su estudio, al interpretar el fenómeno como un sistema de tipo caótico, caracterizándolo con herramientas propias de esta ciencia<sup>11, 12, 13</sup>.

Dentro de los parámetros de flujo, el tipo de régimen es sumamente importante, para lo cual existen dos tipos principales, el régimen laminar y el régimen turbulento. En el flujo laminar, el fluido posee un movimiento sobre capas, conocidas en la jerga como láminas; por otra parte, el régimen turbulento se caracteriza por poseer un movimiento caótico de sus partículas, las fluctuaciones son debidas a las propiedades del fluido, a las características del mismo flujo y al esfuerzo cortante.

Si el flujo es laminar, la transferencia de calor entre la superficie y el líquido que está en contacto con ella se realiza primordialmente por la interacción molecular. Si el flujo es turbulento, la rapidez de la transferencia de energía es mayor, debido a la mezcla de partículas de fluido en las regiones que se encuentran a temperaturas diferentes.

Algunos trabajos recientes<sup>14, 15, 16</sup> han utilizado herramientas de la Teoría del Caos, de modo que se han podido mezclar las partículas del flujo manteniendo un régimen de tipo laminar, por lo que la transferencia de calor por convección de este tipo puede ser equivalente a otras con régimen turbulento, pero sin tener las pérdidas por fricción ocurridas en éste.

La transmisión de calor por convección se puede manifestar en dos formas diferentes, que son la *convección libre o natural* y la *convección forzada*.

La convección libre, o natural, ocurre cuando el fluido se mueve *per se* por una diferencia de densidades en un sistema, si se calienta o se enfría un fluido, el cambio de densidad produce una circulación natural, en la cual, el fluido afectado por calentamiento se desplaza en la dirección de la gravedad pero en el sentido contrario; el fluido nuevo, que reemplaza al anterior, es también afectado por la transferencia de energía de manera similar y el proceso vuelve a presentarse en forma cíclica. Si durante este proceso, otro cuerpo se encuentra a una temperatura distinta a la involucrada en el proceso natural del movimiento del fluido, intercambiará calor con el mismo por interacción molecular, dando lugar a la conducción, enfriando o calentando a este agente nuevo en el sistema. Además, puede darse también el efecto boyante, en el cual, el fluido de menor densidad arrastra a otros cuerpos.

Para el caso de la convección forzada, se describen los sistemas en los cuales el movimiento de los fluidos es producido por un agente externo, tal como una bomba, un compresor, o bien, un ventilador. Este trabajo se enfocará con más detalle a la convección forzada, debido a que el sistema de refrigeración a analizar es de tipo compresivo; el movimiento del fluido en el sistema se da a través de un conducto cerrado, a una velocidad promedio constante, con una diferencia de temperatura entre el fluido y la pared, y además sometido a un contraflujo.

Además de darse un intercambio de calor por el contraflujo convectivo, existe otro mecanismo que es de sumo interés dentro de los procesos de transferencia de energía, en el refrigerante podrán ocurrir cambios de fase durante la absorción o emisión de energía. Dentro de los sistemas de refrigeración se presenta este fenómeno, de manera que para cumplir plenamente con su función, habrá un intercambio de energía en el sistema, a esta cantidad adicional de energía que el sistema requerirá para realizar los cambios de fase, se le conoce como *calor latente*.

## 2.4 Calor Latente.

La Primera Ley de la Termodinámica establece: “*La energía no se crea, ni se destruye, solamente se transforma*”, el calor es básicamente un flujo de energía que se produce como consecuencia a un diferencial de temperatura, transformando alguna clase de energía en energía térmica. Existen varios tipos de energía fuente para el calor, como lo son del tipo solar, eléctrica, o química, entre otras.

La transferencia de calor está en relación directa con la fase que presente la sustancia de estudio. Donde esta relación es función de la composición molecular, de la rapidez en el movimiento de sus partículas, de las posiciones preferenciales, así como de la cantidad de moléculas.

Independientemente de la fase que presente el sistema en cuestión, las moléculas que forman un material se encuentran en constante movimiento, a la energía necesaria para que una partícula realice un desplazamiento se le conoce como *energía cinética*. Para el caso de una sustancia sólida, cuando se le adiciona calor, el movimiento de las partículas, o energía cinética, se incrementa.

Un caso interesante ocurre en el punto donde se cambia de fase de líquido a vapor, el calor suministrado a un sistema en cuestión no provoca cambio de temperatura, por lo que la velocidad media de las partículas es la misma, independientemente de tratarse del estado líquido o del estado gaseoso de los refrigerantes. Un ejemplo de éstos se observa claramente en las curvas propuestas por el alemán Richard Mollier en 1923<sup>17</sup>, donde grafica la entalpía contra la presión para una sustancia homogénea, en estas curvas ocurre que las líneas isotérmicas presentan un valor invariante de presión cuando describen un cambio de estado, siendo indiferente la trayectoria del proceso, ya sea de líquido saturado hasta lograr obtener un vapor saturado, añadiendo energía al sistema. o a la inversa, extrayendo energía a un vapor, obteniéndose finalmente a la sustancia en el estado líquido.

El refrigerante es una sustancia donde el transporte de la energía total del sistema de refrigeración se va a presentar; este cambio en la energía es una combinación entre la energía cinética y la energía potencial presente en el sistema. La energía térmica produce un cambio en la energía potencial en las moléculas cuando se presenta el cambio de estado a otro. La cantidad de calor que absorbe en unidad de masa del refrigerante al pasar por el evaporador se conoce como *efecto refrigerante*<sup>18</sup>.

Cuando el refrigerante entra en el evaporador se efectúa un cambio de fase, a la entrada acomete en un estado líquido para salir en estado gaseoso; durante el proceso el refrigerante textualmente “hierve”, requiriendo para realizar esta transición de estados una cierta cantidad de calor, a la que se conoce como *calor latente de vaporización*.

El calor adicionado al sistema debe ser capaz de romper la tensión superficial que el líquido posee para cambiar a la fase gaseosa.

Cuando el refrigerante se encuentra en este estado, es conducido a través de un condensador, donde retorna al estado líquido por medio de extracción de calor, a este tipo de energía se le denomina *calor latente de condensación*.

Dentro de un proceso de refrigeración se puede solidificar un sistema si se extrae la energía necesaria para hacer el cambio de fase, ésta es otra forma de calor latente, en la cual la sustancia se “congela” debido al rechazo de calor y disminución de la entropía; entonces se concluye que el estado de solidificación tiene una cantidad menor de energía comparada con la que pudiese poseer la misma sustancia en el estado líquido, aun cuando las sustancias se encuentren a una misma temperatura; a este requerimiento de energía se le llama *calor latente de fusión*.

# CAPÍTULO 3

## FLUJOS DE CALOR

### 3.1 Preservación Criogénica.

Desde épocas remotas, el hombre se ha interesado por obtener mejores métodos para la conservación de los alimentos, realizando descubrimientos referentes a la preservación de éstos.

Existen muchas formas para preservar la materia orgánica, una de las metodologías de mayor uso es la refrigeración de los alimentos. Esta metodología es sumamente antigua, por ejemplo, los chinos se dieron cuenta de que el hielo mejoraba el sabor de la bebida, para lo cual trataron de conservarlo envolviéndolo con paja y broza, para posteriormente utilizarlo o venderlo durante el verano. Los egipcios conservaban el agua fría en cántaros porosos, poniendo los cántaros a la puesta del sol y durante la noche, la brisa evaporaba la humedad que se filtraban a través de las paredes del cántaro, de esta manera se enfriaba el agua.

Dentro de los anales históricos contemporáneos, uno de los primeros experimentos que se tienen registrados sobre la preservación de alimentos se dio en 1626, cuando Francis Bacon intentó conservar un pollo, rellenando su interior con nieve.

Un avance, altamente significativo, ocurrió unos años después, cuando en 1688 Anton van Leeuwenhoek inventó el microscopio; a través de este nuevo instrumento observó un cristal transparente de agua, en la cual descubrió la presencia de millones de organismos vivos, que él llamó “parásitos de los parásitos”, conocidos actualmente como microorganismos.

Posteriormente, se estudió a los microorganismos, encontrándose que éstos incrementaban su población como una función del aumento en las condiciones de calor y humedad. Además, se correlacionó el incremento de la colonia de microorganismos con el proceso de descomposición de los alimentos, encontrándose que la rapidez del detrimento se incrementaba, con la misma proporción, con que se presentaba el incremento de la vida microscópica. Por lo tanto, a manera de restringir el avance del proceso de descomposición, era necesario el control en la propagación de la colonia de microorganismos en los alimentos, por lo que se descubrió que a una temperatura de 50°F, o inferior a ésta, los microorganismos disminuían en su proliferación.

Como una resultante del producto de estas investigaciones, la naciente industria alimenticia se percató de que se podían almacenar los alimentos a una temperatura de 50°F, sin tener un riesgo significativo ante la descomposición de éstos. Debido a que la conservación de alimentos es una labor de vital importancia para la actividad humana, se dio a la tarea de eficientizar los diferentes métodos para la conservación de los alimentos mediante la utilización de hielo, primera sustancia utilizada como refrigerante.

La primera máquina para la fabricación de hielo la creó un ingeniero inglés llamado Jacob Perkins en 1834<sup>19</sup>. Esta máquina tuvo mucho éxito en las empresas empacadoras de hielo. Cincuenta años después, ya se contaba con más de 3,000 patentes sobre sistemas de refrigeración.

En un principio, cuando apareció el hielo en forma comercial, la gente lo rechazaba por que tenía la creencia de que éste era insalubre. Al paso del tiempo, se pudo constatar que el hielo artificial era de mejor calidad que el natural, ya que éste se elaboraba con agua de un mayor grado de pureza, algo conocido hoy como potabilidad, ya que por medidas de higiene, se podía destilar, como un proceso previo a su congelación; por otro lado, el hielo natural se encontraba en lagos o ríos, donde la concentración de otros componentes disueltos en el agua era superior.

Otra ventaja adicional que presentaba el hielo artificial, respecto a su similar natural, radicaba en la buena disponibilidad del primero, ya que podía producirse justo cuando fuese así requerido, y no como en el caso contrario, donde existía la necesidad de almacenarlo durante largos períodos de tiempo.

El más antiguo de los refrigerantes empleados ha sido el hielo; actualmente, se requiere disminuir la temperatura por otras necesidades, no tan sólo la conservación de alimentos; además, otras sustancias se han implementado para conseguir el mismo fin, por lo que se han desarrollado más innovaciones tecnológicas para la obtención del enfriamiento, descritas a continuación.

### **3.2 Procesos de Refrigeración.**

En la actualidad, al proceso de cambiar o mantener la temperatura de un recinto, o bien de algún otro sistema, con un valor inferior a la temperatura ambiente se le conoce como *proceso de refrigeración*. Ésto sólo es posible siempre y cuando se absorba calor del objeto a refrigerar, transfiriéndose a un cuerpo que se encuentra a una temperatura inferior. A la sustancia en la cual se va a presentar esta absorción de calor se le da a llamar: *refrigerante*.

El proceso utilizado para llevar a cabo el enfriamiento se realiza cuando el refrigerante absorbe calor de un sistema, para posteriormente cederlo a otro ambiente, manteniendo un ciclo constante de operación. Típicamente, la energía que ingresó al sistema es liberada también a condiciones ambientales, para lo cual es necesario elevar la temperatura del refrigerante a un valor superior al ambiental. Para lograr este objetivo, es necesario realizar adecuaciones sobre el agente refrigerante.

Básicamente, los sistemas de refrigeración se pueden clasificar en tres grupos, definidos en función de sus temperaturas de operación.

Un grupo está integrado por aquellos sistemas de temperatura alta, los cuales se emplean, en la mayor parte de los casos, en equipos para aire acondicionado, donde las temperaturas de servicio oscilan entre 45°F a 25°F; otro grupo lo integran los sistemas de temperatura media, utilizados mayoritariamente para la conservación de alimentos, entre otras aplicaciones, estos sistemas requieren de temperaturas de operación entre 25°F a 0°F; por último se tienen los sistemas de temperaturas bajas, que demandan valores inferiores a los 0°F para su operación, utilizados en la refrigeración de neverías, para la producción de hielo, y en un gran número de procesos industriales.

La primer persona en analizar el proceso de refrigeración fue el inglés Faraday, que durante el siglo pasado trató de aislar el amoniaco con la idea de poder estudiarlo como sustancia pura en su fase líquida.

Su experimento consistió en colocar un par de tubos de ensayo unidos por su parte superior por un tubo conector. En uno de los tubos de ensayo colocó sales de cloruro de plata que previamente habían absorbido amoniaco, estas sales enriquecidas se calentaban con un mechero de Bunsen, saliéndose del equilibrio másico la mezcla por lo que el amoniaco se vaporizaba. Al atravesar el tubo conector, se intercambiaba la energía con el medio ambiente, por lo que ocurría la condensación del amoniaco hacia el otro tubo de ensayo, por lo que en el otro extremo se podía obtenerlo en el estado líquido, pero además a una temperatura inferior, ya que el tubo conector no sólo operaba como condensador, sino que además actuaba como venturi, cambiando la presión del amoniaco. Al disminuir la presión se llevaba a cabo un incremento en la entropía, ya que las moléculas de amoniaco contaban con un mayor espacio para desordenarse, como consecuencia de este fenómeno, la temperatura decrecía también en su valor, a la par que la presión, por lo que se obtenía amoniaco en estado líquido a baja temperatura, de manera que al evaporarlo era posible enfriar otro elemento.

Como resultado del experimento de Faraday, se pudo demostrar que bastaba con disminuir la presión de ciertas sustancias en su fase líquida hasta cambiarle la fase, para que su temperatura disminuyera también, obteniéndose efecto refrigerante *a posteriori*. Sin embargo, para conceptualizar el ciclo termodinámico, era necesario que de alguna manera se incrementara la presión, y se licuara el vapor, para lo cual se plantearon dos procesos básicos.

El primero fue consecuencia del experimento de Faraday, trabajando con la concentración de solutos en mezclas, agregar calor con una caldera a la solución para salir del equilibrio másico, licuar con un condensador el vapor, y disminuir la presión con un estrangulamiento o válvula de expansión, para finalmente obtener el efecto refrigerante; obviamente se necesita regresar a las condiciones de equilibrio en la mezcla original, por lo que se disminuye la presión de la nueva solución líquida en equilibrio a la salida de la caldera, saliendo nuevamente de saturación, por lo que se absorbera el vapor calentado en la refrigeración del sistema, dándose la mezcla original e incrementando la presión con alguna bomba para que el equilibrio nuevamente se establezca. A este ciclo se le conoce como *proceso de absorción*, esquematizado en la figura 1.

El segundo proceso básico es aún más simple; a diferencia del anterior, en este proceso se trabaja con una sustancia homogénea, pero al igual que el pasado, el refrigerante se licúa, se le disminuye la presión, y por ende la refrigeración se da, sólo que en este sistema la presión es incrementada mediante un compresor, ya que la sustancia es un vapor, que se licua una vez que ha pasado por el condensador. Al ciclo cuya operación básica versa en este sentido se les conoce como *proceso de compresión*, mostrado en la figura 2.

Debido a la alta eficiencia obtenida, el proceso de refrigeración más comúnmente empleado en la actualidad es el anteriormente descrito, llevado a cabo mediante la compresión mecánica de vapores.

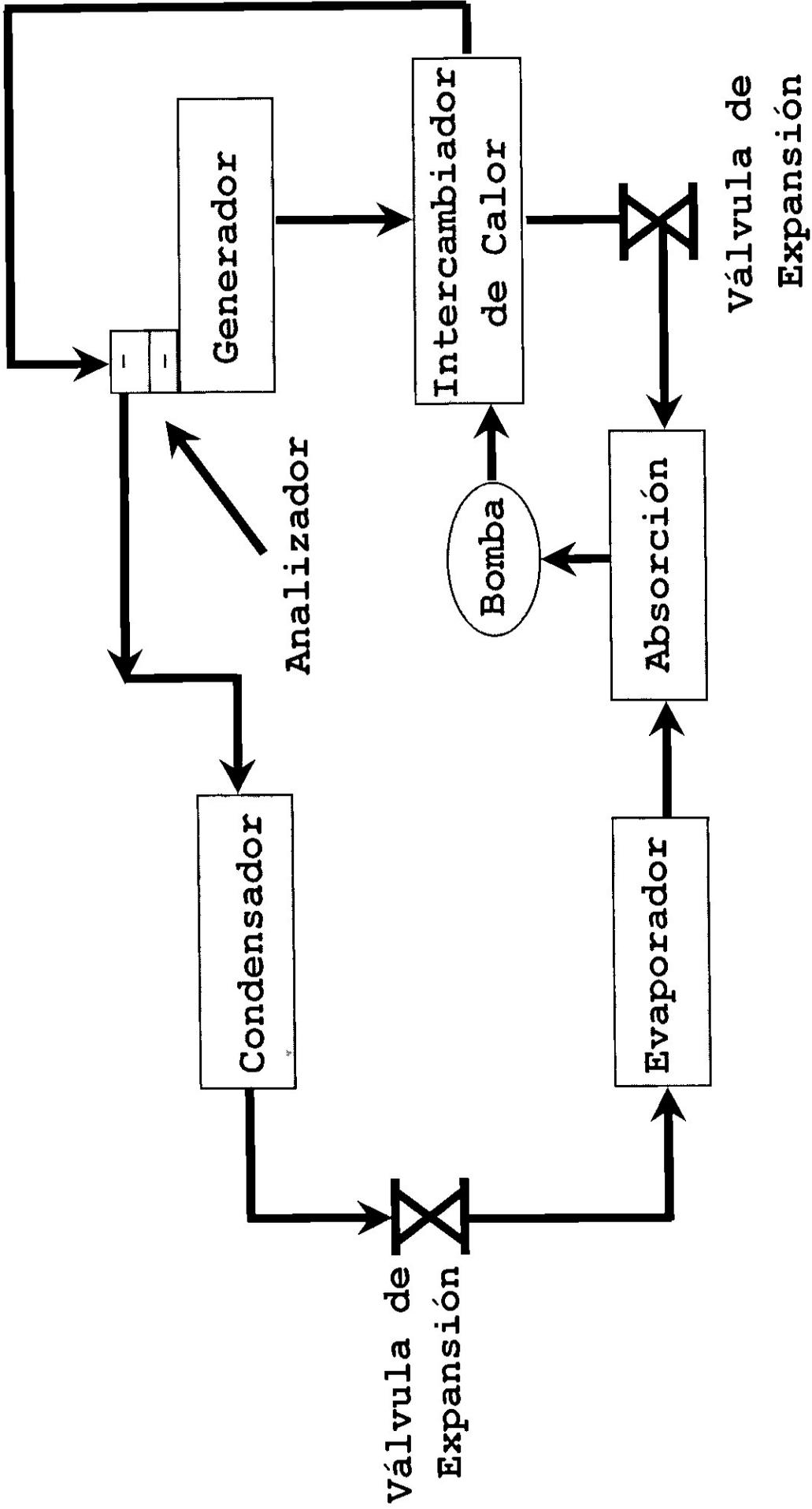


Figura 1.- Proceso de Absorción

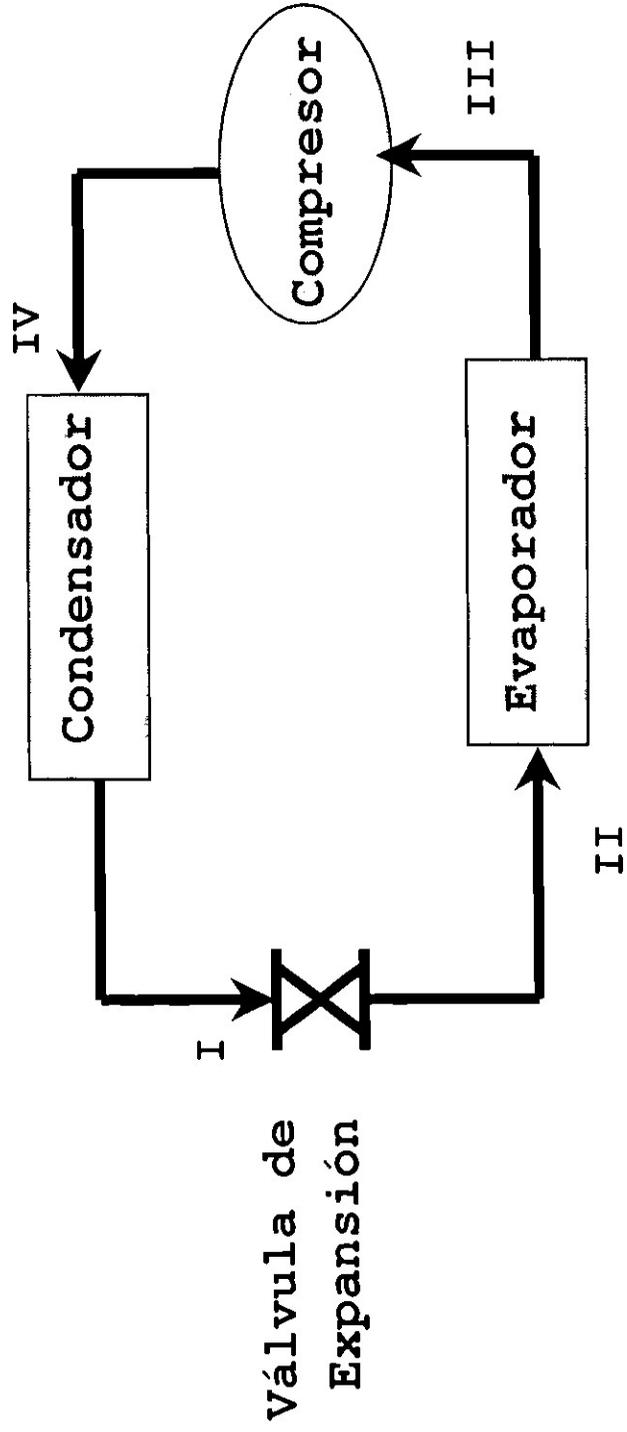


Figura 2.- Proceso de Compresión

Las principales características de esta metodología son las siguientes:

- 1) La energía que requiere el sistema se suministra en forma de trabajo mecánico; y
- 2) La sustancia de trabajo, es decir el refrigerante, sufre cambios de fases líquido-vapor, y viceversa durante el ciclo de refrigeración.

Como ya se describió anteriormente, para lograr el ciclo de refrigeración por compresión, el refrigerante desarrolla cuatro procesos fundamentales, los cuales son la evaporación, la condensación, la compresión y el estrangulamiento, para tomar energía de un medio mediante la evaporación, y posteriormente poder ceder el calor absorbido al medio ambiente mediante la condensación.

Para que se lleven a cabo los procesos anteriores, se necesita que el sistema de refrigeración conste del siguiente equipo: un evaporador, un compresor, un condensador, así como un dispositivo del control de flujo refrigerante (válvula de expansión o tubo capilar). Además, se requieren de medios conductores del fluido, tradicionalmente tuberías, que interconecten la salida del evaporador con las líneas de succión del compresor, la línea de descarga de éste con el condensador, así como la línea de líquido que conecta con el dispositivo de control.

A continuación se hace una breve descripción de los procesos fundamentales por los que debe pasar el refrigerante para producir el enfriamiento.

El proceso de evaporación es desarrollado en un intercambiador de calor, llamado precisamente así, evaporador. A través de este dispositivo, el refrigerante absorbe el calor del medio que se desea enfriar. Al darse este incremento en el calor del sistema, el refrigerante utiliza esta energía como calor latente para desarrollar un cambio de fase, a partir de una mezcla vapor-líquido hasta la obtención de vapor. La caída de presión dada en el sistema no es significativa, por lo que a este proceso se le considerará isobárico, y como presenta tan sólo un cambio de estado, se le considerará isotérmico.

Acorde a la Primera Ley de la Termodinámica, el calor que se suministra al sistema, y las condiciones energéticas a las cuales llegó el refrigerante al evaporador, deben de ser la misma cantidad de energía que se encuentra a la salida del intercambiador de calor; por lo tanto, el calor suministrado al refrigerante debe ser exactamente igual a la diferencia de entalpía entre entrada y salida del evaporador. A esta diferencia de entalpía se le conoce como *efecto refrigerante*...

$$Q_e = H_o - H_i$$

donde,  $Q_e$  es el efecto refrigerante,  $H_o$  es la entalpía de salida del evaporador, y  $H_i$  es la entalpía de entrada al evaporador.

El proceso de compresión es desarrollado por el compresor. Aquí, el compresor realiza un trabajo para elevar la presión del refrigerante. El refrigerante pasa de ser vapor a baja presión, para convertirse en un vapor recalentado a alta presión, donde la temperatura se ve incrementada también.

El proceso de compresión es de tipo politrópico, ésto es,  $PV^n$  es una constante que toma valores desde cero (isobárico) hasta infinito (isométrico). Sin embargo, el valor de este exponente se asemeja al valor de la relación entre los calores absolutos tomados a presión y volumen constante ( $C_p/C_v$ , o sea  $k$ ). Cuando  $PV^k$  es del orden de  $PV^n$ , se considera al proceso como isentrópico, o sea que no se denotan cambios en la entropía antes y después del proceso.

Este fenómeno puede deberse al hecho de que durante la compresión se va en contra del desorden, tratando de ordenar la dispersión de las moléculas del vapor; pero por otro lado, se añade energía mecánica al sistema en forma de trabajo, lo cual incrementa entalpía y entropía; por lo que, desde la perspectiva de la entropía, un efecto se opone al otro, por lo que se considera, a manera de simplificación de análisis, que este tipo de procesos mantienen una operación isentrópica. Dicha consideración se mantendrá para este trabajo.

El trabajo realizado por el compresor, agregado a las condiciones originales del refrigerante debe de ser exactamente igual que la energía a la salida del sistema compresivo, por lo que el trabajo suministrado es la diferencia de entalpía entre la entrada y la salida del compresor...

$$W = H_o - H_i$$

donde,  $W$  es el trabajo del compresor,  $H_o$  es la entalpía de salida, y  $H_i$  es la entalpía de entrada al compresor.

Existe un parámetro adimensional de todo sistema de refrigeración que indica la relación entre el beneficio y costo del mismo, conocido como coeficiente de operación (COP). Dicho parámetro se define como la razón del efecto refrigerante con el trabajo realizado por el compresor de la siguiente manera:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W},$$

El proceso de condensación se desarrolla en un intercambiador de calor conocido, precisamente, como condensador; a través de este dispositivo térmico se tiene que ceder la energía que el refrigerante absorbió durante los procesos de evaporación y de compresión. A través de este proceso, el refrigerante cambia de fase, de vapor recalentado a líquido. La energía del refrigerante a la acometida del condensador debe de ser exactamente igual a la energía a en su descarga sumada al calor que cede el refrigerante al ambiente; por lo tanto, el calor extraído por el condensador debe de ser la diferencia de entalpía entre la entrada y la salida del condensador...

$$Q_c = H_o - H_i$$

donde,  $Q_c$  es el calor extraído,  $H_o$  es la entalpía de salida, y  $H_i$  es la entalpía de entrada.

La válvula de expansión es un aditamento mecánico del sistema, y no tanto una máquina térmica, como lo fueron los casos anteriores; por lo mismo, se le considera adiabático al proceso de disminución de presión mediante este medio, y por ende isoentálpico.

Para el ciclo teórico de refrigeración no se toman en cuenta las caídas de presión en los equipos, ni en las tuberías. En la experimentación está contemplada esta situación, ya que la toma de lecturas, tanto de presión como de temperatura, son directamente valores de campo.

Para el ciclo teórico termodinámico de refrigeración, el refrigerante entra al *evaporador* como vapor húmedo de baja calidad, a una presión tal que su temperatura de saturación sea inferior a la temperatura de la sustancia que se requiere enfriar. Se establece el flujo térmico hacia el refrigerante que se evapora a baja temperatura. Durante el proceso de evaporación la temperatura del refrigerante permanece constante, de manera que la energía necesaria para realizar el cambio de estado es la que absorbe del medio, por lo que en la salida del evaporador, el refrigerante se encuentra como vapor saturado a baja temperatura.

Concluyendo, el refrigerante sale como vapor saturado del *evaporador* y entra al *compresor*, en donde se le suministra un trabajo mecánico, obteniéndose un vapor recalentado a una alta presión y a una alta temperatura. Al salir del compresor, el refrigerante pasa al *condensador*, debido a que su temperatura de saturación es superior a la del medio de condensación, se establece un flujo térmico, del refrigerante hacia su medio de condensación. El refrigerante se condensa, obteniéndose un líquido saturado a alta presión y a alta temperatura. Entonces, el refrigerante pasa por el *dispositivo de control*, que tiene como función el disminuir su presión para llevarlo a las condiciones iniciales del ciclo.

Actualmente, el sistema de refrigeración ha sufrido modificaciones en su diseño básico; esto ha sido llevado a cabo por varios fines, excluyentes e incluyentes, como el efficientizar el sistema, incrementar la capacidad refrigerante del mismo, evitar la contaminación con el medio ambiente, así como aprovechar de forma óptima disposición de la energía.

### 3.3 Refrigerantes.

En el apartado anterior se mencionó que la sustancia utilizada para extraer calor al medio se le llama refrigerante.

Las características propias del refrigerante son los factores que determinan la operación del sistema de refrigeración. El refrigerante debe de tener ciertas propiedades físicas, químicas y termodinámicas que determinen los criterios para la selección del mismo en una operación específica. Para normar estos criterios de selección, se considera que el refrigerante ideal debe de cumplir con las siguientes características<sup>20</sup>:

A) Comportamiento de los refrigerantes con el calor y temperatura.

- El punto de congelación del refrigerante debe ser más bajo que cualquier temperatura que se pueda controlar en el sistema. De lo contrario, el refrigerante se congelaría en el evaporador.
- El calor latente de vaporación del refrigerante debe ser alto.

B) Volumen y densidad de los refrigerantes.

- El volumen del vapor debe ser lo mas pequeño, en base a ésto se utiliza pequeños diámetros en las líneas de succión.
- La densidad del refrigerante debe ser alta, siempre y cuando las unidades tanto del evaporador y condensador se encuentren a un mismo nivel .

C) La presión de los refrigerantes.

- Se recomienda que la presión del condensador sea baja cuyo beneficio se tendría al utilizar un equipo de peso ligero y evitar fugas del refrigerante.
- El diferencial de presión, entre baja y alta del sistema, debe de ser lo menor posible, repercutiendo directamente este aspecto en un bajo costo de operación.

D) Propiedades químicas de los refrigerantes.

- Soportar temperaturas y presiones de operación, sin degradación química.
- Ser incombustible, en estado líquido o gaseoso, o mezclándose con el aire.
- No ser corrosivo, y reactivo alguna otra sustancia dentro del sistema.
- No ser tóxico, tanto para los seres humanos, las plantas o los animales.
- No tener efectos perjudiciales sobre el sabor, color o aroma de los alimentos y el agua para beber.

E) Propiedades físicas de los refrigerantes.

- Llevar aceite en solución .
- Ser miscible, ésto es, apto de mezclarse con el aceite a una cantidad suficiente para la lubricación.
- No tener una reacción perjudicial con el aceite, aún en presencia de la humedad.
- Tener una resistencia eléctrica alta, para evitar cortocircuitos eléctricos en el sistema.

F) Otras consideraciones que debe el refrigerante tener.

- Inversión inicial baja.
- Bajo costo en el mantenimiento requerido.

Se reconoce que no existe un refrigerante ideal que satisfaga los requerimientos anteriores, por lo que un refrigerante será especificado acorde a las condiciones de servicio.

Para la selección de un refrigerante se deben especificar los límites térmicos en los cuales se debe operar. La temperatura crítica del fluido deberá ser bastante mayor a la máxima temperatura de trabajo en el sistema. Así como el punto de congelación deberá ser mucho menor que la mínima temperatura del sistema.

La presión de vapor del refrigerante determina la presión desarrollada en el condensador, así como en el evaporador, bajo las condiciones de operación. Se debe de operar a presiones moderadas con la finalidad de utilizar materiales ligeros de construcción y equipos normales, reduciendo con lo anterior el peso, el tamaño y el costo del equipo. La presión del evaporador debe de ser superior a la presión atmosférica para evitar la entrada de aire dentro del equipo.

El fluido refrigerante ideal deberá tener una presión de condensación relativamente baja, lo cual implica una razón de compresión menor, ésto origina un consumo menor de potencia y una alta eficiencia volumétrica. Este último punto es importante porque permite el uso de compresores pequeños, además de que abate los costos de operación.

Un refrigerante con un calor latente grande, poseerá un mejor efecto refrigerante que otra sustancia que posea uno menor a las mismas condiciones de operación del evaporador. Ésto repercute en una reducción de tuberías, intercambiadores y compresor. Por lo que el tamaño del equipo también se reduce, siempre y cuando el fluido refrigerante posea una densidad baja.

El punto de ebullición deberá ser menor que la temperatura de evaporación para que el lado de baja presión opere arriba de la presión atmosférica, evitando así la entrada de aire o humedad dentro del sistema.

La capacidad calorífica del fluido refrigerante líquido deberá ser lo más baja posible para incrementar el efecto de subenfriamiento, por otro lado el calor específico del vapor debe de ser lo más alto posible para reducir el efecto de recalentamiento

Con el fin de reducir las caídas de presión en el sistema, el fluido refrigerante deberá tener una valor de viscosidad y de tensión superficial bajos.

La conductividad térmica del fluido deberá ser alta, tanto en el líquido como en el vapor, con el fin de favorecer la transferencia de calor en los intercambiadores.

Cada refrigerante se designa con una R y un número basado en el Sistema de Numeración Internacional, que se explica en detalle en las normas British Standard 4580 (1970) y American Standard B 79.1 (1960).

Para 1967, la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración, y Aire Acondicionado (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, ASHRAE) propuso una estandarización en la nomenclatura de los refrigerantes<sup>21</sup> con tres dígitos que representen el contenido de carbono, hidrógeno y flúor respectivamente; el primero de los dígitos corresponderá al contenido de carbonos menos uno por molécula, el segundo de los dígitos tendrá el valor del número de hidrógenos más uno por molécula del refrigerante, y la cantidad de átomos de flúor en cada molécula será directamente el valor del tercer dígito. Los refrigerantes inorgánicos se agrupan arbitrariamente entre el R-700 y el R-800.

Uno de los primeros refrigerantes que se utilizó fue el amoníaco ( $\text{NH}_3$ , R-717). Este refrigerante es tóxico, flamable y explosivo; sin embargo, bajo ciertas condiciones de operación, sus propiedades térmicas lo hacen insustituible en algunas plantas como fábricas de hielo, empresas empacadoras y grandes bodegas frigoríficas.

El amoníaco tiene un punto de ebullición a presión atmosférica de  $-28.012\text{ }^\circ\text{F}$ , y presiones de operación moderadas. Aunque el amoníaco no es corrosivo a todos los metales comunes, en presencia de humedad corroe metales no ferrosos, tales como el cobre y sus aleaciones. Debido a su buen efecto refrigerante tiene un uso extenso en la actividad industrial. Cuando este refrigerante se utiliza para fines domésticos, contiene poca cantidad de amoníaco, y un gran volumen de agua.

Otro refrigerante que se empezó a utilizar fue el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ , R-764). Este refrigerante no es flamable, ni explosivo, pero en presencia de humedad corroe a los metales, por la formación de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), que favorece el proceso de corrosión en la mayoría de los metales. Además, el dióxido de azufre es tóxico, pero posee un olor fácilmente distinguible, por lo que no es considerado como una sustancia peligrosa. Actualmente ya está en desuso.

De entre los primeros refrigerantes que se comenzaron a utilizar, uno de los más importantes fue el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ , R-744). Este compuesto es conocido en la jerga como hielo seco. Es muy popular por no ser un refrigerante tóxico, irritante, e inflamable. Sin embargo, a condiciones industriales normales de operación es raro que se le encuentre en su fase líquida, por lo que a condiciones ambientales, el hielo seco sublima, esto es, pasa del estado sólido al gaseoso y viceversa. Además, es un material costoso para su obtención como sustancia pura. Actualmente su uso es muy limitado.

El agua y el aire (R-718 y R-729) fueron los primeros refrigerantes utilizados, y aún siguen siendo de amplia aplicación en todos los procesos industriales, comerciales, y de servicio. Se encuentran en las torres de enfriamiento, en enfriadores de agua para aire acondicionado, aires lavados, y un sinnúmero de aplicaciones más.

Posteriormente, se dio la innovación de utilizar como refrigerantes a los hidrocarburos, éstos son compuestos de carbono e hidrógeno, tales como el metano ( $\text{CH}_4$ , R-50), el isobutano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , R-601), el etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ , R-170), el butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , R-600), el etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ , R-1150), el propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ , R-290) y el propileno ( $\text{C}_3\text{H}_6$ , R-1270), utilizados comúnmente en la industria como combustibles.

La característica no deseada que poseen estos hidrocarburos es que se oxidan con suma facilidad, siendo su oxidación un proceso de tipo exotérmico, con una gran cantidad de energía liberada en el mismo; además, esta combustión se le puede encontrar en una amplia gama de temperaturas.

Al combinar químicamente los hidrocarburos con el cloro, disminuye su ignición significativamente, por lo que se formó una nueva familia de refrigerantes, los *hidrocarburos halogenados*, ya que el cloro forma parte de la familia de los halógenos.

En la actualidad son estos refrigerantes, los hidrocarburos halogenados, los de principal aplicación en los sistemas de compresión, conocidos popularmente como clorofluorocarbonos (CFC).

Entre los primeros en emplearse comercialmente figuraron el tetracloruro de metano ( $\text{CCl}_4$ , R-10), el cloruro de metilo ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ , R-40), el tricloruro de metano, también conocido como cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ , R-20) además del cloruro de metileno ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , R-30), todos ellos de menor efecto refrigerante que los alcanos originales, pero asimismo, de menor riesgo, tanto en toxicidad como en flamabilidad.

Con el tiempo quedaron en desuso, debido a la inclusión de flúor, sustituyendo al hidrogeno en la molécula, de manera que se logró incrementar el efecto refrigerante gracias a esta nueva adición, y además se pudieron mantener bajos los niveles de riesgo a la salud.

En el capítulo siguiente se analizarán los hidrocarburos halogenados en base a flúor y cloro, refrigerantes de actual uso común, la distorsión ambiental generada, así como algunas propuestas de solución.

# CAPÍTULO 4

## DISTORSIÓN AMBIENTAL

### 4.1 Formación del ozono.

Uno de los grandes problemas que se presenta en México, así como para el resto del mundo, es la contaminación ambiental.

La contaminación es un proceso en el cual se incrementa la concentración de agentes extraños a un hábitat. Acorde a esta definición, las plagas que devienen en una región son un tipo de contaminación, el sembrar árboles que no son de la región es también contaminación, el tener un exceso poblacional, superior al que el ecosistema pueda sustentar, ya sea humana, animal o vegetal, también lo es.

El tópico específico en el que se va a centrar el estudio de este trabajo es en las capas superiores de la atmósfera. A continuación se hace una breve descripción de las características físicas de esta región.

Las propiedades en la atmósfera se modifican continuamente en forma caótica, de manera que la temperatura y la presión presentan una alta variabilidad. Entre otras, la altitud es una de las variables de modulan las condiciones atmosféricas. Una de las causas por la cual se presenta esta variación se debe a que la atmósfera ésta sujeta a constantes bombardeos de radiación, de partículas provenientes del sol y a radiaciones cósmicas provenientes del exterior del sistema solar. La atmósfera opera entonces como barrera de contención, absorbiendo la energía, por lo que se presentan cambios químicos en su composición, en especial en las capas más externas.

Además, la variación en la composición de la atmósfera, en función de la altitud también se debe al campo gravitacional de la tierra, ya que las partículas más ligeras tienden a estar en las partes más superficiales de la atmósfera, mientras que las de mayor densidad tienden a estar en las capas interiores.

A continuación, se muestra la composición media de la atmósfera, en su estrato más interno, ésto es, a nivel del mar.

Tabla 1.- Composición del Aire Seco, a nivel del mar.

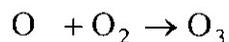
COMPONENTE	CONTENIDO (Fracción Molar)	PESO MOLECULAR
NITRÓGENO	0.78084	28.013
OXÍGENO	0.20948	31.998
ARGÓN	0.00934	39.948
DIÓXIDO DE CARBONO	0.000330	44.0099
NEÓN	0.00001818	20.183
HELIO	0.00000524	4.003
METANO	0.000002	16.043
KRIPTON	0.00000114	83.80
HIDRÓGENO	0.0000005	2.0159
ÓXIDO NITROSO	0.0000005	44.0128
XENÓN	0.000000087	131.30

*\* El ozono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el amoníaco y el monóxido de carbono se encuentran presentes en cantidades muy pequeñas como trazas de gases.*

A esta capa de la atmósfera, donde la vida toma presencia, se le conoce bajo esta misma característica, biósfera. En la medida que se va incrementando en altitud, distancia existente entre un cuerpo y el nivel del mar, las partículas más ligeras como O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> o He, incrementan su concentración.

A una elevación de aproximadamente 90 km, la mayoría de la radiación solar de longitud de onda inferior a los 400 nm, es capaz de provocar la ionización en el oxígeno, al absorberse esta energía para llevar a cabo este proceso. Como resultado de esto, la concentración de iones crece como una función de la altitud.

Los procesos químicos que se presentan en la región inferior a los 90 km, siguiendo la fotodisociación de O<sub>2</sub>, son muy diferentes de los procesos que ocurren a elevaciones mayores. En las capas atmosféricas media y externa (mesósfera y estratósfera), la concentración de O<sub>2</sub> es mucho mayor que la del oxígeno iónico. De esta manera, cuando se forman los iones de oxígeno en la mesósfera y en la estratósfera, sufren choques frecuentes con las moléculas O<sub>2</sub>. Estos choques producen la formación del ozono, O<sub>3</sub>:



La molécula de ozono posee un exceso de energía, del orden de 105 KJ/mol, por lo que a esta molécula se le considera metaestable. En función del tiempo, esta energía se libera de la molécula de O<sub>3</sub>, ya que el estado de menor energía existe en su forma disociada, formando la molécula de O<sub>2</sub> y el ion O<sup>•</sup>. La energía liberada por la molécula de O<sub>3</sub> puede ser eliminada por los choques con los otros átomos o moléculas, y transferirles a algunos de ellos el exceso de energía.

Como la radiación inferior a los 400nm, del total de la emisión solar, es absorbida en las capas externas de la atmósfera, esta energía no incide en la biósfera, de manera que la vida en este estrato se presenta bajo estas características.

Por lo tanto, el ozono es una protección de la vida actual en la tierra, debido a que esta capa absorbe gran parte de la radiación ultravioleta emitida por el sol.

La formación del ozono se da en forma natural en la estratósfera, con la unión del  $O_2$  y el  $O^{\cdot}$ , la cual dura aproximadamente 7 seg. Ésto se debe a que el  $O_2$  es el estado de equilibrio del oxígeno; por otro lado, el  $O^{\cdot}$  que se encuentra libre en la estratósfera se une para formar nuevas moléculas, ya sea  $O_2$  o bien  $O_3$ . La radiación ultravioleta es la fuente de energía necesaria para disociar los molécula diatómica, o bien, formarse como ozono. Pero como el  $O_2$  se encontraba estable antes de formar la molécula del ozono, se inestabiliza, y trata de mantenerse estable otra vez, por lo que se separa del  $O^{\cdot}$ .

El problema se hace presente cuando el ion oxígeno se une con otros elementos distintos al oxígeno para formar nuevas partículas. Al momento que  $O^{\cdot}$  se une con otro elemento, éste se estabiliza, y entonces ¿Quién va a absorber el calor que disipa la radiación ultravioleta?. Ésto es una gran preocupación porque la radiación entra directamente sin que nada se interponga, entonces va deteriorándose la capa formada de ozono.

Para 1974, el ahora premio Nobel mexicano Mario J. Molina y el estadounidense F. Sherwood Rowland, de la Univerisdad de California, describieron la acción de ciertas sustancias<sup>22</sup>, tales como los hidrocarburos halogenados en base a metano, empleados en los sistemas de refrigeración, aires acondicionados, o aerosoles, como agentes de degradación directa en la formación del ozono. Si tal sustancia se fuga de un sistema de refrigeración, este vapor se integra a la atmósfera, y debido a su baja densidad, asciende hasta las capas superiores de la atmósfera, justo donde la inestabilidad del oxígeno es presente.

El cloro y el flúor, halógenos base de estos refrigerantes, se ionizan negativamente, por lo que se desplazan hacia el polo positivo magnético del planeta, ubicado al sur del la isla de Tasmania y al norte del continente Antártico. La concentración de estos elementos se incrementan en esta región, por lo que la inestabilidad del oxígeno disminuye ante la presencia de los halógenos, formando óxido de cloro u óxido de fluor, estabilizándose.

A pesar de que el incremento en la concentración de agentes contaminantes es grande en el polo magnético positivo de la tierra, la dispersión de los mismos también lo es, debido a la corriente de chorro ocurrente en el polo sur geográfico. Debido a ésto, la zona afectada apareció en la década de los 70's y se fue incrementando hasta mediados de la década posterior alcanzando el equilibrio a finales de la misma en un diámetro medio de 10 km, oscilante este valor, y con tendencia a disminuir, en función de la generación cada vez menor de agentes que merman la capa de ozono.

La solución es clara, la unión entre el oxígeno con el cloro y flúor no debe ocurrir. Consecuencia a ésto, se han estudiado algunas propuestas de solución para reemplazar el uso de estos refrigerantes, fuentes principales de la distorsión.

A continuación se describirán los refrigerantes existentes en la actualidad, así como su composición, y su efecto sobre la capa de ozono.

## **4.2 Hidrocarburos Halogenados.**

El tricloromonofluorometano ( $\text{CCl}_3\text{F}$ , R-11) es un fluorocarburo de la serie del metano, tiene el punto de ebullición de valor  $74.7^\circ\text{F}$  a la presión atmosférica. Las presiones de funcionamiento a condiciones de toneladas estándar son de 2.94 libras por cada pulgada cuadrada absolutas (psia) y 18.19 psia. Debido al pequeño valor de las presiones de funcionamiento, y al desplazamiento del compresor relativamente alto, éste refrigerante se emplea con compresores centrífugos, sobre todo en sistemas de aire acondicionado para pequeñas oficinas en edificios. Este refrigerante no es corrosivo ni tóxico, su combustión se presenta en condiciones muy restringidas de presión y temperatura, por lo que se considera como no inflamable, pero disuelve al hule natural. Para detectar fugas se utiliza una antorcha hálida.

El diclorodifluorometano ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , R-12) es uno de los refrigerantes más utilizados hasta hace algunos años. Es seguro, ya que no es tóxico, ni flamable o explosivo. Es muy estable, y no se descompone aún bajo condiciones extremas de operación. Sin embargo, si se pone en contacto en una flama abierta se descompone en productos muy tóxicos. Además de ser muy seguro, tiene presiones de condensación moderadas bajo condiciones atmosféricas normales, y una temperatura de ebullición de  $-20.92^\circ\text{F}$  a la presión atmosférica, lo cual lo hace útil para todo tipo de aplicaciones.

Sin embargo es uno de los refrigerantes que tienen mayor efecto sobre la destrucción de la capa de ozono. El 31 de diciembre de 1997 se dejó de producir internacionalmente.

El monoclorodifluorometano ( $\text{CHClF}_2$ , R-22) se desarrolló para aplicaciones a temperaturas bajas, ya que tienen una temperatura de ebullición, a presión atmosférica, de  $-41.44^\circ\text{F}$ . Debido a que requiere un desplazamiento menor en el compresor, comúnmente se utiliza sustituyendo al R-12. Sin embargo, las presiones de operación son mayores, en comparación con el R-12, así como la temperatura de descarga del compresor. La degradación de la capa de ozono en este refrigerante es inferior en una razón de 20 veces, que el efecto producido por el R-12, pero aún así, es importante su reemplazo.

El diclorotetrafluoroetano ( $\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$ , R-114) tiene un punto de ebullición de  $38.408^\circ\text{F}$  a condiciones atmosféricas, y bajas presiones de operación. Se utilizaron compresores centrífugos de grandes instalaciones. Es un refrigerante muy seguro y estable. Este refrigerante contribuye a la degradación de la capa de ozono, aunque en poca escala, por lo que su reemplazo es importante.

Estos refrigerantes han sido objeto de restricciones en su uso a partir de la firma del Protocolo de Montreal en septiembre de 1987, debido a ser evidente su impacto en el deterioro de la capa de ozono.

De los primeros refrigerantes, sólo el amoníaco se sigue utilizando debido a sus excelentes propiedades térmicas, a pesar de ser tóxico y en ciertos casos inflamable.

#### **4.3 Propuesta Americana.**

El diclorotrifluoroetano ( $C_2HCl_2F_3$ , R-123), a pesar de poseer cloro y flúor, se considera que no impacta significativamente en la capa de ozono, debido al incremento presentado en su densidad, que le dificulta el presentarse en este estrato. Sin embargo, al incrementarsele la densidad, la compresión necesaria para el proceso termodinámico se incrementa también, por lo que su utilización como refrigerante aumenta el costo de operación de la refrigeración.

El 1,1,1,2 tetrafluoroetano ( $C_2H_2F_4$ , <sup>R-134a</sup>R-123a), tiene un comportamiento termodinámico muy similar al que presenta el R-12. Existen diferencias significativas como la ausencia de cloro, además del incremento en el peso molecular del refrigerante, que en su estado gaseoso le proporciona una densidad mayor, en comparación con los refrigerantes cuya base es el metano, por lo tanto el daño en la capa de ozono es casi nulo.

Estos dos refrigerantes, al igual que los hidrocarburos en base a metano, no presentan toxicidad, además de poseer bajos índices de flamabilidad.

#### **4.4 Propuesta Europea.**

Esta propuesta consiste en utilizar una mezcla de dos o más hidrocarburos como sustancia refrigerante para el ciclo de compresión. Las mezclas de hidrocarburos pueden ser azeotrópicas, o bien, no-azeotrópicas.

Una mezcla azeotrópica es aquella en la cual las sustancias involucradas mantienen condiciones homogéneas en sus propiedades físicas, bajo los cambios termodinámicos presentes en un sistema.

Las mezclas no-azeotrópicas son aquellas que no mantienen la homogeneidad para condiciones termodinámicas de operación en un sistema, por lo que la heterogeneidad se presenta. Debido a este comportamiento heterogéneo, la flamabilidad disminuye.

Actualmente están en estudio mezclas no-azeotrópicas de hidrocarburos como combinaciones de propano con isobutano, entre otras, buscando minimizar el riesgo por flamabilidad en el sistema.

Estas sustancias poseen un mejor efecto refrigerante que los propios hidrocarburos halogenados, por lo que además de proteger la capa de ozono, al utilizar estas mezclas se obtiene ahorro de energía, al disminuirse los costos de operación, por una compresión menor. Este trabajo analizará el beneficio de utilizar una de estas mezclas en particular.

# CAPÍTULO 5

## EXPERIMENTACIÓN

### 5.1 Diseño de Experimentos.

Tomando como marco de referencia lo descrito en capítulos anteriores, existe la necesidad actual de sustituir los hidrocarburos halogenados en base a metano para no alterar significativamente la capa de ozono; por lo que se desea caracterizar algún refrigerante que cumpla con una de las propuestas de solución, con la idea de adecuar, con mayor precisión, los futuros criterios para la selección; por lo tanto para la elaboración de la experimentación, se aseveró la siguiente hipótesis:

*El coeficiente de rendimiento se incrementa  
al utilizar una mezcla de hidrocarburos no-azeotrópica.*

A continuación analizamos las condiciones que los hidrocarburos, como sustancias puras y homogéneas, poseen un mayor efecto refrigerante en la ausencia de halógenos; sin embargo, una mezcla no-azeotrópica es una sustancia heterogénea, pero en base al principio descrito *a priori*, se seleccionó como objeto de estudio una mezcla de este tipo, como parte de la propuesta europea, cuya composición constó de 50% de propano y 50% de isobutano.

La caracterización consistió en el análisis de las condiciones termodinámicas del sistema de refrigeración con esta mezcla no-azeotrópica, por lo que se seleccionó para la experimentación un sistema de refrigeración por compresión de émbolo recíprocante, utilizado en el proceso de destilación para una industria de transformación química.

En el sistema seleccionado para análisis, el refrigerante empleado para el diseño original es el R-22, cuya capacidad nominal era de 50 toneladas de refrigeración.

La experimentación consistió en evaluar los estados termodinámicos que el refrigerante 22 presenta en el sistema, así como los efectos que la mezcla no-azeotrópica produce en el mismo, bajo las mismas condiciones de requerimiento en su operación, para finalmente hacer un análisis comparativo entre ambos casos, y comprobar la hipótesis.

## **5.2 Operación con el Refrigerante 22.**

El experimento fue realizado a una presión atmosférica de 15 psia, y a una temperatura ambiente de 95°F. Las condiciones de operación del sistema de refrigeración fueron sensadas directamente en la unidad de enfriamiento, siendo las siguientes: en la zona de alta presión se contaba con un valor de 390 psi (405 psia), y en la zona de baja presión se obtenían valores de 67 psi (82 psia), la temperatura en la descarga del compresor ascendía a 271 °F, la temperatura en la succión del compresor era de 82 °F, y la temperatura en la entrada a la válvula de expansión fue de 108°F.

Una vez obtenidos los datos de operación, se representa el ciclo de refrigeración, en el gráfico propuesto por Mollier en 1932, donde el eje de las ordenadas lo representa la presión, mientras que el eje de las abscisas está definido por la entalpía del sistema. En la figura 3, se muestra este gráfico para el refrigerante 22, en el cual se indica el ciclo termodinámico que ocurre en el sistema. Una vez identificado el ciclo, es posible el determinar las condiciones de estado para el mismo, compilándose esta información en la Tabla 2.

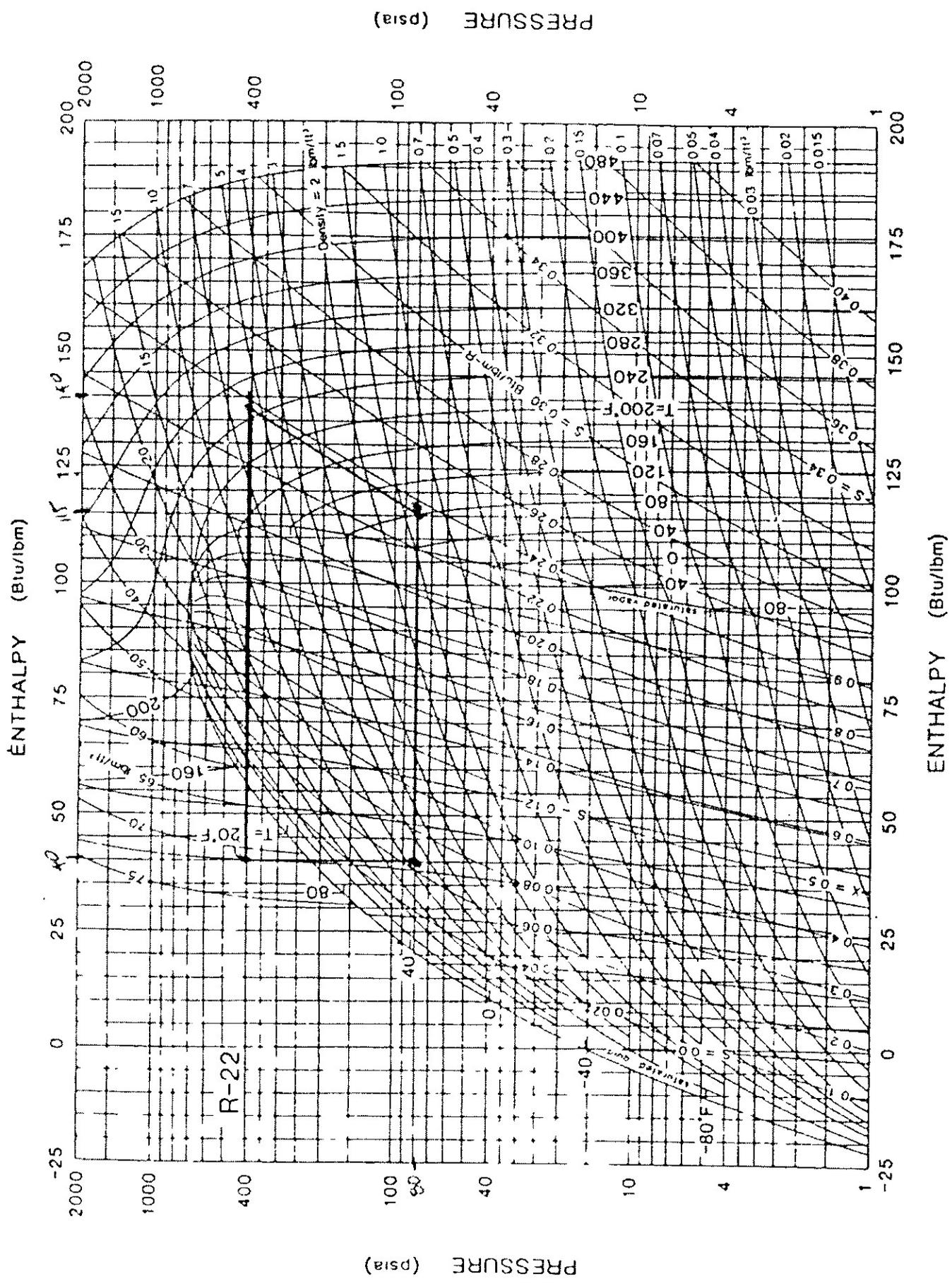


Tabla 2.- Condiciones de Estado para el R-22.

Condición de Estado	Presión (psia)	Temperatura (°F)	Entalpía (BTU/Lb)	Entropía (BTU/Lb·°R)	Densidad (Lb/pie <sup>3</sup> )
1	405	108	40	0.075	72
2	82	38	40	0.085	6.5
3	82	82	115	0.235	1.35
4	405	271	141	0.235	5.5

Donde la condición de estado 1 ocurre en la salida del condensador, la condición de estado 2 fue asignada a la entrada al evaporador, la condición de estado 3 se consideró como la succión del compresor, y la condición de estado 4 representa la descarga del condensador.

El efecto refrigerante ocurrido en el evaporador se estima, tomando como sustento la Primera Ley de la Termodinámica, y seleccionando algunos valores de entalpía implicados en el ciclo termodinámico, de la siguiente manera:

$$Q_e = \Delta H$$

$$Q_e/m = \Delta h = h_3 - h_2$$

$$Q_e/m = 115 \text{ BTU/Lb} - 40 \text{ BTU/Lb}$$

$$Q_e/m = 75 \text{ BTU/Lb}$$

El trabajo realizado por el compresor se estima de la misma manera...

$$W_e = \Delta H$$

$$W_e/m = \Delta h = h_4 - h_3$$

$$W_c/m = 141 \text{ BTU/Lb} - 115 \text{ BTU/Lb}$$

$$W_c/m = 26 \text{ BTU/Lb}$$

Entonces es posible estimar el coeficiente de rendimiento (COP) que posee el sistema de refrigeración, como sigue:

$$\text{COP} = \frac{\text{Efecto Refrigerante}}{\text{Trabajo realizado por el Compresor}}$$

$$\text{COP} = \frac{75 \text{ BTU/Lb}}{26 \text{ BTU/Lb}}$$

$$\text{COP} = 2.88$$

Por otro lado, para la operación de la compresión del sistema de refrigeración, se cuentan con dos motores trifásicos, de los cuales se obtuvieron lecturas de la corriente suministrada a ambos motores, siendo las siguientes:

$$\text{Motor}_1 \begin{cases} 49.4 \text{ Amp} \\ 43.7 \text{ Amp} \\ 47.9 \text{ Amp} \end{cases} \quad \text{y} \quad \text{Motor}_2 \begin{cases} 49.0 \text{ Amp} \\ 44.6 \text{ Amp} \\ 47.5 \text{ Amp} \end{cases}$$

Para determinar la potencia consumida por el compresor es necesario, primeramente, el calcular la corriente consumida por cada motor.

$$I_{\text{Motor \#1}} = \frac{49.4 \text{ Amps} + 43.7 \text{ Amps} + 47.9 \text{ Amps}}{3}$$

$$I_{\text{Motor \#1}} = 47 \text{ Amperes}$$

$$I_{\text{Motor \#2}} = \frac{49.0 \text{ Amps} + 44.6 \text{ Amps} + 47.5 \text{ Amps}}{3}$$

$$I_{\text{Motor \#2}} = 47 \text{ Amperes}$$

Una vez estimado el consumo eléctrico, y tomando como fuente de información los datos de diseño que el fabricante describe en su placa, siendo éstos, el voltaje de operación (440 Volts) y el supuesto factor de potencia (0.85), se determina la potencia consumida:

$$\text{Potencia Consumida} = \sqrt{3} \text{ V} \cdot \text{I} \cdot \text{FP}$$

$$\text{Potencia Consumida} = \sqrt{3} \text{ V} \cdot \left( \frac{\text{I}_{\text{Motor \#1}} + \text{I}_{\text{Motor \#2}}}{2} \right) \cdot \text{FP}$$

$$\text{Potencia Consumida} = \sqrt{3} (440 \text{ Volts}) \cdot \left( \frac{47 \text{ Amp} + 47 \text{ Amp}}{2} \right) \cdot (0.85)$$

$$\text{Potencia Consumida} = 30.44 \text{ KWatts}$$

$$\text{Potencia Consumida} = 40.82 \text{ HP}$$

Existe una proporcionalidad directa ( $\eta_c$ ) entre la potencia consumida real por el compresor y el aprovechamiento del mismo en el ciclo de refrigeración, siendo la eficiencia de compresión la constante de proporcionalidad entre ambas cantidades.

$$w \propto \text{Potencia Consumida}$$

$$w = \eta_c \cdot \text{Potencia Consumida}$$

Obteniéndose la constante de proporcionalidad de transferencia en la compresión del equipo como:

$$\eta_c = \frac{w}{\text{Potencia Consumida}}$$

$$\eta_c = \frac{26 \text{ BTU/Lb}}{40.82 \text{ HP}}$$

$$\eta_c = 0.636 \text{ BTU/HP} \cdot \text{Lb}$$

Ya que el sistema no va a ser sometido a ninguna alteración estructural, se considera la eficiencia de compresión y al efecto refrigerante como constantes, al momento de hacer el cambio de refrigerante, ya que el primero es un parámetro mecánico, y el segundo es función del servicio.

### 5.3 Operación con la Mezcla No-Azeotrópica.

Al sistema de refrigeración se le extrajo el refrigerante 22, y fue sustituido por la mezcla no-azeotrópica descrita anteriormente, operando bajo las mismas condiciones que en el análisis anterior, ésto es, mismos requerimientos de consumo y condiciones ambientales similares.

Las condiciones resultantes de la operación en el sistema de refrigeración, haciendo el cambio de refrigerante, fueron las siguientes: la presión en la zona considerada como alta fue de 280 psi (295 psia), la presión en la zona de baja poseyó un valor de 78 psi (93 psia), la temperatura a la descarga del compresor fue de 176°F, la temperatura en la succión del compresor fue de 71°F, y la temperatura de la salida de la válvula de expansión fue de 108°F.

Si se considera al efecto refrigerante como una constante, ya que está en función del servicio, y éste sigue siendo un requerimiento constante para la destilación, su valor permanecerá invariante de  $75 \text{ BTU/Lb}$ .

Asi mismo, la eficiencia en el trabajo del compresor permanece constante, por ser las pérdidas existentes del orden mecánico, con un valor invariante de  $0.636 \text{ BTU/HP} \cdot \text{Lb}$ .

El consumo de energía eléctrica se registró de los dos motores trifásicos, obteniéndose los siguientes datos:

Motor <sub>1</sub>		42.1 Amps							
		45.2 Amps		y		Motor <sub>2</sub>		40.5 Amps	
		45.0 Amps						42.6 Amps	
								43.3 Amps	

Para determinar la potencia consumida por el compresor es necesario calcular la corriente consumida por cada motor.

$$I_{\text{Motor \#1}} = \frac{42.1\text{Amps} + 45.2\text{Amps} + 45.0\text{Amps}}{3}$$

$$I_{\text{Motor \#1}} = 44.1 \text{ Amperes}$$

$$I_{\text{Motor \#2}} = \frac{40.5\text{Amps} + 42.6\text{Amps} + 43.3\text{Amps}}{3}$$

$$I_{\text{Motor \#2}} = 42.13 \text{ Amperes}$$

Una vez estimado el consumo eléctrico, y considerando nuevamente el voltaje de operación como 440 Volts y el supuesto factor de potencia de 0.85, se determina la potencia consumida.

$$\text{Potencia Consumida} = \sqrt{3} \text{ V} \cdot \text{I} \cdot \text{FP}$$

$$\text{Potencia Consumida} = \sqrt{3} \text{ V} \cdot \left( \frac{I_{\text{Motor \#1}} + I_{\text{Motor \#2}}}{2} \right) \cdot \text{FP}$$

$$\text{Potencia Consumida} = \sqrt{3} (440 \text{ Volts}) \cdot \left( \frac{44.1 \text{ Amp} + 42.13 \text{ Amp}}{2} \right) \cdot (0.85)$$

$$\text{Potencia Consumida} = 27.93 \text{ KWatts}$$

$$\text{Potencia Consumida} = 37.45 \text{ HP}$$

El trabajo térmico realizado por el sistema de compresión será igual al producto de la potencia consumida con la eficiencia de transformación de compresión, obteniendo:

$$w = \eta_c \cdot \text{Potencia Consumida}$$

$$w = \left( 0.636 \frac{\text{BTU}}{\text{HP} \cdot \text{Lb}} \right) \cdot (37.45 \text{ HP})$$

$$w = 23.85 \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}}$$

Una vez estimado el trabajo térmico realizado por el compresor, es posible estimar el coeficiente de rendimiento (COP), ahora con la mezcla no-azeotrópica, siendo...

$$\text{COP} = \frac{\text{Efecto Refrigerante}}{\text{Trabajo realizado por el Compresor}}$$

$$\text{COP} = \frac{75 \text{ BTU/Lb}}{23.85 \text{ BTU/Lb}}$$

$$\text{COP} = 3.14$$

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez llevada a cabo estos cálculos, se compiló la información, creándose la siguiente tabla:

Tabla 3.- Compilación de Resultados

	Refrigerante 22	Mezcla No-Azeotrópica
Diferencial de Presión (psia)	323	202
Corriente de Operación (Amperes)	47	43.1
Potencia Consumida (HP)	40.82	37.45
Trabajo Específico Térmico ( $\text{BTU}/\text{Lb}$ )	26	23.85
Coefficiente de Rendimiento	2.88	3.14

Sometido el sistema a las mismas condiciones de operación, se observa que al utilizar la mezcla no-azeotrópica el trabajo específico térmico, requerido para el ciclo termodinámico, disminuye.

Debido a este decremento en el requerimiento para la operación del sistema, el diferencial de presión entre las zonas de alta y baja, la potencia consumida y la corriente de operación disminuyen también.

Por otro lado, el coeficiente de rendimiento aumenta, ya que el efecto refrigerante permanece constante, pero el compresor disminuye su trabajo.

A manera de ponderación, se considera un ahorro de energía a la razón del decremento de la corriente comparado con la corriente necesaria para el refrigerante 22, de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro Porcentual}_{(I)} = \frac{I_{R-22} - I_{\text{Mezcla}}}{I_{R-22}} \times 100$$

$$\text{Ahorro Porcentual}_{(I)} = \frac{47 \text{ Amp} - 43.1 \text{ Amp}}{47 \text{ Amp}} \times 100$$

$$\text{Ahorro Porcentual}_{(I)} = 8.29\%$$

Otra forma de evaluar el aprovechamiento de este refrigerante, es considerando el ahorro de energía en la razón entre el incremento del coeficiente de rendimiento y el rendimiento que el sistema posee cuando se utiliza el refrigerante 22, como se describe a continuación:

$$\text{Ahorro Porcentual}_{(COP)} = \frac{COP_{\text{Mezcla}} - COP_{R-22}}{COP_{R-22}} \times 100$$

$$\text{Ahorro Porcentual}_{(COP)} = \frac{3.14 - 2.88}{2.88} \times 100$$

$$\text{Ahorro Porcentual}_{(COP)} = 9.02\%$$

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES

Una vez que los cálculos fueron realizados, se obtuvieron resultados que fueron compilados y analizados en el capítulo anterior, concluyéndose que ...

- \* La hipótesis planteada fue comprobada, ya que el rendimiento del equipo se incrementó al sustituir el refrigerante 22 existente en el sistema, por la mezcla no-azeotrópica de isobutano-propano en razones de concentración igual, de un 50%, utilizado como sustancia refrigerante.
- \* Cuantitativamente, el COP se incrementó en un 9.02%, dadas las condiciones de operación del sistema; siendo otro el requerimiento térmico, el COP puede variar en su incremento.
- \* Dado que el requerimiento térmico para el proceso de destilación fue invariante durante la experimentación, el efecto refrigerante fue constante; por lo tanto, si el COP se incrementó, sin variar el flujo de calor en el evaporador, entonces el trabajo específico térmico realizado por el compresor tiene que disminuir.
- \* Cuantitativamente, el trabajo específico térmico realizado por el compresor se abate de  $26 \text{ BTU/Lb}$  a  $23.85 \text{ BTU/Lb}$ , para este experimento.
- \* Si el requerimiento del sistema de refrigeración es menor en la compresión, entonces el diferencial de presión, el trabajo mecánico del compresor y el consumo de energía eléctrica disminuyen.

- \* Si el diferencial de presión es menor, entonces es posible el seleccionar un compresor de menor capacidad al hacer un diseño de refrigeración.
- \* Si el compresor a instalarse es de menor capacidad, entonces el costo inicial realizado por la instalación disminuye, obteniéndose un ahorro económico.
- \* Si el requerimiento de energía eléctrica es menor, entonces el gasto por la operación del sistema decrece, dando lugar a un ahorro de energía, reflejado en un ahorro económico, que para el experimento realizado fue de un 8.29%.
- \* En la propuesta americana, el refrigerante es de mayor densidad, por lo que se requieren de equipos de compresión con mayor capacidad; en este experimento se observó que, desde el punto de vista de ahorro de energía, así como económico, es de mayor factibilidad utilizar mezclas no-azeotrópicas, ya que no requieren de cambiar los compresores por equipos de mayor capacidad.
- \* Además, en los hidrocarburos halogenados en base a etano, propuesta de solución americana, el gasto de operación se incrementa con respecto a los hidrocarburos halogenados en base a metano, como resultado a un incremento en el diferencial de presión para satisfacer el ciclo refrigerante, por lo que la mezcla no-azeotrópica, también desde el punto de vista de ahorro, es de mayor factibilidad.

# CAPÍTULO 8

## RECOMENDACIONES

Ante el trabajo realizado, surgen algunas expectativas que enriquecerían la presente obra, y además, podrían servir como tema para trabajos a futuro. De manera que se presentan las siguientes propuestas:

- \* Establecer el diagrama de Mollier para la mezcla no-azeotrópica entre isobutano y propano, a razón de concentración igual al 50% para ambas sustancias.
- \* Construir el diagrama de Mollier a diferentes razones de concentración entre ambos solutos, para determinar la mezcla óptima entre propano-isobutano, que maximiza el efecto refrigerante, así como, el coeficiente de rendimiento.
- \* Caracterizar otras mezclas de alcanos, a fin de utilizar hidrocarburos de mayor disponibilidad en el mercado, con menor precio de adquisición, a manera de obtener un ahorro económico en el sistema refrigerante, en la inversión inicial.
- \* Para las mezclas anteriormente descritas, se recomienda crear el diagrama de Mollier a diferentes razones de concentración; para evaluar sus condiciones termodinámicas, y posteriormente maximizar su efecto refrigerante y coeficiente de rendimiento, así como establecer sus límites de operación en presión y temperatura.

## Referencias Bibliográficas.-

- 1 Oliver Wild, Oliver V. Rattigan, & R. Anthony Cox, **Two-Dimensional Modelling of Some CFC Replacement Compounds**, Journal of Atmospheric Chemistry v25, pp. 167, 1996
- 2 P.G. Simmonds, S. O'Doherty, & R. Smith, **Automated Gas Chromatograph/Mass Spectrometer for Routine Atmospheric Field Measurements for the CFC Replacement Compounds, Hydrofluorocarbons & Hydrochlorofluorocarbons**, Analytical Chemistry v67, pp. 717, 1995.
- 3 Roy S. Hubbard, **HVAC/Environmental: Converting Chillers to CFC-Free Refrigerants**, Plant Engineering v48, pp. 40, 1994.
- 4 Anthony D. Nickens, Gregory A. Brunner, & Donald L. Hamilton, Jr., **Navy Investigations of HFC-134a as a Replacement for CFC-12 in Shipboard Applications**, Naval Engineers Journal v104, pp. 98, 1992
- 5 *Isaac Asimov*, **Enciclopedia Biográfica de Ciencia y Tecnología**, Alianza Editorial Mexicana, pp. 165-167, 1988
- 6 *Carrol O. Bennett & John Earle Myers*, **Momentum, Heat and Mass Transfer**, McGraw-Hill, pp. 1-3, 1974
- 7 *Isaac Newton*, **Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica**, Liber Primus, Cambridge University Press, 3a edición, pp. 13-14, 1726
- 8 *Isaac Newton*, **Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica**, Liber Secundus, Cambridge University Press, 3a edición, pp. 374-376, 1726
- 9 *A Fick*, Annales de Physique 170, pp. 59, 1855 (op. cit. en ref. 6)
- 10 *Jean Baptiste Joseph Fourier*, **Théorie Analytique de la Chaleur**, Gauthier-Villars et Fils, pp. 57-64, 1822
- 11 *L. Hatvani*, **On the asymptotic stability by nondecreasing Lyapunov function**, Nonlinear Analysis v8, pp. 67-77, 1984
- 12 *Stephen J. Vanhook, M. F. Schatz, J. B. Swift, W. D. McCormick, & H. L. Swinney*, **Long-wavelength surface-tension-driven Bénard convection: experiment and theory**, Journal of Fluid Mechanics v345, pp. 45-78, 1997

- 13 *Gustav Amberg & G. M. Homsy*, **Nonlinear analysis of bouyant convection in binary solidification with application to channel formation**, Journal of Fluid Mechanics v252, pp. 79-98, 1993
- 14 *D. V. Khakhar, J. G. Franjione, & J. M. Ottino*, **A case study of chaotic mixing in deterministic flows: The partioned pipe mixer**, Chemical Engineering Science v42, pp. 2909-2926, 1987
- 15 *S. W. Jones, O. M. Thomas, & H. Aref*, **Chaotic advection by laminar flow in a twisted pipe**, Journal of Fluid Mechanics v209, pp. 335-357, 1989
- 16 *J. G. Franjione, C. W. Leong, & J. M. Ottino*, **Symmetries within chaos: A route to effective mixing**, Physics of Fluids A v1, pp. 1772-1783, 1989
- 17 *Richard Mollier*, **Ein neues Diagram für Dampfluftgemische**, ZVDI v67, pp. 869-872, 1923 (op.cit. en *James L. Threlkeld*, **Thermal Environmental Engineering**, Prentice-Hall, 2a edición, pp. 179-180, 1970)
- 18 *Roy J. Dossat*, **Principles of Refrigeration**, John Wiley & Sons, 2a. Edición, pp. 121-123, 1980
- 19 *R. Warren Marsh and C. Thomas Olivo*, **Principios de la Refrigeración**, Editorial Diana , México, pp.11-42,1992
- 20 *Pedro Quinto Diez*, **Métodos de Producción de Frío**, UNAM, Cap.4,1993
- 21 *American Society of Heating, Refrigeration & Air Conditioning Engineerings*, **Handbook of Fundamentals**, pp.213, 1994
- 22 *Richard S. Stolarski*, **The Antartic Ozone Hole**, Scientific American v258, pp. 20-36, 1988

# INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<i>Figura 1</i>	<i>Proceso de absorción</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Proceso de compresión</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Ciclo termodinámico para el R-22</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 1</i>	<i>Composición del aire seco, a nivel del mar</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2</i>	<i>Condiciones de estado para el R-22</i>	<i>41</i>

