



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

Propuesta para la mejora en eficiencia de  
equipos para refrigeracion

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

MARIO ALBERTO GONZALEZ SEPULVEDA

DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. DAVID FRANCO

2012





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## ***Agradecimientos:***

*Agradezco haber nacido en esta Tierra por sus colores, costumbres, historia, por sus desiertos, playas, bosques, rocas, montañas de belleza inimaginable, porque me ha permitido conocer personas invaluable y me brindo una familia amorosa.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, porque es un privilegio haber tomado clases en sus salones, en los que fui descubriendome a mi mismo.*

*A mi padre*

*Con su ejemplo me ha enseñado que la pasión por el trabajo, la iniciativa y el esfuerzo entregan grandes frutos, siempre viendo hacia adelante.*

*A mi madre*

*Cembro el amor en mi educación, siempre con una sonrisa y mano firme, dandome todo su cariño incondicionalmente, dispuesta a una conversación en cualquier momento y a velar hasta el final.*

*A Raquí, Fer y Rene*

*Gracias por compartirme de su alegría, ternura, energía, cariño y todos los momentos hilarantes.*

*A Tina*

*Du kamst, als ich es am wenigsten erwartet habe und hast mich mit deiner Begeisterung angesteckt. Jedes Lächeln und jeder Blick von dir hat meine Motivation für diese Arbeit gestärkt.*

*A mis hermanos de otra madre, gracias por estar ahí cuando lo he necesitado.*

*Zian Fanti, Oscar Duran, Javier Bonifaz, Dersu Gucumatz*

*Al M. en I. David Franco Martínez por su apoyo incondicional en la dirección de este trabajo*

*A los integrantes del jurado*

*Ing. Everardo Esquivel Sánchez*

*QFB. Catarina Tafolla Rangel*

*M. en I. David Franco Martínez*

*Ing. Edgar Alfredo Cárdenaz Pérez*

*Ing. Leonardo Zavaleta Pozo*

*Por sus valiosos comentarios al presente trabajo*

*A mis compañeros de clases Alfonso, Jonathan, Mario, Mauricio, Roberto, y Jesús por su amistad y todo ese tiempo compartido dentro y fuera de la Universidad.*

***Gracias.***

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>4</b>
1.1. Conceptos Básicos . . . . .	5
1.2. Transferencia de calor . . . . .	13
1.3. Refrigerante . . . . .	20
1.4. Procesos de disminución de Temperatura . . . . .	22
1.4.1. Enfriamiento . . . . .	22
1.4.2. Refrigeración . . . . .	23
1.4.3. Congelamiento . . . . .	23
1.4.4. Criogénico . . . . .	23
1.5. Métodos de Refrigeración . . . . .	24
1.5.1. Métodos basados en medios Químicos . . . . .	24
1.5.2. Métodos basados en medios Físicos . . . . .	25
<b>2. Aplicaciones Comerciales de Enfriamiento</b>	<b>36</b>
2.1. Aplicaciones Comerciales de Enfriamiento . . . . .	37
2.1.1. Refrigeración Doméstica . . . . .	37
2.1.2. Refrigeración Comercial . . . . .	42
2.1.3. Refrigeración Industrial . . . . .	46
2.1.4. Refrigeración Marina . . . . .	47
2.1.5. Acondicionamiento del Aire . . . . .	49
2.1.6. Conservación de alimentos . . . . .	51
<b>3. Eficiencia energética en refrigeración</b>	<b>52</b>
3.1. Objetivos Generales y Particulares . . . . .	53
3.2. Planteamiento del problema . . . . .	53

3.3.	Conceptos relevantes referentes al ahorro energético. . . . .	54
3.3.1.	Eficiencia Energética . . . . .	54
3.3.2.	Coeficiente de Desempeño . . . . .	55
3.3.3.	Diagrama de Mollier . . . . .	55
3.3.4.	Condiciones medio-ambientales . . . . .	56
3.4.	Factores de diseño de componentes que interactúan en la refrigeración. .	56
3.4.1.	Diseño del condensador . . . . .	56
3.4.2.	Selección del Compresor . . . . .	58
3.4.3.	Cantidad de refrigerante . . . . .	60
3.4.4.	Ensamblajes . . . . .	63
3.4.5.	Selección de materiales . . . . .	63
3.5.	Estudios aplicados al diseño del refrigerador y sus sistemas. . . . .	64
3.5.1.	Espesor de capa de aire . . . . .	64
3.5.2.	Diferencias de Temperaturas . . . . .	65
3.5.3.	Cuantificación de la transferencia de calor . . . . .	66
3.5.4.	Deterioro de sellos . . . . .	71
3.5.5.	Materiales de cambio de fase . . . . .	72
3.5.6.	Consumos Innecesarios . . . . .	75
<b>4.</b>	<b>Metodología.</b>	<b>78</b>
4.1.	Revisión visual . . . . .	81
4.2.	Recopilación de información técnica del equipo de refrigeración . . . . .	83
4.3.	Revisión del estado físico de los componentes del equipo. . . . .	84
4.4.	Observaciones . . . . .	84
4.5.	Recomendaciones . . . . .	85
4.6.	Aplicación . . . . .	88
4.7.	Caso Práctico . . . . .	88
<b>5.</b>	<b>Conclusión</b>	<b>96</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
	<b>Nomenclatura</b>	<b>109</b>

# Introducción

Durante 3500 millones de años ha existido vida sobre el planeta y la han habitado millones de especies que hoy día más del 99 % de ellas están extintas. Desde entonces han sucedido hechos fortuitos inimaginables que han permitido, que la evolución sea como la conocemos. Es necesario darnos cuenta que nuestro origen está ligado fuertemente a todos los seres vivos que han habitado la Tierra, que nuestra presencia, como la de cualquier ser vivo es totalmente contingente, única, compleja, valiosa y sumamente frágil. De esas millones de especies en tantos millones de años, solo una especie desarrolló la capacidad de resolver problemas complejos, utilizar herramientas, crear juicios mentales, plantear necesidades, imaginar, razonar, estas características no nos pone en la cima de la evolución, sin embargo nos debería permitir valorar todos estos hechos maravillosamente aleatorios y replantear nuestros objetivos como especie, desarrollar nuevas tecnologías amables para el ambiente, evitar consumos innecesarios de energía, y optimizar recursos naturales. La población humana ha crecido de manera espectacular a lo largo del último millón de años. Lo ha estado haciendo en tres etapas, las cuales se relacionan a la reducción de la dependencia directa del medio ambiente. La primer etapa coincidió con el desarrollo de la manufactura de utensilios de uso común, la segunda con la aparición de la agricultura, y la tercera con la civilización industrial. Durante todas estas etapas se han desarrollado conceptos y tecnologías, con las que vivimos día a día y progresivamente en casa, en el campo, lugares de trabajo, caminos, áreas comunes y sin lugar a dudas pocos se preguntan exactamente cómo funcionan esas aplicaciones tecnológicas.

Las condiciones climáticas desde siempre han sido para el ser humano una fuerte prueba de adaptación, debido a esto, fue necesario idearse la manera de almacenar y conservar sus alimentos, analizando el comportamiento del clima se dan cuenta que en invierno duraban mas su alimentos que en verano sin que estos comenzara a descomponerse, al observar este comportamiento en la comida dedujo que había una relación entre las temperaturas bajas de invierno y la comida, fue así como comenzó a almacenar y

conservar alimentos, modificando su entorno para mantener la comida a menor temperatura que la del medio ambiente. En esto se basa la refrigeración, en transferir la temperatura de un cuerpo a otro, siguiendo el orden de retirarlo del de mayor temperatura al de menor temperatura. La refrigeración quizá sea una de las áreas de la ingeniería en las que se dio un gran paso para el desarrollo de la humanidad, y pocos saben por ejemplo cómo es que su leche permanece fría dentro del refrigerador. Si tomamos en cuenta que sin el desarrollo de este conocimiento, quizá nuestro mundo tal y cual lo conocemos sería completamente desconocido debido a la importancia y necesidad que la refrigeración ha adquirido a lo largo de los años en la mayoría de las áreas de desarrollo industrial, comercial, entretenimiento, desarrollo científico, y muchas más. En mi opinión es posible estar hablando de un retroceso tecnológico de cientos de años en nuestros días.

Desde el siglo XVI a nuestros días se desarrolla la refrigeración, sin embargo hasta hace unos años se ha observado mayor preocupación por utilizar la menor cantidad de energía eléctrica posible, y es justo esta búsqueda de utilizar menos recursos energéticos lo que me motivó para realizar este trabajo, debido a que estamos dañando nuestro entorno indiscriminadamente y la demanda de energía crece día a día, provocando sobre explotación de recursos, y efectos climáticos desfavorables para el planeta y todo ser viviente que habita en él. Esta es la razón por la que decidí este tema, ya que pienso que es imprescindible optimizar los recursos energéticos que se obtienen de la explotación de recursos naturales no renovables como los hidrocarburos, y los minerales y que tienen su aplicación en todos los aparatos electrodomésticos.

En el primer capítulo Antecedentes se abordan los diferentes conceptos para comprender como es el proceso de enfriamiento, en los diferentes métodos de refrigeración, también desarrollados en este capítulo, así como los tipos de refrigeración utilizados hoy día.

En el segundo capítulo se hace mención a las diferentes aplicaciones comerciales para tener un panorama amplio de la gran gama de aplicaciones que podemos encontrar en la actualidad en los hogares, comercios e industria para retirar el calor de los productos deseados. Estableciendo un límite para el estudio de este trabajo, siendo la refrigeración doméstica la aplicación comercial de enfriamiento de mi interés, debido a que considero es el área más crítica de la refrigeración debido al diseño mismo del equipo.

En el tercer capítulo llamado Eficiencia energética en refrigeración se hace referencias



a las investigaciones realizadas para incrementar la eficiencia de los equipos de refrigeración domésticos, a partir de conocer los problemas que se pueden presentar en un refrigerador, como lo es la transferencia de calor, una mala selección de compresor, utilización de resistencias eléctricas, abarcando diferentes componentes que integran un refrigerador doméstico, estos estudios están divididos en factores de diseño de componentes que interactúan en la refrigeración y estudios aplicados al diseño del refrigerador y sus sistemas, al final de este capítulo se deduce que es posible mejorar la eficiencia de un equipo de refrigeración, así como las modificaciones que se pueden aplicar tanto a un refrigerador, como a un diseño de refrigerador.

En el capítulo cuarto llamado Metodología se mostrará una propuesta para mejorar la eficiencia de un equipo de refrigeración doméstico mediante la implementación de una metodología la cual reconocerá los factores que alteran la eficiencia del equipo, para posteriormente llevar a cabo un programa de mejoramiento, las observaciones pueden parecer simples sin embargo están sustentadas por trabajos recientes de investigadores. Cabe mencionar que se realizó una segunda propuesta, sin embargo esta se dirige al diseño mismo de un equipo de refrigeración implementando elementos de reciente desarrollo tecnológico como lo son los paneles con materiales de cambio de fase, paneles de aislamiento por vacío, compresores de velocidad variable, que a pesar que no se desarrollaron en los últimos meses, la implementación en el mercado es nula, lo que encarece su aplicación sin embargo se ha demostrado que son altamente eficientes y se están empezando a desarrollar cada día mas tanto los materiales con los que se fabrican como lo procesos con la promesa de que su costo reduzca.

# 1. Antecedentes

En este capítulo mencionaré conceptos y leyes fundamentales, para comprender el comportamiento de los componentes de un sistema de refrigeración, se describen los diferentes tipos de refrigeración, así como los métodos de refrigeración más utilizados.

## 1.1. Conceptos Básicos

### Fuerza

Producto de la masa y la aceleración. La unidad de fuerza en el Sistema Internacional, es el newton,  $[N]$  el newton se define como la fuerza que cuando se aplica a una masa de  $1\text{ kg}$  produce una aceleración de  $1\text{ m/s}^2$

$$F = m \cdot a$$

$F =$  Fuerza  $[\text{kgm/s}^2]$

$m =$  masa  $[\text{kg}]$

$a =$  aceleración  $[\text{m/s}^2]$

### Presión

Se define como fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. En el sistema internacional utilizamos las unidades  $[\frac{N}{m^2}]$  también llamado Pascales  $[Pa]$  Encontramos que la presión también puede manejar unidades como:  $[\text{mm.Hg.}]$  (milímetros de mercurio),  $[\text{atm}]$  (atmosferas) y/o  $[\text{bar.}]$  ??

$$P = \frac{F}{A}$$

$P =$  Presión  $[\text{Pascal}]$

$F =$  Fuerza  $[\text{kgm/s}^2]$

$A =$  Área  $[\text{m}^2]$

### Presión Atmosférica

Presión que ejerce el aire a la superficie de la Tierra. La presión atmosférica a nivel del mar es  $101325 \frac{N}{m^2}$  ó  $Pa$

### Presión Absoluta

Es la relación entre la Presión atmosférica y la Presión manométrica, para su medición se considera un vacío absoluto o perfecto esto se refiere a una presión absoluta cero por lo tanto todos sus valores son positivos.

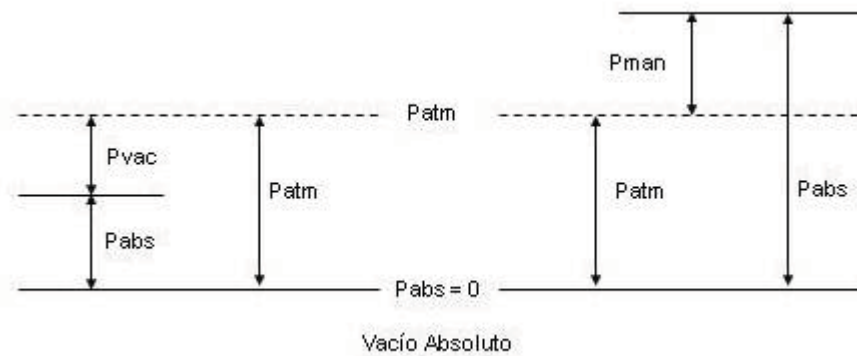
$$P_{abs} = P_{atmosferica} + P_{manométrica}$$

### Presión Manométrica

Es la relación entre la presión absoluta y la presión atmosférica. Se utiliza cuando la presión es superior a la presión atmosférica, y cuando esta cantidad es negativa se llama presión de vacío.

$$P_{manometrica} = P_{absoluta} - P_{atmosférica}$$

**Diagrama 1.1.:** Presiones absoluta, manométrica y de vacío



1

---

<sup>1</sup>Obtenido de Termodinámica Yunus A.Cengel

### **Energía**

La energía es la capacidad para realizar un trabajo, La cantidad de energía necesaria para hacer una cantidad determinada de trabajo es siempre exactamente igual a la cantidad de trabajo efectuado. La energía puede ser poseída por un cuerpo en energía cinética o en energía potencial.

### **Energía Interna**

Un cuerpo tiene energía cinética interna resultante de su velocidad y posición o configuración de las moléculas que constituyen al cuerpo. Las moléculas de cualquier material pueden poseer tanto energía cinética como energía potencial. La energía interna total de un material es la suma de sus energías cinéticas y potencial. Esta relación se muestra por la ecuación:

$$U = K + P$$

$U$  = Energía interna total

$K$  = Energía cinética interna

$P$  = Energía potencial interna

### **Energía Cinética**

Energía del movimiento o velocidad de las moléculas. Cuando se transmite energía a una sustancia se incrementa el movimiento o velocidad de las moléculas, es decir, se incrementa la energía cinética interna de la sustancia y este incremento se refleja en un aumento en la temperatura de la sustancia.

De acuerdo a la teoría cinética, si la pérdida de energía de un cuerpo continua hasta que la energía cinética interna sea reducida a cero, la temperatura del cuerpo bajara hasta cero absoluto ( $-459.7^{\circ}F$ ) y las moléculas perderán por completo su movimiento. Es la energía almacenada en un cuerpo en virtud de su movimiento o de su velocidad molecular.

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$E_c$  = energía cinética  $\left[ kg \cdot \frac{m^2}{s^2} \right]$

$m$  = masa  $[kg]$

$v$  = velocidad  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

$g$  = Constante gravitacional Universal (9.81)  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$

### **Energía Potencial**

Energía que posee un cuerpo debido a su posición o configuración. La energía potencial gravitacional que tiene un cuerpo por virtud a su posición, puede ser evaluada por la siguiente ecuación:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$E_p$  = Energía potencial  $\left[ kg \cdot \frac{m^2}{s^2} \right]$

$m$  = masa  $[kg]$

$h$  = altura  $[m]$  (*altura realtiva de un objeto.*)

$g$  = Constante gravitacional Universal (9.81)  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$

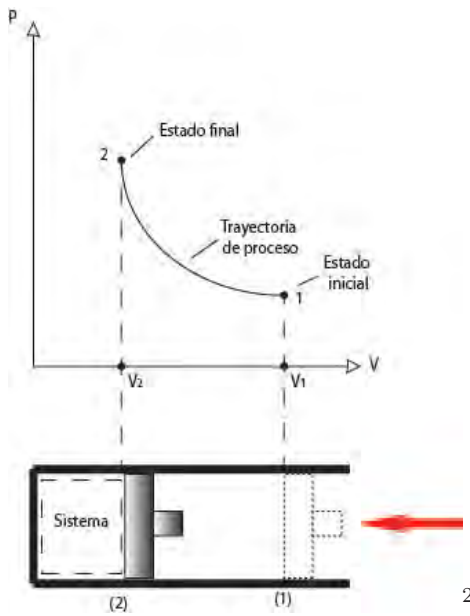
### **Procesos y ciclos**

Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro específico por un sistema es un proceso, y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es una trayectoria en del proceso.

Se experimenta un ciclo, cuando se regresa a su estado inicial al final del proceso, por lo tanto el estado inicial y el final son iguales. En el siguiente diagrama podemos observar

que la trayectoria de proceso indica una serie de estados de equilibrio. Y nos muestra el estado inicial y final del ciclo. Ver diagrama 1.2

**Diagrama 1.2.:** Diagrama P-V de un proceso de compresión de un gas



### Proceso Termodinámico

Interacción de un sistema en el cual el resultado final son las diversas variantes en equilibrio. Las trayectorias de proceso describen el comportamiento de cada uno de los procesos. En el proceso termodinámico encontramos los siguientes comportamientos:

#### Isotérmico

Proceso termodinámico en el cual un gas se expande o se contrae, manteniendo la temperatura constante durante el proceso.

---

<sup>2</sup>Principios de la refrigeración R. Warren Marsh

### Isocórico

Encontramos que en este proceso el volumen permanece constante, por lo tanto no existe desplazamiento, esto implica que el proceso no realiza trabajo.

### Isobárico

Proceso termodinámico en el que un gas se expande o se contrae mientras que la presión se mantiene igual.

### Adiabático

En este proceso termodinámico no se realiza ningún intercambio de calor con el entorno, durante un proceso adiabático, la energía interna del fluido que realiza el trabajo debe necesariamente disminuir.

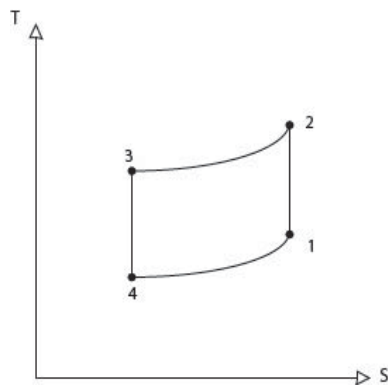
### Politrópico

Proceso donde ocurren cambios de estado en los que influyen las propiedades de presión, volumen, temperatura, entropía, entalpía.

### Ciclo Termodinámico

Se obtiene un ciclo termodinámico, cuando el punto inicial se equipara al punto final en cualquiera de sus múltiples variantes como pueden ser: la presión, temperatura, entalpía, entropía, volumen. En el diagrama 1.3 podemos observar el comportamiento de un ciclo termodinámico en el cual la entropía inicial es igual a la final.

**Diagrama 1.3.:** Diagrama T-S de un ciclo termodinámico ideal





### Calor

Energía que se transfiere entre dos sistemas, en los cuales existe una diferencia de temperatura, siendo el de mayor temperatura el que transfiere al de menor temperatura, teniendo así una transferencia de energía en forma de calor. Esa energía que se menciona proviene del movimiento molecular del cuerpo en cuestión, por lo tanto el calor no se contiene en los cuerpos, lo que cada cuerpo contiene es energía interna, el calor es una energía transitoria.

### Calor Sensible

Cantidad de calor medible, debido a que se modifica la temperatura del cuerpo, sin que esto signifique un cambio de estado, y podemos determinarlo mediante la siguiente formula. Gráfica 1.1

$$qs = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$qs$ = Calor sensible [ $Kcal$ ]

$m$ = masa [ $kg$ ]

$Cp$ = calor especifico (presión constante) [ $Kcal/kg \cdot ^\circ C$ ]

$\Delta T$ = Incremento de temperatura [ $^\circ C$ ]

### Calor Latente

Cantidad de calor añadido sin que esta modifique la temperatura del cuerpo, cambiándola de fase. Gráfica 1.1

$$q_L = m \cdot H_L$$

$q_L$ = Calor latente [ $Kcal$ ]

$m$ = masa [ $kg$ ]

$H_L$ = calor latente de solidificación o de congelación [ $Kcal$ ]

### Calor Total

Determina el calor total retirado o introducido de una sustancia

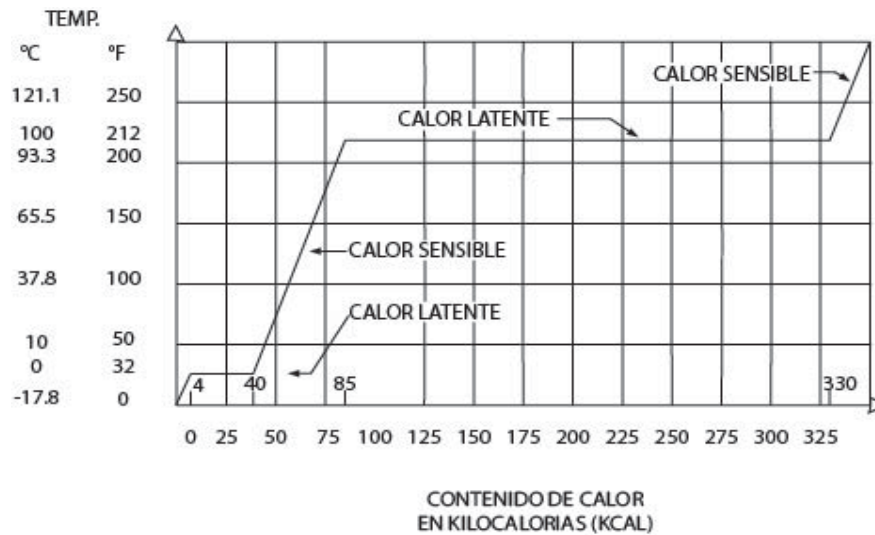
$$Q_T = q_S + q_L$$

$Q_T$  = calor total [Kcal]

$q_S$  = calor sensible suministrado [Kcal]

$q_L$  = calor latente suministrado [Kcal]

**Gráfica 1.1** Gráfica calor/temperatura para 1 libra (0.453kg) de agua.



3

<sup>3</sup>Principios de la refrigeración R. Warren Marsh

### Calor Específico

El calor específico de cualquier sustancia es la cantidad de energía en BTU's necesaria para producir un cambio de temperatura de  $1^{\circ}F$  a  $1 lb$  de masa. De acuerdo a la definición de calor específico, es evidente que la cantidad de energía suministrada o extraída, a una masa conocida de material para producirle un cambio específico en su temperatura, puede obtenerse a partir de la siguiente relación:

$$Q = m \cdot c (T_2 - T_1)$$

$Q$ = Cantidad de energía térmica en unidades británicas

$m$ = masa [ $lb$ ]

$c$ = Calor específico [ $Kcal/lb/^{\circ}F$ ]

$T_1$ = Temperatura inicial [ $^{\circ}Rankine^{\circ}F$ ] [ $^{\circ}Rankine^{\circ}F$ ]

$T_2$ = Temperatura final [ $^{\circ}Rankine^{\circ}F$ ] [ $^{\circ}Rankine^{\circ}F$ ]

### Temperatura

Rapidez necesaria para transferir energía en forma de calor de un cuerpo a otro, es proporcional a la diferencia de temperatura de los dos cuerpos.

## 1.2. Transferencia de calor

Normalmente encontramos a la transferencia de calor como un concepto y como una herramienta para conocer la interacción de energía que ocurre en un sistema; Sin embargo la transferencia de calor es considerada mas que eso, La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre dos cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura, a diferencia de la termodinámica que solo puede explicar como la energía puede ser transferida, la transferencia de calor pretende predecir con que rapidez con la que bajo

ciertas condiciones específicas tendrá lugar esta transferencia. La termodinámica trata sistemas en equilibrio; puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para llevar un sistema desde un estado de equilibrio a otro; no puede usarse en cambio para predecir lo rápido que será el cambio, ya que el sistema no está en equilibrio durante el proceso. [13]

A continuación describiré los tres modos de transferir calor:

### **Conducción**

La transferencia de calor por conducción, transfiere la energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus moléculas, existe una relación directa entre el calor transferido y la velocidad con que lo transfiere, esto es, en una región de alta temperatura, las moléculas poseen velocidades más altas que en una región de baja temperatura. Las moléculas están en continuo movimiento aleatorio, chocando unas con otras e intercambiando energía y cantidad de movimiento. Si una molécula se mueve de una región de alta temperatura a otra de menor temperatura, transporta energía cinética hacia la zona del sistema de baja temperatura y cede esta energía mediante los choques con las moléculas de menor energía, así que mientras más rápido se muevan las moléculas más rápidamente transportarán la energía.

La energía térmica no se transfiere de la misma manera en todos los materiales, debido a que todos los materiales tienen propiedades diferentes para transmitir calor a través de ellos por lo que tendremos materiales con mejor conducción de energía térmica que otros.

La transferencia de calor por conducción está determinada por la Ley de Fourier, esta ley establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección de flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. [13]

$$q = -k \cdot A \frac{\delta T}{\delta x}$$

$q$  = Flujo de calor.

$\frac{\delta T}{\delta x}$  = Gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

$k$  = Conductividad térmica del material.  $\left[ \frac{W}{m} \text{ } ^\circ C \right]$

$A$  = Área que es atravesada por el flujo de calor.

### Convección

Esta transferencia se realiza mediante el entorno en el que se desenvuelven los sistemas, por lo que esta transferencia se realiza entre una superficie sólida y un fluido adyacente, este tipo de transferencia de energía térmica utiliza las propiedades de los estados de materia líquido y gaseoso debido a que sus espacios intermoleculares son más amplios, abarcan mayor volumen de transferencia, causando una circulación debido a las diferencias de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido, a esto se le llama convección natural. En vista de lo anterior la transferencia de calor por convección dependerá de la viscosidad del fluido además de depender de las propiedades térmicas del fluido, esto es porque la viscosidad influye en el perfil de velocidades, y por tanto en el flujo de energía.

La transferencia de calor por convección está determinada por la Ley del enfriamiento de Newton, esta ley menciona que el flujo de calor transferido, se relaciona con la diferencia global de temperaturas entre una superficie sólida, un fluido, y el área de la superficie. El gradiente de temperaturas depende de la rapidez a la que el fluido se lleva el calor; una velocidad alta, produce un gradiente de temperaturas grande. [13]

$$q = h \cdot A (T_p - T_\infty)$$

$q$ = Flujo de calor transferido

$h$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección.

$A$ = Área de la superficie.

$T_p$ = Temperatura en la superficie del cuerpo.

$T_\infty$ = Temperatura del fluido lejos del cuerpo.

### **Radiación**

En contraposición a los mecanismos de la conducción y la convección, donde la transferencia de energía involucra un medio material, el calor también puede transferirse a través de zonas en las que exista un vacío perfecto. En este caso el mecanismo es la radiación electromagnética, que se propaga como resultado de una diferencia de temperaturas, a este fenómeno se le llama radiación térmica.

El calor transferido por radiación viaja a través del espacio, sin calentar a este, y es absorbido por el primer cuerpo sólido al que se expone al contacto, es importante mencionar que en un radiador térmico ideal, o cuerpo negro, emitirá energía de forma proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo y directamente proporcional al área de su superficie. Así es que obtenemos la denominada Ley de Stefan-Boltzman de la radiación se aplica exclusivamente a cuerpos negros. [13]

$$q_{emitido} = \sigma \cdot T_a^4$$

$q_{emitido}$  = Radiación térmica

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman  $5.669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot k^4}$

$T_a$  = Temperatura absoluta de la superficie

### **Entalpía**

Variable de estado que define el contenido de calor, y es la suma de la energía interna de un sistema termodinámico, se puede definir también como la cantidad de energía absorbida o cedida.

$$H = U + PV$$

$H$  = Entalpía

$U$  = energía interna

$P$  = presión del sistema

$V$  = volumen del sistema

### Entropía

Determina la energía que no podrá ser utilizada para producir un trabajo, así como la irreversibilidad de un sistema termodinámico

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

$\Delta S$  = Variación de entropía

$\Delta Q$  = Variación de calor

$T$  = Temperatura a la que se realizara el proceso

### Ley de Conservación de la energía

La cantidad de energía en cualquier sistema termodinámico es constante, nada se crea ni se destruye en el sentido de que se tiene conversión de una forma a otra. La energía se puede transferir en tres formas: calor, trabajo o flujo másico. Las únicas dos formas de interacción de la energía relacionadas con la masa fija o un sistema cerrado son las transferencias de calor o de trabajo.

$$E_{entrada} - E_{salida} = (Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) + (E_{masa,entrada} - E_{masa,salida}) = \Delta E_{sistema}$$

$\Delta E$  = Sumatoria de Energía del sistema

$E$  = Energía

$W$  = Trabajo

$E_{masa}$  = Energía de la masa

### Primera Ley de la Termodinámica

Establece que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, es también conocida como principio de conservación de la energía. Siguiendo lo establecido por esta ley es necesario determinar cada cantidad de energía durante un proceso. Dicho de otra manera, la cantidad total de energía es constante, y cuando la energía aparentemente desaparece, realmente solo se encuentra en otra forma.

### **Segunda Ley de la Termodinámica**

En esta ley podemos encontrar restricciones de cómo se transfiere la energía y del comportamiento de la energía respecto al sistema en el que se encuentra, así que la primera restricción nos dice que: Solo un cuerpo con mayor temperatura puede ceder calor a otro con menor temperatura. Y la siguiente restricción es que en un sistema no se puede convertir completamente todo el calor en trabajo.

### **Ley de Charles**

Si se aplica energía a un gas bajo la condición de que la presión del gas se conserva constante, el volumen del gas aumentara en proporción directa al cambio de temperatura absoluta del gas.

$$T_1 \cdot V_2 = T_2 \cdot V_1$$

$T_1$  = Temperatura absoluta inicial del gas

$T_2$  = Temperatura absoluta final del gas

$V_1$  = Volumen inicial del gas

$V_2$  = Volumen final del gas

### **Ley de Boyle**

Cuando el volumen de un gas es aumentado o disminuido bajo condiciones que la temperatura del gas no cambia, la presión absoluta variará inversamente con el volumen. Por lo tanto, cuando un gas es comprimido mientras que su temperatura permanece constante, su presión absoluta disminuirá en proporción a la disminución del volumen. Contrariamente, cuando un gas es expandido a temperatura constante, su presión absoluta disminuirá al aumentar el volumen. En cualquier proceso termodinámico en el que la temperatura de la sustancia con que se está trabajando, permanece constante durante el proceso se le llama proceso isotérmico (temperatura constante).



Para un proceso a temperatura constante esta representada por la siguiente ecuación.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

$p_1$  = Presión absoluta inicial

$p_2$  = Presión absoluta final

$V_1$  = Volumen inicial

$V_2$  = Volumen final

### **Ley de Charles para un proceso a volumen constante.**

Cuando un gas está contenido en un lugar cerrado de modo que su volumen no puede cambiar cuando es calentado o enfriado. Cuando se aumenta la temperatura debido a un suministro de energía, la presión absoluta aumentará en proporción directa al aumento de la temperatura absoluta. Si el gas es enfriado, la presión absoluta del gas disminuirá en proporción directa a la disminución de la temperatura absoluta.

$$T_1 \cdot p_2 = T_2 \cdot P_1$$

$T_1$  = Temperatura absoluta inicial

$T_2$  = Temperatura absoluta final

$p_1$  = Presión absoluta inicial

$p_2$  = Presión absoluta final

### Ley General de los Gases

Combinando las leyes de Charles y Boyle se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{p_1 \cdot v_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot v_2}{T_2}$$

La ecuación establece que para cualquier masa conocida de un gas, el producto de la presión y el volumen entre la temperatura absoluta es siempre una constante, esto es:

$$\frac{p \cdot v}{T} = \text{constante}$$

### 1.3. Refrigerante

En general, un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Con respecto al ciclo de compresión-vapor, el refrigerante es el fluido de trabajo del ciclo el cual alternativamente se vaporiza y se condensa absorbiendo y cediendo calor, respectivamente. Para que un refrigerante sea apropiado y se le pueda usar en el ciclo de compresión-vapor, debe poseer ciertas propiedades químicas, físicas y termodinámicas que lo hagan seguro y económico durante su uso.

Propiamente no existe un refrigerante “ideal” y por las grandes diferencias en las condiciones y necesidades de las varias aplicaciones, no hay un solo refrigerante que sea universalmente adaptable a todas las aplicaciones. Entonces, un refrigerante se aproxima al “ideal”, solo en tanto que sus propiedades satisfagan las condiciones y necesidades de la aplicación para lo cual va a ser utilizado.

Las propiedades seguras de un refrigerante son de especial importancia en la selección del mismo. Es por esta razón que algunos fluidos que de otro modo son altamente deseables como refrigerantes, tienen uso limitado como tales. Los más importantes de éstos son: el amoníaco y algunos del grupo de los hidrocarburos.

Para tener uso apropiado como refrigerante, un fluido deberá ser químicamente inerte hasta el grado de no ser inflamable, no explosivo y no tóxico, tanto en su estado puro como cuando están mezclados con el aire en cierta proporción; además el fluido no deberá reaccionar desfavorablemente con el aceite lubricante o con cualquier otro material normalmente usado en la construcción del equipo de refrigeración.

Los refrigerantes se pueden clasificar en 5 grupos:

#### **a) Halocarburos**

Los halocarburos contienen uno o más de los tres halógenos: cloro, bromo o flúor, estos son comúnmente llamados como Freon, Argón, este grupo de halocarburos fueron los más comunes refrigerantes, también llamados clorofluorocarbonos (CFC's) los refrigerantes CFC's más comunes son  $CFC - 11$  o  $R - 11$ ,  $CFC - 12$  o  $R - 12$ ,  $CFC - 13$  o  $R - 13$ ,  $CFC - 14$  o  $R - 14$ ,  $CFC - 15$  o  $R - 15$ .

#### **b) Hidrocarburos**

HC's están compuestos principalmente por Carbono e Hidrógeno. HC's incluyen Metano, Propano, Etano, Ciclopropano, Butano, y Ciclopentano. También los HC's son altamente inflamables, ofrecen ventajas como alternativa de refrigerantes debido al bajo costo para su producción y tienen 0 ODP (Poder de destrucción del Ozono) y un GWP (Potencial de calentamiento global) muy bajo. es por eso que varios HC's se pueden usar como refrigerantes como el metano ( $R - 50$ ), etano ( $R - 170$ ), propano ( $R - 290$ ), isobutano ( $R - 600a$ ).

#### **c) Componentes Inorgánicos**

En esta clasificación encontramos el amoníaco ( $NH_3$ ), el agua ( $H_2O$ ), el aire ( $0.21 O_2 + 0.78 N_2 + 0.01 Ar$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ). De todos estos refrigerantes, el que más tiene uso en el día es el amoníaco.

#### **d) Mezclas Azeotropicas**

Estas mezclas consisten de dos sustancias con diferentes propiedades sin embargo se comportan como una sola sustancia, las dos sustancias no se pueden separar por destilación, el refrigerante Azeotropico más común es el  $R - 502$  que contiene 48.8%  $R - 22$  y 51.2%  $R - 115$  su COP es más alto que el  $R - 22$

### e) Mezclas Nonazeotropicas

La mezcla Nonazeotropica es un fluido que consiste en múltiples componentes de diferentes volatilidades, esto quiere decir que durante el ciclo de refrigeración su composición cambia durante la evaporación, o la condensación, actualmente a las mezclas nonazeotropicas se les llama también mezclas zeotrópicas.

## 1.4. Procesos de disminución de Temperatura

A través de la historia, se ha tratado de producir frío artificialmente, han sido ya numerosos científicos los cuales han dedicado sus vidas enteras en lograr un mejor enfriamiento, hoy día podemos encontrar varios métodos, y tipos de enfriamiento, los cuales mencionare en este capítulo.

Los procesos que implican una disminución de temperatura son:

- Enfriamiento
- Refrigeración
- Congelación
- Proceso Criogénico

### 1.4.1. Enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento operan normalmente con temperaturas que van desde  $15^{\circ}C$  a  $+2^{\circ}C$  ( $59^{\circ}F$  a  $35.6^{\circ}F$ ). Aún cuando en algunos casos existe una disminución de temperaturas hasta los  $0^{\circ}C$  ( $32^{\circ}F$ ), en este proceso nunca se presenta cambio de estado en la sustancia que se maneja y solamente se elimina el calor sensible. Su aplicación es muy amplia y se utiliza en productos que no requieren conservación y la temperatura en que se encuentran son solo para efectos de gusto.

Como ejemplos tenemos:

- Enfriadores de bebidas carbonatadas y agua
- Enfriadores de productos lácteos
- Sistemas de Acondicionamiento de aire

### 1.4.2. Refrigeración

Los niveles de temperatura de este proceso comprenden valores ligeramente superiores de los  $0^{\circ}C$  a  $-18^{\circ}C$  ( $32^{\circ}F$  a  $-0.4^{\circ}F$ ) aproximadamente. En este proceso existe cambio de estado de líquido a sólido e invariablemente, eliminación de calor latente. Este proceso se utiliza para la conservación de productos, llevando a cabo los procedimientos adecuados, se pueden mantener estos productos desde dos semanas hasta un mes aproximadamente. Es utilizado amplia mente en instalaciones domesticas, comerciales y de investigación, su funcionamiento depende de algún refrigerante.

### 1.4.3. Congelamiento

Este proceso opera entre  $-18^{\circ}C$  y  $-40^{\circ}C$  ( $-0.4^{\circ}F$  y  $-40^{\circ}F$ ) y en este proceso también existe cambio de estado en la sustancia y también se elimina el calor latente. No obstante en algunos casos solo se elimina calor sensible, por ejemplo, cuando se conserva la carne congelada en la transportación. Su principal utilidad es el área comercial, industrial y de investigación. El periodo de conservación va desde 1 mes hasta 1 año, dependiendo del producto y que procedimiento se emplee.

### 1.4.4. Criogénico

Es un proceso que opera desde  $-40^{\circ}C$  ( $-40^{\circ}F$ ) a valores cercanos al cero absoluto. Esto implica el cambio de estado físico en la sustancia si esta líquido o contiene agua para enfriarlo posteriormente. Su aplicación es muy fuerte en el área industrial y de investigación, también desarrollándose en áreas comerciales. Este proceso trata de la preservación de los productos alimenticios en su característica o condición muy crítica.

## 1.5. Métodos de Refrigeración

Después de haber mencionado los procesos mediante los cuales disminuye la temperatura. Es necesario conocer los métodos más comunes de refrigeración, me parece más práctico dividirlo en dos tipos basándose en el funcionamiento, mientras uno obtiene las presiones altas y bajas necesarias por medio de algún método diferente del compresor mecánico, el otro utiliza métodos mecánicos por lo tanto lo dividiré en: Métodos basados en medios químicos y Métodos basados en medios físicos.

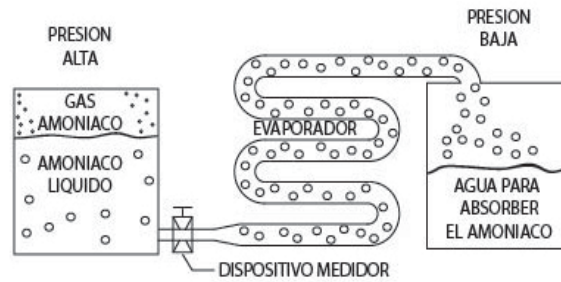
### 1.5.1. Métodos basados en medios Químicos

Estos métodos están basados en las reacciones químicas que ocurren al estar en contacto dos sustancias, una es capaz de absorber a la otra, y debido a la volatilidad de una de ellas es capaz de separarse en forma de gas, debido a un cambio de temperatura más alto en el ciclo, el ciclo se cierra al bajar la temperatura, el gas comienza a condensarse y a mezclarse nuevamente con la otra sustancia, teniendo como resultado la extracción de calor. Para un mejor entendimiento de este método tenemos el ejemplo del cloruro de plata y el amoníaco que debido a su condición química, absorbe calor mucho más rápido que el éter o el alcohol.

El cloruro de plata, es capaz de absorber el gas amoníaco, esta mezcla al estar en contacto de una temperatura más alta, comienza a desprender el gas amoníaco, este al enfriarse, comienza a condensarse, cambiando de estado, teniendo como resultado amoníaco líquido, el cual ebulle a una temperatura muy baja, por lo tanto, la zona de la cual el amoníaco extrae calor se enfría o refrigera.

Como podemos observar en el Diagrama 1.4 se produce la refrigeración cuando un tanque de amoníaco líquido puro sometido a presión alta se alimenta desde el lado alto, a través de un dispositivo medidor en un evaporador.

**Diagrama 1.4.:** Principio del sistema de refrigeración por absorción



4

### 1.5.2. Métodos basados en medios Físicos

La clasificación aquí descrita no pretende de modo alguno ser exhaustiva, ya que hay varios métodos que hoy día son obsoletos y otros están por desarrollarse. En los métodos basados en medios físicos podemos encontrar los siguientes sistemas:

- Sistema por compresión de gases
- Sistema termoeléctrico
- Sistema magnético
- Sistema por chorro de vapor

---

<sup>4</sup>Principios y Sistemas de Refrigeración Pita, E.G.

### 1.5.2.1. Sistema por compresión de gases

Este sistema es el de uso más comercial, y está basado en los principios de Presión y Temperatura. El primer paso para entender como es el funcionamiento del sistema de enfriamiento por compresión de gases, es aclarar los conceptos de calor y temperatura. El calor es la energía producida por el movimiento molecular de un cuerpo, es transferible siempre de un cuerpo con mayor temperatura a otro. Sus unidades son las calorías [*Cal*] o bien kilo calorías [*Kcal*] las cuales se definen como la cantidad necesaria de calor para elevar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura un litro de agua. La temperatura es la manera como interpretamos el nivel de calor, es decir el movimiento molecular que existe en un cuerpo, en referencia a la ausencia de este mismo. Es importante definir esta diferencia ya que es necesario tener en cuenta que el hecho de tener la misma temperatura durante un cierto tiempo, no implica que el calor se comporte de la misma manera. Al existir una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, tenemos una transferencia de calor, el cual es otro tema que es necesario describir. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura de un cuerpo a otro, mayor será la transferencia de calor, el calor fluye de un cuerpo con más movimiento molecular a otro, cediendo su energía a las moléculas más lentas del cuerpo más frío, produciendo el enfriamiento del cuerpo más caliente debido a la disminución de velocidad de sus moléculas. Los tipos de transferencia, que nos conciernen para este tema son los siguientes:

- Transferencia de calor por conducción Se define como la energía que se traslada de una molécula a otra por contacto directo, mientras más rápido se desplace una molécula mas rápido producirá el movimiento de las demás moléculas, en este tipo de transferencia de calor no todos los materiales transfieren el calor de la misma forma y velocidad, existe una relación con la conducción eléctrica, los materiales que no tienen buena conducción eléctrica, tampoco tienen buena conducción térmica.
- Transferencia de calor por convección Este tipo de transferencia ocurre, cuando el calor se mueve de un lugar a otro, por medio de corrientes establecidas mediante un medio que fluye. Estas corrientes se conocen como corrientes de convección y se producen debido al cambio de densidad produciéndose a través de la expansión de la porción calentada del fluido. Cuando se calienta cualquier porción de un fluido, este se expande y aumenta su volumen por unidad de masa. Transfiriendo así el calor de un fluido a un cuerpo.



Como habíamos visto anteriormente, la caloría es la cantidad de calor necesario, para elevar la temperatura de un litro de agua un grado centígrado. Como se menciono anteriormente estamos hablando de elevar  $1^{\circ}C$  un litro de agua, pero podemos hablar de valores diferentes al elevar  $1^{\circ}C$  cualquier otra substancia, a esto le llamamos calor específico. Tener muy en cuenta el calor específico es necesario para determinar la capacidad calorífica de un equipo, debido a que podemos determinar el comportamiento de la temperatura de diversas materias. Teniendo claro estos temas podemos abordar, el tema fundamental de este sistema de refrigeración, que es el de compresión y expansión de gases. La relación Presión-Temperatura, relaciona el cambio de estado de una substancia, de acuerdo a la presión a la que esta se encuentra, para tener más clara esta idea, tomare como ejemplo, la relación existente Presión-Temperatura del agua a condiciones normales, es decir a nivel del mar el agua hierve a  $100^{\circ}C$ , la atmósfera ejerce a nivel del mar una presión de  $760\text{ mm. de Hg}$  equivalente a una atmósfera o a  $1\text{ kg/cm}^2$ .

En la Tabla 1.1 podemos observar las relaciones de Presión Absoluta - Temperatura en sus diferentes escalas tanto en temperatura como en presión.

**Tabla 1.1.:** Tabla de equivalencias de Presión - Temperatura.

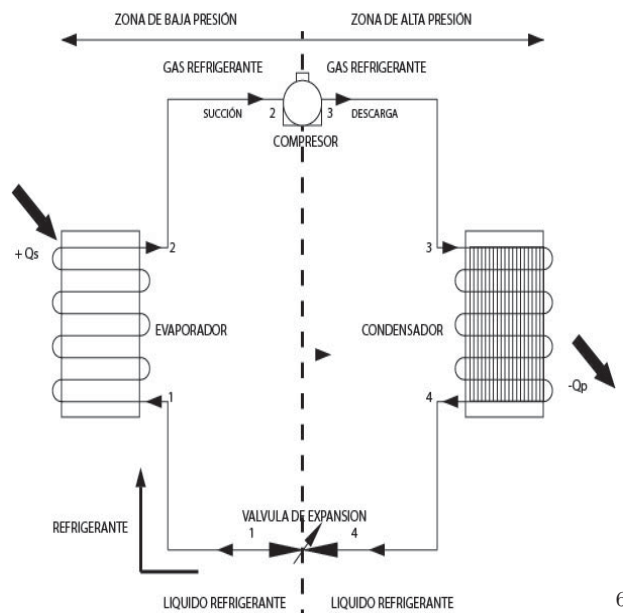
Temperatura		Presiones Absolutas			
°C	°F	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	mmHg	pulg.Hg
-12.2	10	0.0021	0.031	1.6	0.063
-6.7	20	0.0035	0.05	2.616	0.103
-1.1	30	0.0056	0.081	4.191	0.165
0	32	0.0062	0.089	4.572	0.18
1.1	34	0.0067	0.096	4.953	0.195
2.2	36	0.0072	0.104	5.384	0.212
3.3	38	0.0078	0.112	5.816	0.229
4.4	40	0.0085	0.122	6.299	0.248
5.6	42	0.0091	0.131	6.807	0.268
6.7	44	0.0099	0.142	7.34	0.289
7.8	46	0.0107	0.153	7.924	0.312
8.9	48	0.0115	0.165	8.534	0.336
10	50	0.0124	0.178	9.194	0.362
15.6	60	0.0179	0.256	13.258	0.522
21.1	70	0.0254	0.363	18.77	0.739
26.7	80	0.0354	0.507	26.212	1.032
32.2	90	0.0488	0.698	36.118	1.422
37.8	100	0.0665	0.95	49.098	1.933
43.3	110	0.0892	1.275	65.963	2.597
48.9	120	0.1185	1.693	87.579	3.448
54.4	130	0.1556	2.224	114.985	4.527
60	140	0.2023	2.89	149.377	5.881
65.6	150	0.2603	3.719	192.354	7.573
71.1	160	0.3319	4.742	245.262	9.656
76.7	170	0.4195	5.994	309.956	12.203
82.2	180	0.5258	7.512	388.493	15.295
87.8	190	0.6538	9.34	483.031	19.017
93.3	200	0.8068	11.526	596.087	23.468
98.9	210	0.9886	14.123	730.351	28.754
100	212	1.0287	14.696	759.993	29.921

---

<sup>5</sup>Principios de la refrigeración R. Warren Marsh

Si se quisiera hervir agua en una montaña, el punto de ebullición será diferente, debido a la presión atmosférica, que es menor a la del nivel del mar, el agua hervirá a menor temperatura, sin que implique que tendrá la misma cantidad de calorías, esto quiere decir que nuestra agua hervirá antes, pero no será lo suficientemente caliente. Así que es posible hervir agua a muy baja temperatura, solo es necesario exponer el agua a una baja presión, para que esta cambie de estado. Al cambiar de estado absorbe el calor que se encuentra fuera del sistema, este es el principio de la refrigeración, sin embargo este proceso no termina allí, porque en este punto solo está absorbiendo el calor que se encuentra en el sistema, después es necesario expulsar ese calor, y se lograra aumentando la presión, cambiando de nuevo de estado, esta vez volviendo el gas a liquido con una mayor temperatura a la que se encuentra el ambiente, logrando la condensación del gas y llevando a cabo este cambio de fase de gas a liquido, y volviendo al principio del sistema. Diagrama 1.5

**Diagrama 1.5.:** Principio del sistema de refrigeración por compresión



6

<sup>6</sup>Principios y Sistemas de Refrigeración Pita, E.G.

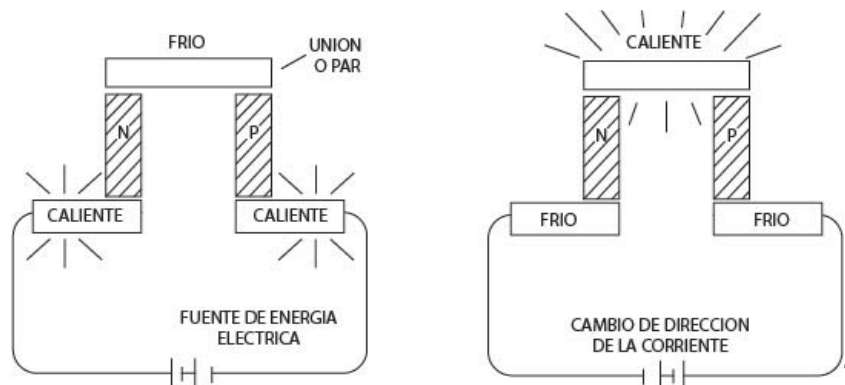
### 1.5.2.2. Sistema Termoeléctrico

Este sistema está basado en el efecto Peltier, que consiste en circular una corriente a través de un circuito, donde tenemos dos barras semiconductoras conectadas individualmente a una barra metálica. Esto crea una diferencia térmica, a partir de una diferencia de potencia eléctrica. La corriente produce una transferencia de calor desde una unión que se enfría hasta una que se calienta. Se deben cumplir 3 condiciones para que el mencionado efecto Peltier pueda suceder y son:

- El material termoeléctrico debe ser un excelente conductor de electricidad, para reducir las pérdidas por resistencia.
- El material termoeléctrico tiene que ser un conductor muy malo del calor, porque debe de absorber calor en un extremo y rechazarlo en el otro. También debe existir un flujo limitado del extremo caliente al frío.
- El material termoeléctrico debe poseer una potencia termoeléctrica alta. Esto significa que debe tener un grado alto de cambio del voltaje con la temperatura.

En el diagrama 1.6 podemos observar la unión individual usando dos tipos diferentes de semiconductores (N y P) y el efecto del cambio de dirección de la corriente.

**Diagrama 1.6.:** Principio del sistema de refrigeración termoeléctrico.



<sup>7</sup>Principios y Sistemas de Refrigeración Pita, E.G.

### 1.5.2.3. Sistema Magnético

Todas las sustancias están comprendidas dentro de una clasificación, de acuerdo con sus propiedades magnéticas. Dentro de esa clasificación podemos encontrar los materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.

Cuando se enfrían previamente las sales paramagnéticas a una temperatura muy baja, el movimiento de calor de las moléculas se reduce al mínimo. Por lo tanto, estas moléculas se pueden considerar como imanes elementales cuando se someten a un campo magnético fuerte. Si después se desmagnetiza el material paramagnético, se enfría, porque no hay ninguna ganancia o pérdida de calor del exterior del sistema propiamente dicho. Se dice que es un enfriamiento adiabático.

El funcionamiento de este sistema está basado en la evaporación de gases licuados tales como el helio, hidrógeno, nitrógeno, entre otros y el manejo de sales. Toda sustancia se clasifica de acuerdo a sus propiedades magnéticas, las cuales su descripción son:

#### **Materiales ferromagnéticos**

Los materiales ferromagnéticos son los que son atraídos fuertemente por un imán

#### **Materiales diamagnéticos**

En esta clasificación encontramos aquellos materiales que son repelidos por un polo magnético

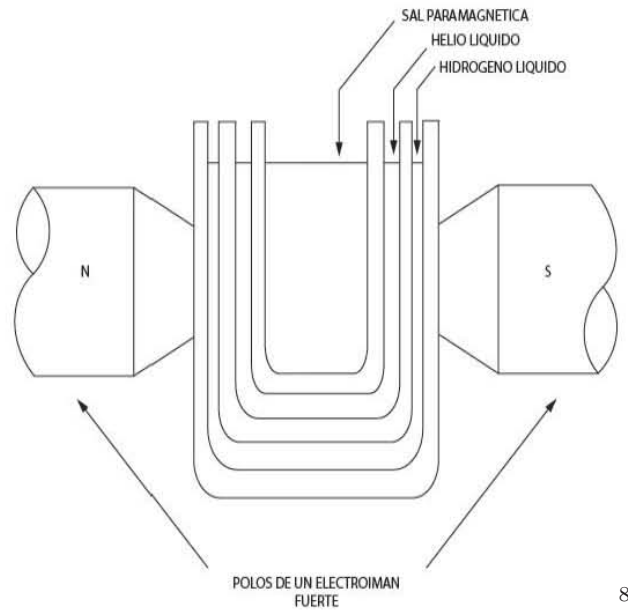
#### **Materiales paramagnéticos**

Son aquellos materiales que se atraen débilmente

El efecto se lleva a cabo cuando se lleva las sales paramagnéticas a un movimiento molecular mínimo, es decir se enfrían, por medio de helio hirviendo a una baja presión. Estas sales se convierten en un imán elemental, al estar expuestas a un campo magnético fuerte. El calor cedido se absorbe sin que haya un cambio de temperatura, esto baja la temperatura a menos de  $1^{\circ}K$  Este tipo de enfriamiento tiene su mayor aplicación en el área de investigación.

En el diagrama 1.7 se muestra la disposición de los materiales y la fuente de potencia para el enfriamiento magnético de una sustancia paramagnética.

**Diagrama 1.7.:** Principio del sistema de refrigeración magnético.



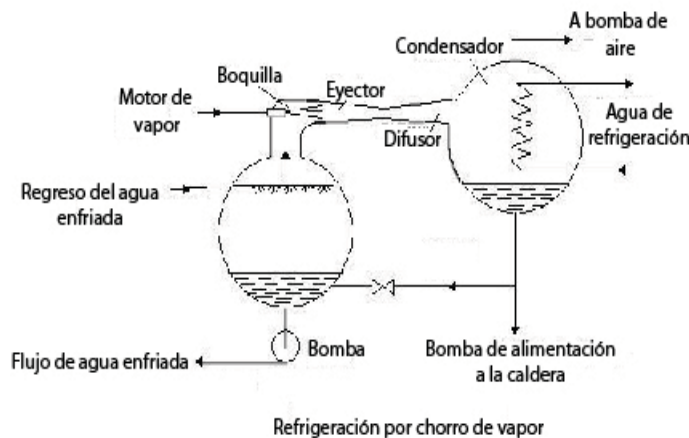
---

<sup>8</sup>Principios y Sistemas de Refrigeración Pita, E.G.

#### 1.5.2.4. Sistema por chorro de vapor

El agua permanece en estado líquido hasta la temperatura a la cual su punto de ebullición corresponde a su presión. Cuando el agua a una temperatura superior a  $7^{\circ}\text{C}$  entra en un tanque que tiene una presión de  $0.148\text{ psia}$  ( $0.01\text{ kg/cm}^2\text{ absoluta}$ ), el agua se enfría a  $7^{\circ}\text{C}$  al ceder calor. El agua propiamente dicha se evapora porque no hay otro medio a una temperatura suficientemente baja para recibir este calor. Por lo tanto, el calor sensible que cede el agua en el enfriamiento se usa como calor latente. Este calor evapora una pequeña cantidad del agua que entra en un tanque. El agua caliente que regresa al tanque se enfría a una temperatura correspondiente a la presión que existe en el tanque. La presión baja determina la temperatura a la cual se puede enfriar el agua. El agua fría se extrae por medio de una bomba que aumenta la presión al entregarla en un lugar deseado, el tanque en que se evapora continuamente el agua y se transforma en vapor se conoce como tanque de evaporación instantánea. A menos que el vapor que se produce se extraiga tan rápidamente como se forma, no se mantendrá la presión baja necesaria dentro del tanque. Esto significa que se debe extraer el vapor y después comprimirlo hasta el punto en el que se condense a una temperatura mayor que el medio existente para ese propósito. Diagrama 1.8

**Diagrama 1.8.:** Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración por chorro de vapor de vapor



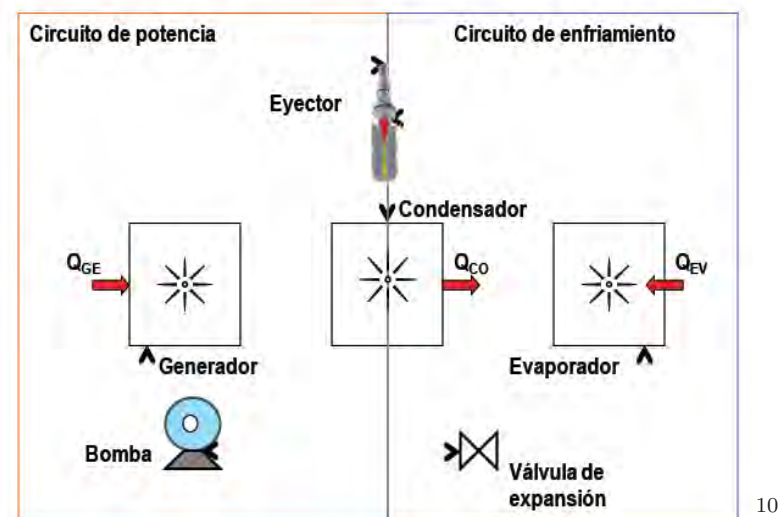
9

<sup>9</sup>Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración Hernández Goribar

### 1.5.2.5. Sistema por Eyecto-Compresión

Un sistema de refrigeración por eyecto-compresión combina un ciclo de compresión de vapor y un eyector de vapor. El ciclo por eyecto-compresión se puede considerar como un ciclo por compresión de vapor que emplea para su operación un eyector en lugar de un compresor convencional. El refrigerante es succionado y comprimido a presión de saturación en el eyector a partir del empleo de un fluido motor. El fluido motor deberá ser un fluido del mayor peso molecular posible, pero en la mayoría de las instalaciones convencionales por cuestiones prácticas se emplea el mismo fluido como refrigerante y motor. Como se puede ver en el Diagrama 1.9 un refrigerador basado en el principio de eyecto-compresión está constituido básicamente por dos circuitos térmicos, uno llamado circuito motor ó caliente y otro llamado circuito frío. El circuito caliente tiene como función producir el vapor del fluido de trabajo en el generador de vapor mediante el su ministro de una cantidad de calor  $Q_{GE}$  para después pasarlo al eyector.

**Diagrama 1.9.:** Diagrama de Sistema por Eyecto-Compresión



10

<sup>10</sup>Refrigeración por Eyecto compresión MC. Raúl Román



El eyector está constituido por dos toberas una dentro de la otra las cuales tienen una sección convergente, cuello y una sección divergente. En la sección convergente, el vapor del circuito caliente disminuye su presión y aumenta su velocidad alcanzando un nivel supersónico. Posteriormente en la sección divergente, se produce la expansión del fluido, provocando la succión del fluido frío proveniente del evaporador. El fluido caliente se comprime junto con el fluido frío a través de ondas de choque y salen del eyector. El fluido así formado pasa hacia el condensador donde se licua mediante la extracción de una cantidad de calor  $Q_{CO}$ , para separarse después en dos líneas, una que va hacia el generador de vapor y la otra que va hacia el evaporador, donde se vaporiza mediante la absorción de una cantidad de calor  $Q_{EV}$  y pasa hacia el eyector dando inicio nuevamente al ciclo.

## **2. Aplicaciones Comerciales de Enfriamiento**

En este capítulo describiré las 6 aplicaciones comerciales en la refrigeración, enfatizando en los componentes de la refrigeración doméstica, debido a que es el tipo de refrigeración en la que nos enfocaremos para propósitos de este trabajo.

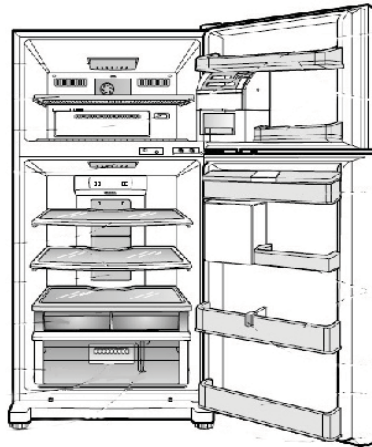
## 2.1. Aplicaciones Comerciales de Enfriamiento

Actualmente, existen 6 tipos de aplicaciones de la refrigeración, los cuales son:

- Refrigeración Doméstica
- Refrigeración Comercial
- Refrigeración Industrial
- Refrigeración Marina y de Transportación
- Acondicionamiento del aire
- Conservación de alimentos

### 2.1.1. Refrigeración Doméstica

El campo de la refrigeración doméstica está limitada principalmente a refrigeradores y congeladores caseros. Sin embargo, la refrigeración doméstica representa una parte muy significativa de la refrigeración industrial. Las unidades domésticas generalmente son de tamaños pequeños teniendo capacidades de potencia que fluctúan entre  $1/20$  y  $1/2$  hp. y son del tipo de sellado hermético. Estas unidades son conocidas por todos, debido a que se les puede encontrar en hogares, y en tiendas de línea blanca de cualquier centro comercial.



1

**Figura 2.1.:** Interior de un refrigerador doméstico.

El funcionamiento de la mayoría de los refrigeradores domésticos, esta basado en el ciclo de refrigeración de compresión de vapor, el cual se lleva a cabo gracias a los diferentes componentes que a continuación se describen:

### **Compresor**

En un ciclo de refrigeración, el compresor tiene dos funciones importantes, una función es bombear el vapor del refrigerante al evaporador, para mantener la temperatura y la presión deseada en el evaporador. La segunda función es incrementar la presión del vapor del refrigerante a través del proceso de compresión, y simultáneamente incrementar la temperatura del vapor del refrigerante. Los compresores de refrigerantes se pueden dividir en compresores de desplazamiento, estos compresores mediante un eje incrementan la presión de un refrigerante, reduciendo el volumen de compresión en la cámara. y los compresores dinámicos, estos compresores incrementan la presión del refrigerante a través de un continuo intercambio del momento angular entre un elemento rotativo mecánico y un fluido sujeto a compresión. Ambos bombean refrigerante a través de la tubería e incrementan la presión del refrigerante. Figura 2.2

En el mercado existen diferentes tipos de compresores disponibles, los mas recurridos son los compresores reciprocantes, los rotativos y los de tornillo.

**Figura 2.2.:** Compresor hermético



2

---

<sup>1</sup>imagenesdeposito

<sup>2</sup>Embraco

### Condensador

Hay muchos tipos de condensadores a considerar, cuando se realiza una selección para una instalación, pero particularmente para el uso doméstico, sin duda el más utilizado es el enfriamiento por aire, el refrigerante transfiere la temperatura obtenida del interior del refrigerador al ambiente por medio de convección. De acuerdo al tamaño de los refrigeradores domésticos es el condensador que mejor se ajusta a las necesidades de estos, y su mantenimiento es realmente sencillo. Figura 2.3

**Figura 2.3.:** Condensador en forma de caracol



### Evaporador

Los evaporadores pueden ser considerados como el lugar donde el calor es retirado en un sistema de refrigeración y provee el efecto de enfriamiento requerido para cualquier aplicación en particular. Hay tantos diferentes tipos de evaporadores como aplicaciones de intercambiadores de calor, sin embargo los evaporadores se dividen en dos categorías: Evaporadores de enfriamiento directo, es decir, enfría el aire que a su vez enfría al producto. Y evaporadores de enfriamiento indirecto, los cuales enfrían un líquido que a su vez enfría al producto. En los refrigeradores domésticos encontraremos evaporadores de enfriamiento directo a estos evaporadores también se les llama evaporadores de espiral de expansión directa, los cuales están formados por un tubo, como su nombre lo indica, en espiral por el cual fluye el refrigerante y este está ensamblado sobre una superficie de aluminio, la cual acelera la transferencia de calor del interior a refrigerarse. Figura 2.4

**Figura 2.4.:** Vista posterior del ensamble de tolva-evaporador



### Dispositivos de Regulación

También llamados válvulas de expansión o válvulas de regulación se utilizan para reducir la presión de condensación del refrigerante (presión alta) a la presión de evaporación (baja presión) mediante operaciones de ahorcamiento y de regulación del flujo del refrigerante líquido al evaporador. Estos dispositivos están diseñados para regular la velocidad a la que el refrigerante entra al serpentín. En la Figura 2.5 podemos observar válvulas de expansión de diferentes capacidades térmicas

**Figura 2.5.:** Válvulas de expansión



3

---

<sup>3</sup>Danfoss

### 2.1.2. Refrigeración Comercial

El termino “refrigerador comercial” se aplica por lo general a unidades pequeñas fácilmente disponibles, del tipo empleado en tiendas de menudeo, mercados, restaurantes, hoteles e instituciones que se dedican a almacenamiento, exhibición, procesamiento y a la distribución de artículos de comercio de fácil descomposición. Una característica esencial, que lo diferencia del resto de los equipos de refrigeración es el mueble frigorífico que expone el producto perecedero y maneja temperaturas de  $+7/ + 10^{\circ}C$  hasta  $-18/20^{\circ}C$ . El término también se usa para unidades de refrigeración mas grandes como es el caso de cuartos que se usan para dicho propósito.

Debido a que se cuenta con un gran número de unidades de refrigeración para fines muy particulares, se dificulta realizar una clasificación, sin embargo en general las unidades comerciales pueden ser agrupadas en tres categorías principales:

- Refrigeradores tipo casero
- Enfriadores con pasillo interno
- Unidades del tipo para exhibición

Las cuales se describirán a continuación:



### 2.1.2.1. Refrigeradores tipo casero

Los refrigeradores tipo casero son los mas versátiles y son los mas ampliamente usados en todas las unidades comerciales. Los clientes típicos de estas unidades son tiendas de abarrotes, carnicerías, panaderías, boticas, cafeterías, restaurantes, florerías, hoteles e instituciones de todas especies. Mientras que algunos de estos refrigeradores se usan sólo para almacenar, otros se usan tanto para almacenar como para exhibir. Los que solo se utilizan para almacenamiento por lo general tienen puertas sólidas, mientras que los utilizados para exhibición tienen puertas de vidrio. La mayor aplicación para el refrigerador Biomedico está en el área medica, en el se conservan muestras biológicas, sangre, vacunas, el cual podemos observar en la Figura 2.6

**Figura 2.6.:** Refrigerador Biomédico



### 2.1.2.2. Enfriadores con pasillo interno

Los enfriadores con pasillo interno son unidades que principalmente se les usa para almacenar y están disponibles en una gran variedad de tamaños para ajustarse a cada necesidad. Casi todas las tiendas de menudeo, mercados, hoteles, restaurantes, instituciones, etc. , tienen uno o más de estas unidades para almacenar todo tipo de alimentos de fácil descomposición. Algunos de estos equipos cuentan con puertas de vidrio. Estas unidades son especialmente para almacenar, exhibir y distribuir alimentos tales como productos lácteos, huevos y bebidas. Los enfriadores con pasillo interno igual que la unidades de tipo casero, son ampliamente usadas en tiendas de comestibles, particularmente en puestos de refrescos, y tiendas al aire libre. En la Figura 2.7 podemos observar un refrigerador de puerta de cristal, usualmente encontrado en tiendas de autoservicio, normalmente utilizado para almacenar refrescos.

**Figura 2.7.:** Refrigerador refresquero



### 2.1.2.3. Unidades del tipo para exhibición

La principal función de cualquier unidad de exhibición, es la de exhibir el producto o artículo de consumo en la forma más atractiva posible con el fin de estimular las ventas. Por lo tanto en el diseño de estas unidades la principal consideración es la referente a la exhibición del producto. En muchos casos esto no es necesariamente compatible con el suministro de las condiciones óptimas de almacenaje para el producto que está siendo exhibido. Por lo mismo, el tiempo de almacenamiento del producto exhibido frecuentemente está muy limitado pudiendo ser desde muy pocas horas en algunos casos hasta una semana o más dependiendo del producto y del tipo de unidad.

Las unidades de exhibición son de dos tipos generalmente, las de autoservicio en la que el cliente se sirve por sí mismo, y las de servicio en las que el cliente es atendido por un empleado. La primera es muy popular en los supermercados y tiendas de menudeo en establecimientos de autoservicio. Existen unidades de autoservicio de tipo abierto y cerrado, las de tipo abierto han adquirido mucha popularidad, con el advenimiento de los supermercados, se han incrementado notablemente las unidades de tipo abierto, volviéndose obsoletas las de autoservicio de tipo cerrado. Mientras que las de servicio se usan en tiendas pequeñas de comestibles, mercados, panaderías, etc. En la Figura 2.8 podemos observar una vitrina de autoservicio de tipo abierto.

**Figura 2.8.:** Vitrina de exhibición



4

---

<sup>4</sup>Solidworks

### 2.1.3. Refrigeración Industrial

La refrigeración industrial es confundida con la refrigeración comercial porque la división entre estas dos áreas no está claramente definida. Como regla general, las aplicaciones industriales son más grandes en tamaño que las aplicaciones comerciales, y la característica que las distingue es que la refrigeración industrial requiere un empleado para su servicio, que por lo general es un ingeniero. Algunas aplicaciones industriales típicas son plantas de hielo, grandes plantas empacadoras de alimentos (carnes, pescado, pollos, alimentos congelados), cervecerías, productores de lácteos, y plantas industriales, tales como refinerías de petróleo, plantas químicas, plantas huleras, etc. Figura 2.9

La refrigeración industrial también incluye aquellas aplicaciones referentes a la construcción industrial, es difícil hablar sobre los rangos de funcionamiento de un equipo de refrigeración industrial, ya que los rangos varían de acuerdo a su aplicación, por ejemplo, si se necesita almacenar dulces es necesario tener una temperatura de  $16^{\circ}\text{C}$ , lo cual será totalmente diferente si se requiere refrigerar helado, el cual necesita una temperatura de  $-29^{\circ}\text{C}$ ,  $-21^{\circ}\text{C}$  para comida congelada, ó  $-4^{\circ}\text{C}$  para carne.

**Figura 2.9.:** Unidad de refrigeración para centro comercial



5

---

<sup>5</sup>Chiller

### 2.1.4. Refrigeración Marina

Las aplicaciones que se clasifican en esta categoría, pueden ser una parte referida a refrigeración comercial y otra parte relacionada con la refrigeración industrial; sin embargo ambas partes de dichas áreas de especialización han tenido tal crecimiento que merecen atención especial. La técnica de las instalaciones frigoríficas marinas difiere notablemente de aquellas que se ha tomado la costumbre de aplicar para las instalaciones comerciales “terrestres” clásicas. En efecto, la refrigeración a bordo de buques es otra rama, muy especializada, en la técnica corriente de la industria frigorífica y comprende una cantidad de aplicaciones interesantes, de las que cada una constituye un problema particular que ha de estudiarse y resolverse por separado, de acuerdo con su propia naturaleza y los fines que se desea cubrir en este trabajo. La refrigeración marina se refiere a la realizada a bordo de embarcaciones de transporte y cargamento sujeto a deterioro, como los barcos pesqueros, o simplemente a la refrigeración de los almacenes de todo tipo de barcos, desde un crucero, un transportador hasta un bote, por lo que es recomendable no tener exclusivamente una temperatura fija, a menos que el producto que se refrigere sea siempre el mismo, los rangos de refrigeración van de los  $-20^{\circ}C$  a los  $15^{\circ}C$  .

## 2.1 Aplicaciones Comerciales de Enfriamiento

---

En la refrigeración marina podemos encontrar diferentes maneras de refrigerar, en los grandes buques de carga se recurre con mayor frecuencia a una instalación central de salmuera enfriada, que se distribuye a todo el barco, en algunos barcos pequeños es posible encontrar que se utilizan capas de hielo, en las que se alterna el producto, ya sea pescado, camarones o crustáceos y la siguiente capa de hielo. La finalidad de la refrigeración moderna es muy variable y va desde conservar un producto, hasta llevarlo a realizar un proceso. En la Figura 2.10 podemos observar una unidad chiller aplicada a refrigeración para barcos para enfriar o calentar agua.  $26000 \text{ BTU/h}$

**Figura 2.10.:** Unidad de refrigeración para barcos



6

---

<sup>6</sup>Nauticaexpo

### 2.1.5. Acondicionamiento del Aire

Como lo implica su nombre, el acondicionamiento de aire concierne con la condición del aire en alguna área o espacio designado. Por lo general, esto involucra no únicamente el control de la temperatura del espacio, sino también la humedad del mismo y el movimiento del aire incluyéndose el filtrado y la limpieza de éste.

Las aplicaciones de acondicionamiento de aire son de dos tipos de acuerdo a sus propósitos, para producir confort o para uso industrial. Cualquier acondicionamiento de aire el cual tiene como función primordial la aplicación de aire para confort humano, se le llama acondicionamiento de aire para confort. Se tienen instalaciones típicas de aire acondicionado para confort en casas, escuelas, oficinas, iglesias, hoteles, establecimientos comerciales, edificios públicos, fabricas, automóviles, autobuses, trenes, aviones, barcos, etc. Figura 2.11

**Figura 2.11.:** Unidad de aire acondicionado split



7

---

<sup>7</sup>Samsung

## 2.1 Aplicaciones Comerciales de Enfriamiento

---

Por otra parte, cualquier otro tipo de acondicionamiento de aire el cual no satisfaga su fin primordial de acondicionamiento de aire para confort humano, se le llama acondicionamiento de aire industrial. Esto no necesariamente quiere decir que los sistemas de acondicionamiento de aire industriales no puedan también proporcionar confort.

Las aplicaciones de acondicionamiento de aire industrial no tienen límite de número y variedad. En general, las funciones de los sistemas de acondicionamiento de aire industrial son:

- Contenido de humedad en materiales hidrocópicos,
- Reacción de la velocidad en las reacciones químicas y bioquímicas,
- Límite de las variaciones en el tamaño de la precisión de artículos manufacturados debido a la expansión y contracción térmica,
- Proporcionar aire filtrado limpio.



### 2.1.6. Conservación de alimentos

Uno de los usos más comunes de la refrigeración mecánica es la conservación de artículos comerciales putrescibles, particularmente comestibles. Por lo mismo debe darse la debida consideración en cualquier estudio de refrigeración. En la actualidad, la conservación de alimentos tiene más importancia que la que antes tuvo en la historia del hombre. Hoy día las grandes poblaciones urbanas, necesitan grandes cantidades de alimento, de las cuales una gran parte son producidos y procesados en lugares muy apartados. Por lo tanto, estos comestibles deben de conservarse en condiciones adecuadas durante su traslado y el subsecuente almacenamiento hasta que estos sean consumidos. Esto podrá ocurrir en horas, días, semanas, meses y en algunos casos hasta en años. Además, muchos productos, sobre todo frutas y vegetales son de temporada. Debido a que estos son producidos en cierta época del año, se les debe almacenar para tenerlos a disposición durante todo el año. Figura 2.12

La refrigeración mantiene el alimento por debajo de la temperatura de multiplicación bacteriana. (entre  $2^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$  en frigoríficos industriales, y entre  $8$  y  $15^{\circ}\text{C}$  en frigoríficos domésticos.) Conserva el alimento sólo a corto plazo, ya que la humedad favorece la proliferación de hongos y bacterias, mantiene los alimentos entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $5 - 6^{\circ}\text{C}$ , inhibiendo durante algunos días el crecimiento microbiano. La temperatura debe mantenerse uniforme durante el periodo de conservación, dentro de los límites de tolerancia admitidos, en su caso, y ser la apropiada para cada tipo de producto.

**Figura 2.12.:** Vitrina refrigerada para almacenar alimentos



8

---

<sup>8</sup>Tecnifrio

### **3. Eficiencia energética en refrigeración**

A lo largo de los últimos años se han realizado varios estudios en busca de mejorar la eficiencia de los equipos de refrigeración doméstica. En este capítulo se presentan unos de los trabajos realizados por varios investigadores en las áreas de aislamiento térmico, flujo de aire, almacenamiento de energía, transferencia de calor, selección de refrigerantes, análisis en el comportamiento de elementos en relación a su desgaste, todas estas investigaciones aportan el sustento de este trabajo, debido a que han demostrado como es posible mejorar la eficiencia en cada una de estas áreas.

Estos trabajos brindarán información que debe aplicarse al diseño de los refrigeradores, y también ayudarán a comprender el comportamiento de un refrigerador en relación a su eficiencia.

### 3.1. Objetivos Generales y Particulares

#### Objetivos Generales

Se propondrá una mejora en eficiencia de equipos para refrigeración colaborando a la reducción de la explotación de recursos naturales por medio de la reducción del consumo eléctrico y el mejor aprovechamiento de la temperatura.

#### Objetivos Particulares

Implementar desarrollo tecnológico amable con el medio ambiente enfocando el objetivo a los equipos de refrigeración domésticos debido a que son los equipos de refrigeración con menor eficiencia y a los cuales es posible implementarles avances tecnológicos como el aislamiento al vacío, recuperación de temperatura, circulación del aire al interior.

Es el objetivo particular de este trabajo es mostrar que es posible mejorar la eficiencia de los equipos de refrigeración debido a la implementación de paneles de aislamiento, paneles de cambio de fase, compresor de velocidad variable.

#### Justificación del trabajo

Actualmente en México se libera a la atmósfera mas de 4,641 Toneladas de  $CO_2$  por un consumo desmesurado de la energía eléctrica en refrigeradores domésticos, en muchos equipos de refrigeración aun se utilizan gases refrigerantes nocivos para la atmósfera con altos valores de poder de destrucción del ozono, potencial de calentamiento global y de efecto invernadero total, es por esto que es prioritario atender las necesidades de la refrigeración, implementando mejores diseños tanto en los sistemas de refrigeración como en la transferencia de calor, aislamiento, almacenamiento de temperatura. En México existen normas que regulan la eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos, sin embargo no son totalmente obligatorias, lo cual permite que empresas no cumplan con lo requerido en la norma afectando de manera directa la eficiencia de los equipos de refrigeración, es debido a estas observaciones que me motivo a realizar este trabajo.

### 3.2. Planteamiento del problema

Para abordar este capítulo es necesario conocer los problemas que aquejan a la refrigeración como lo es el consumo excesivo de energía eléctrica, utilización de componentes

### 3.3 Conceptos relevantes referentes al ahorro energético.

---

dañinos para el medio ambiente, mal aprovechamiento de la temperatura, así como establecer los límites de este trabajo, debido a que la refrigeración abarca bastantes áreas, aplicaciones y funcionamientos, como lo hemos visto en los capítulos anteriores. Por lo tanto se establece como base de estudio las modificaciones en el diseño que nos permitan obtener una eficiencia energética mayor en la refrigeración doméstica, debido a que su uso es indispensable en cualquier hogar, y es el responsable del 50 % del consumo de la energía total empleada. [21]. En México hasta el año 2010 el INEGI contabilizó 23,091,296 viviendas particulares habitadas con refrigeradores domésticos, es por esta razón, que la cantidad de equipos en funcionamiento son mayores que cualquier equipo de refrigeración de otro tipo.

Para desarrollar el capítulo es necesario dividir el problema en:

- Conceptos relevantes referentes al ahorro energético
- Diseños de componentes que interactúan en el ciclo de refrigeración
- Estudios aplicados al diseño de la envolvente y sistemas auxiliares de un refrigerador.

## 3.3. Conceptos relevantes referentes al ahorro energético.

### 3.3.1. Eficiencia Energética

Concepto que nos permite identificar que tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía, usando términos de salida deseada y entrada requerida, teniendo la siguiente relación:

$$Eficiencia = \frac{Salida\ Deseada}{Entrada\ Requerida}$$

### 3.3.2. Coeficiente de Desempeño

El Coeficiente de Desempeño, (COP por sus siglas en ingles), el cual se denota como:  $COP$  es el resultado de la relación de la energía útil y la energía consumida, es decir, el objetivo de un refrigerador es eliminar el calor ( $Q$ ) del espacio en refrigeración, para realizar esto es necesario tener una entrada de trabajo  $W_{neto,entrada}$  por lo tanto el COP de un refrigerador se puede expresar como:

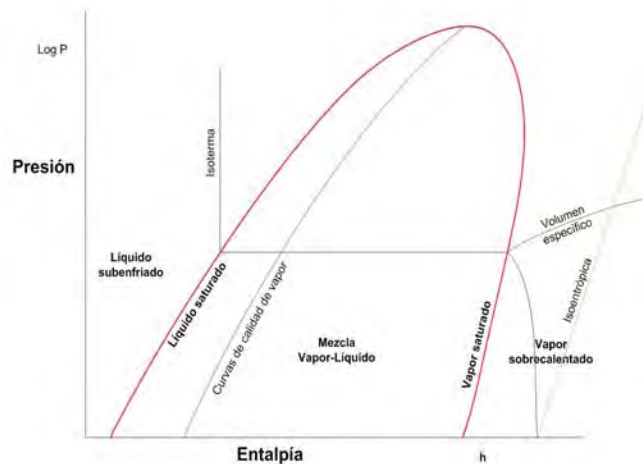
$$COP = \frac{\text{Frío producido}}{\text{Trabajo del compresor}} = \frac{Q}{W_{neto,entrada}}$$

### 3.3.3. Diagrama de Mollier

Mediante este diagrama que representa gráficamente el comportamiento del refrigerante, así como los tres estados de la materia podemos analizar el funcionamiento de un sistema de refrigeración así como los factores que nos permiten ahorrar energía.

Estudiando el consumo de energía, lo que nos interesa es aumentar el frío producido, reduciendo al mismo tiempo el consumo de energía del compresor.

**Diagrama 3.1.:** Diagrama Presión-Entalpía o Diagrama de Mollier



1

<sup>1</sup>Wikimedia commons

### **3.3.4. Condiciones medio-ambientales**

Las condiciones medio-ambientales donde se desempeña el equipo de refrigeración es fundamental en la eficiencia del equipo, debido a que hay factores que afectan directamente el funcionamiento del equipo de refrigeración, como lo es la humedad y la temperatura del aire. A continuación se mencionarán algunas de las consecuencias desfavorables para la eficiencia de cualquier equipo de refrigeración, ocasionadas por la humedad: Como lo es la formación de hielo en válvulas de expansión, tubos capilares y evaporadores, corrosión de metales, daños químicos en el material de aislamiento de los compresores herméticos, así como en varios materiales del sistema. Por otra parte, la temperatura del aire en el que se desempeñará el equipo de refrigeración es importante conocerlo, debido a que es necesario saber el comportamiento del gas refrigerante en el proceso de condensación, y así se podrá seleccionar tanto el refrigerante como la carga adecuada respectivamente.

## **3.4. Factores de diseño de componentes que interactúan en la refrigeración.**

### **3.4.1. Diseño del condensador**

Todos los refrigeradores, también los domésticos utilizan condensadores para retirar el calor del equipo, el condensador de un refrigerador convencional esta compuesto por tubo de cobre y alambre, estos se encuentra en el exterior en la parte posterior del equipo. [6]

El condensador es propenso a dañarse y a acumular suciedad en la superficie caliente, lo cual incrementa la resistencia y reduce significativamente la transferencia de calor del condensador. Debido a estos factores, como lo podemos ver en la Figura 3.2 Bansal, PK y Chin diseñaron un condensador llamado “condensador de pared caliente”, al cual se le han hecho estudios para conocer su comportamiento, al mismo tiempo, se ha estado aplicando en años recientes, en busca de remplazar el condensador de tubo de cobre y alambre. El condensador de pared caliente, también conocido como condensador de tipo envoltura esta formado por tubo de acero revestido por cobre, y este esta ensamblado en contacto directo con la superficie de la lámina exterior del equipo de

### 3.4 Factores de diseño de componentes que interactúan en la refrigeración.

---

refrigeración .Es por esto y que el diseño del condensador es relativamente nuevo, que no hay estudios teóricos ni prácticos a cerca de este condensador.

**Figura 3.2.:** Distribución de tubos del condensador de pared caliente

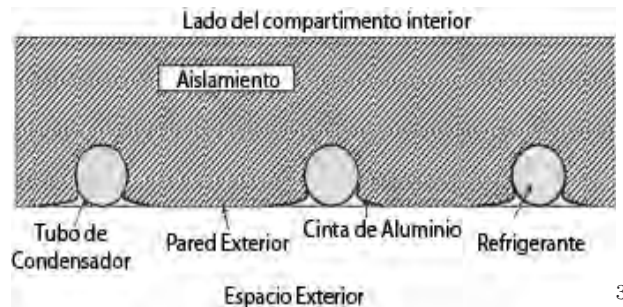


Para dar soporte al condensador se utiliza cinta adhesiva de aluminio, que al mismo tiempo, funciona como protección para prevenir la transferencia de calor al interior del compartimento del equipo de refrigeración. Tanto el condensador como la cinta adhesiva de aluminio están contenidos por la acción de la espuma aislante, transfiriendo la mayor cantidad de calor por convección y radiación a la placa exterior del equipo de refrigeración, mientras que una cantidad pequeña se infiltra al interior del compartimento del equipo, como lo muestra la Figura 3.3

**Figura 3.3.:** Ensamble del condensador de pared caliente

---

<sup>2</sup>[5]



P.K. Bansal y T.C. Chin realizaron un estudio, que compara los datos experimentales obtenidos y un modelo matemático que analiza el desempeño de un condensador de pared caliente. Utilizaron como refrigerante el fluido R134a en diferentes condiciones de operación, se ensambló el evaporador en contacto con la pared exterior del mueble aplicando cinta de aluminio, y espuma aislante, teniendo como resultado una variación del 10 % entre el modelo generado y los datos obtenidos experimentalmente.

Por lo tanto, podemos observar que la distribución del tubo del condensador influye fuertemente en la eficiencia del sistema, es posible utilizar el modelo con diferentes desarrollos del condensador a lo largo de la pared del refrigerador, hasta alcanzar el desarrollo óptimo del condensador, incrementando la eficiencia de la disipación de calor para el intercambiador de calor. [5]

#### 3.4.2. Selección del Compresor

Para seleccionar el compresor adecuado, es necesario considerar el tipo de refrigerante, y el diseño del compresor que se explicaran a continuación con más detalle.

##### 3.4.2.1. Tipo de Refrigerante

Para seleccionar un refrigerante es necesario conocer las condiciones legales, que existen en el país o región donde se quiera utilizarlo. Además es necesario conocer el comportamiento del refrigerante en relación a los factores medio ambientales como el poder de destrucción del ozono (ODP), el potencial de calentamiento global (GWP) y el efecto invernadero total (TEWI), así como los factores de seguridad, ya que podemos encontrar refrigerantes tóxicos y flamables.

---

<sup>3</sup>[6]



### 3.4 Factores de diseño de componentes que interactúan en la refrigeración.

---

Como podemos observar, este apartado es complicado, debido a que se debe seleccionar un refrigerante con propiedades termodinámicas que nos den ventajas energéticas y de seguridad, sin descuidar al mismo tiempo los compromisos medioambientales, que cada día son más necesarios.

#### 3.4.2.2. Diseño de compresor

El diseño del compresor está condicionado a los principios mecánicos de compresión encontrando como los más utilizados los de pistones, rotativos, de espiral, de tornillo, turbo-compresores.

Cada compresor tiene sus limitantes en cuanto a diseño, como son las fugas durante la compresión, el volumen muerto, la pérdida de carga en aspiración y en descarga, la relación de compresión, incremento en la temperatura de aspiración. Todos estos factores afectan la eficiencia del proceso de compresión, por lo tanto todos estos valores fluctúan de acuerdo a las características de cada refrigerante, como es la temperatura de evaporación y condensación.

Es muy importante saber la aplicación y el lugar donde se instalará el equipo, para tener un mejor panorama al escoger un compresor, un ejemplo serían los compresores alternativos, a los que es posible regular la presión de aspiración y descarga flotante, esto en un lugar donde las condiciones ambientales junto con la carga térmica del lugar varían, reduciendo el consumo del compresor.

En la Tabla 3.1 desarrollada por Danfoss encontraremos compresores recomendados según la aplicación y el refrigerante.

**Tabla 3.1.:** Tabla Refrigerante-Tipo de compresor

Fluido	Aplicación								
	Baja Temperatura			Media Temperatura			Aire Acondicionado		
	< 1CV	≤ 10CV	> 10CV	< 2CV	≤ 20CV	> 20CV	< 3CV	≤ 30CV	> 30CV
R134a	Pistón	Pistón	Tornillo	Pistón Rotativo	Pistón	Tornillo	Rotativo	Scroll	Tornillo
R290	Pistón	Pistón	Tornillo	Pistón	Scroll	Tornillo	Rotativo	Scroll	Tornillo
R404A R507	Pistón	Pistón	Tornillo	Pistón Rotativo	Pistón	Tornillo	Pistón	Scroll	Tornillo
R407C	Pistón	Pistón	Tornillo	Pistón	Pistón	Tornillo	Rotativo	Scroll	Tornillo
R410A	Pistón	Pistón	Tornillo	Pistón	Pistón	Tornillo	Pistón	Scroll	Tornillo
R600	Pistón Rotativo	Rotativo	Tornillo	Rotativo	Rotativo	Tornillo	Rotativo	Scroll	Tornillo
R717	Rotativo	Rotativo	Tornillo	Rotativo	Rotativo	Tornillo	Rotativo	Scroll	Tornillo
R744	Pistón	Pistón	Pistón	Pistón	Pistón	Pistón	Pistón	Pistón	Pistón

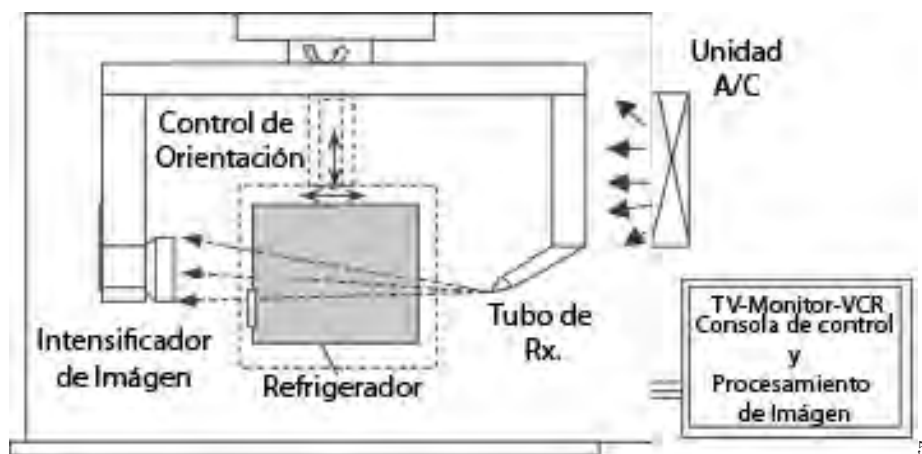
### 3.4.3. Cantidad de refrigerante

El procedimiento para diseñar un sistema térmico de un refrigerador domestico principalmente esta determinado por la demanda específica de consumo de energía a niveles de costo competitivos, cumpliendo con el criterio de desempeño para varias condiciones climáticas. Por lo tanto la satisfacción del cliente y la competencia requiere de las empresas mayor velocidad para mejorar el ajuste de temperaturas y todo lo relacionado con el desempeño del equipo de refrigeración, es la razón por la que empresas e investigadores utilizan programas de simulación comerciales o específicamente desarrollados para mejorar sus equipos. Sin embargo no se había hecho un estudio utilizando rayos X para comprender mejor el comportamiento dinámico de un equipo de refrigeración, movimientos de carga, y cambios de temperatura. En la Figura 3.4 podemos observar el layout de como Cemil Inan y Turgay Gonul realizaron el estudio utilizando rayos X a un equipo de refrigeración.

<sup>4</sup>Danfoss

C.V. = Caballos de Vapor

**Figura 3.4.:** Diagrama de distribución de rayos X utilizado en el estudio



Al realizar el estudio utilizando imágenes de rayos X en tiempo real, encontraron que: El sistema de rayos X es benéfico para entender comportamientos transitorios de un equipo de refrigeración, la tubería de cobre y acero no es buena para imágenes nítidas, no es el caso de la tubería de aluminio que mostró observaciones claras.

La alineación del tubo a la entrada del evaporador es importante debido a que durante el periodo de apagado es posible que se acumulen fluidos, que puedan causar problemas de ruido al iniciar el funcionamiento.

Se encontró que el barrenado de desagüe a la entrada del acumulador es útil debido a por medio de este desagüe se regresa refrigerante a la tubería del evaporador durante el fin del ciclo. Esto ayuda a reducir el flujo del refrigerante líquido al compresor al inicio del ciclo.

Durante el ciclo de refrigeración el nivel de la temperatura de la tubería de la salida del evaporador disminuyó a la entrada del evaporador después de 2/3 del ciclo, por lo tanto se encontró que el evaporador no está siendo usado efectivamente a lo largo del ciclo, es posible que se incremente la eficiencia del evaporador con simplemente incrementar la tasa de distribución del refrigerante.

El flujo en los tubos del evaporador son intermitentes y estratificado todo el tiempo, cabe mencionar que los radios en la tubería ayudan a la estratificación. [14].

---

<sup>5</sup>[14]

### 3.4 Factores de diseño de componentes que interactúan en la refrigeración.

---

Debido a que recientemente los precios de la energía aumentan, es necesario prestar mucha atención a la eficiencia energética, y este tema incumbe fuertemente a la refrigeración debido a que se producen en grandes cantidades refrigeradores domésticos y congeladores, a los cuales hay que hacer más eficientes, es el caso de un fenómeno que ocurre en cualquier refrigerador doméstico que funcione bajo el régimen de paro y arranque automático al llegar a cierta temperatura, tanto baja como alta. En este caso el desplazamiento de la carga al paro-arranque afecta al desempeño en forma negativa, hay una pérdida total en la eficiencia del 5 al 37% [16]

Un tema central en el desarrollo de refrigeradores domésticos es encontrar la capacidad adecuada del tubo capilar, tanto en diámetro como en desarrollo, así como la cantidad de carga.

Esto se debe lograr de tal manera que se consuma la menor cantidad de energía posible, normalmente estos parámetros son determinados en una etapa del desarrollo incorrecta, después de haber determinado el tipo de gabinete, intercambiadores de calor, y compresor, el cual es un método experimentalmente a prueba y error empleado por la mayoría de los fabricantes.

Debido a esta razón se realizó un estudio, a cerca de dispositivos de expansión, y se encontró que el consumo de energía tiene muy pocas combinaciones de dispositivos de expansión y cargas y ese mínimo fueron planas y anchas.

Con una carga muy baja, el evaporador incrementa el sobre calentado, con una carga muy alta la línea de succión se enfriará, en ambos casos nos llevará a un incremento de consumo de energía. En medio de estos extremos, el acumulador del evaporador suaviza la carga, dando como resultado un consumo de energía mínimo.

Con un dispositivo de expansión muy bajo, incrementará el sobrecalentamiento del evaporador, como resultado incrementará el consumo de energía. Por otra parte, si se selecciona un dispositivo de expansión alto el consumo de energía no cambiará, esto se debe al rápido proceso de redistribución que compensa una mayor pérdida de estrangulamiento o una condición del tubo de entrada que fue casi constante a pesar del incremento en la apertura de la válvula.

[9] encontró que a una temperatura ambiente alterada, la carga óptima aumentó a una temperatura ambiente baja, esto es debido a que el proceso de redistribución es más lento y por que en el aceite del compresor se encuentra contenido refrigerante a

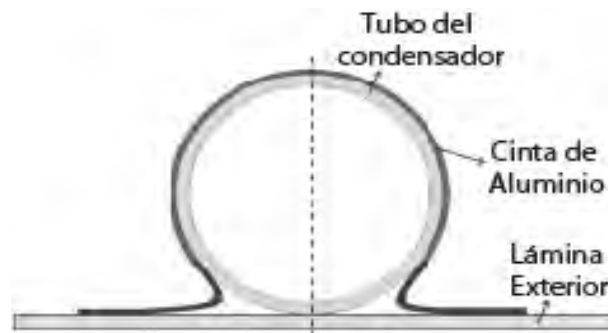
una menor temperatura que la del ambiente. Incrementando así la carga optima de refrigerante.

#### 3.4.4. Ensamblajes

La aplicación de la cinta adhesiva de aluminio ha encontrado su mayor aplicación en los condensadores de pared caliente, ya que se ha corroborado que el uso de cinta de aluminio en ensambles de gabinete interior y el desarrollo de tubería de evaporadores es de suma importancia en la transferencia de calor del condensador al ambiente elevando la eficiencia de esta transferencia. [12]

En la Figura 3.5 podemos observar el corte de un tubo donde se muestra la configuración de ensamblado.

**Figura 3.5.:** Ensamble tubo condensador-cinta aluminio-lámina exterior



6

#### 3.4.5. Selección de materiales

En un análisis de los efectos en la utilización de tubos con superficie mejorada y aplicación de tratamientos magnéticos en la condensación durante un ciclo de refrigeración, se observó que los efectos magnetohidrodinámicos influyen significativamente, arrojando que el coeficiente de transferencia de calor aumentó junto con el número de

---

<sup>6</sup>[12]

Reynolds, todo esto bajo tratamiento magnético. Concluyendo que existe una mejora en la condensación, sin embargo esto depende del tipo de refrigerante utilizado. [22]

### **3.5. Estudios aplicados al diseño del refrigerador y sus sistemas.**

#### **3.5.1. Espesor de capa de aire**

La convección natural es un fenómeno que ocurre frecuentemente durante la vida útil de un producto alimenticio, podemos encontrar dos tipos de equipo de refrigeración domésticos en el mercado, los estáticos y los ventilados, en el primer tipo de equipos de refrigeración la transferencia de calor se lleva a cabo por convección natural, y el flujo de aire es producido por la variación en la densidad del aire, estas variaciones están relacionadas principalmente por la temperatura y los gradientes de humedad, y el segundo tipo es por medio de un ventilador.

En un análisis sobre la convección natural en refrigeradores domésticos, se encontró que:

Se presentan capas de flujo laminares cerca del evaporador y de las paredes laterales.

Dentro de estas capas de flujo laminares cerca del evaporador existe una zona de pocos milímetros de ancho, en que la temperatura es menor a  $0^{\circ}\text{C}$  por lo tanto si se coloca alimento en esta zona es posible que se congele.

Fuera de estas capas laminares, el aire esta prácticamente estancado, esto significa que la circulación del aire se induce cerca del evaporador y de las paredes laterales, sin embargo en la parte central, donde es almacenada la comida hay corrientes de baja velocidad, que no garantiza la transferencia de calor por convección entre el aire y los productos.

La diferencia de temperaturas entre la parte superior y la posterior de un refrigerador puede ser estimada como la mitad del gradiente de temperatura entre las paredes laterales y el evaporador, se recomienda que la comida delicada no se coloque en el estante superior. [18]

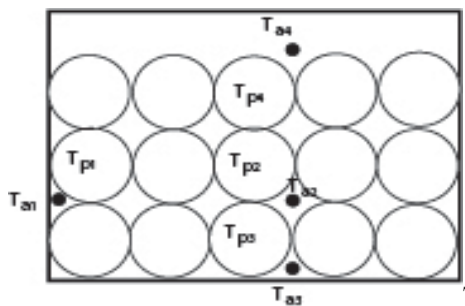
### 3.5.2. Diferencias de Temperaturas

Al almacenar comida en el congelador de un refrigerador, gradualmente genera cristales de hielo en la envoltura, este fenómeno ocurre cuando la temperatura de la superficie del producto es menor que la temperatura de rocío del aire circundante. El ciclo de encendido y apagado de los congeladores domésticos son los responsables de fluctuaciones de la temperatura en el aire, en paquetes y productos, además que hay una diferencia entre la amplitud de variación de la temperatura del aire y la del producto debido a la inercia térmica, esto lleva a la generación de escarcha, que a menudo es acompañada de deshidratación superficial de ciertos productos, esta deshidratación puede producir en el producto cambio de color, de sabor y destrucción del ácido ascórbico. [20]

Estudiando las características del refrigerador, las características del producto y el aislamiento del producto en refrigeración se realizó un análisis referente a la formación de escarcha en los alimentos, encontrando que:

Estudiando paquetes de comida, se distinguieron 2 regiones críticas. La región central, donde la variación de la temperatura es pequeña y la región de la base, donde la temperatura promedio es menor que la temperatura media. En la Figura 3.6 podemos observar la colocación de sensores que se utilizaron para el estudio en los paquetes de comida.

**Figura 3.6.:** Layout de colocación de sensores



---

<sup>7</sup>[20]

La conclusión del análisis de O.Laguerre y D. Flick, fue que existe una estratificación de temperaturas, y esto es posible identificarlo debido a la formación de escarcha que comienza a generarse en la parte inferior del empaque y en forma gradual se desplaza hacia la parte media en menor medida, esto nos muestra que en tanto la diferencia de temperaturas aumenta es mas factible encontrar escarcha. [19]

#### **3.5.3. Cuantificación de la transferencia de calor**

Debido a la gran demanda mundial y a la gran importancia que tiene la refrigeración en nuestros días, es preciso entender el comportamiento de la transferencia de calor, así como la circulación del aire en un refrigerador.

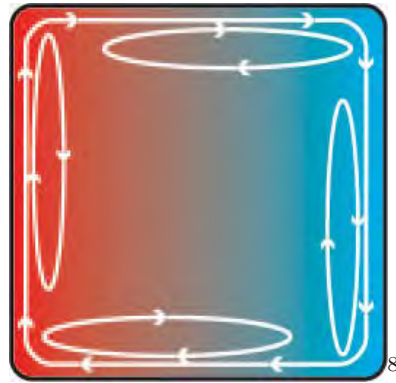
Para tener una cuantificación objetiva de los valor de transferencia de calor es necesario realizar estudios con el refrigerador vacío, con estantería, y cargado de productos.

El objetivo es cuantificar la temperatura y la velocidad de distribución del aire en el interior del refrigerador, en presencia de obstáculos como lo son la estantería y el producto mismo y realizar una comparación con la información obtenida del mismo estudio, pero con el interior del refrigerador vacío, y así será posible predecir que zonas son calientes y frías en un refrigerador, de ahí la importancia de estudiar la transferencia de calor y la circulación del aire.

Para poder estudiar la transferencia de calor y la circulación de aire se requiere puntualizar que el interior del refrigerador será equiparado con una cavidad vacía, ya que la circulación del aire por convección natural esta relacionada con la diferencia de temperatura en las paredes, como se presenta en la mayoría de los refrigeradores domésticos|. El evaporador esta integrado en la pared vertical posterior y la puerta que se encuentra enfrente presenta una temperatura mayor, la densidad del aire varía debido al gradiente de temperatura (perpendicular a la dirección de la gravedad) esto contribuye a la circulación del aire, el aire caliente es mas ligero que el frío. En la Figura 3.7 se muestra como circula el aire dentro de una cavidad cerrada. [23]



**Figura 3.7.:** Circulación en una cavidad cerrada

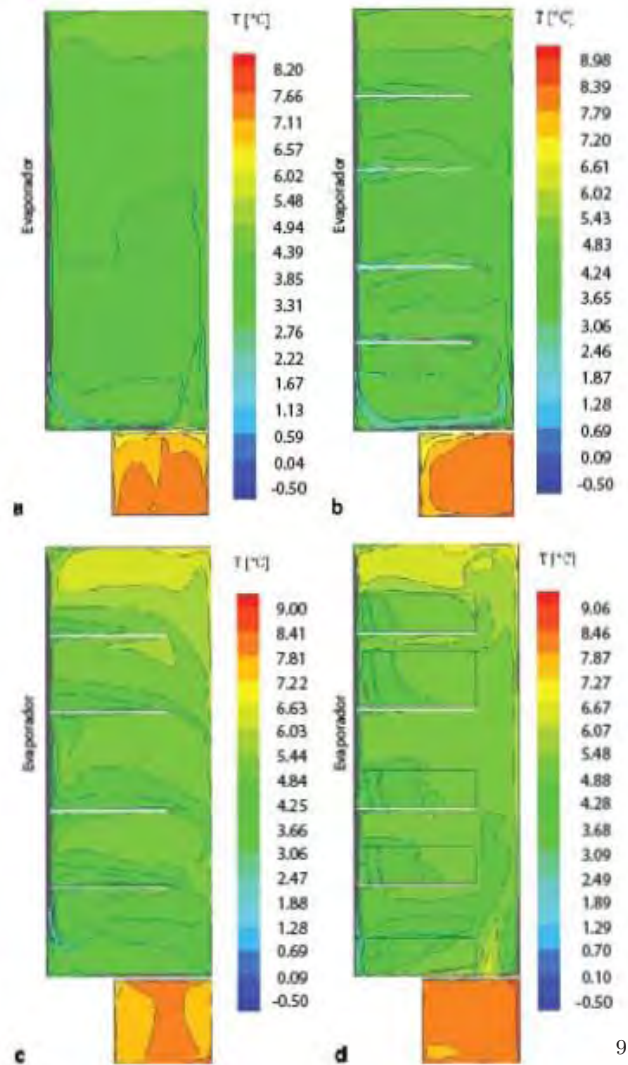


O. Laguerre y S. Ben Amara realizaron una simulación numérica, en tres configuraciones diferentes a cerca de un refrigerador, sin contenido en su interior, con estantería y cargado con producto, encontraron que los obstáculos (estantería/producto) disminuyen la circulación del aire en la zona central del refrigerador e influyen medianamente la circulación principal de aire a lo largo de las paredes, esto es confirmado por los valores máximos de temperatura registrados  $8.2^{\circ}C$  para un refrigerador sin estantería ni producto y  $9.1^{\circ}C$  en un refrigerador con producto y estantería. En la Figura 3.8 observamos los campos de temperatura.

---

<sup>8</sup>[23]

**Figura 3.8.:** Campos de temperatura( $^{\circ}C$ ): (a) vista de corte de un refrigerador sin contenido; (b) vista de corte de un refrigerador con estantes de vidrio; (c) vista de corte de un refrigerador cargado con producto; (d) vista de corte de un refrigerador cargado con producto a 8 cm de la pared

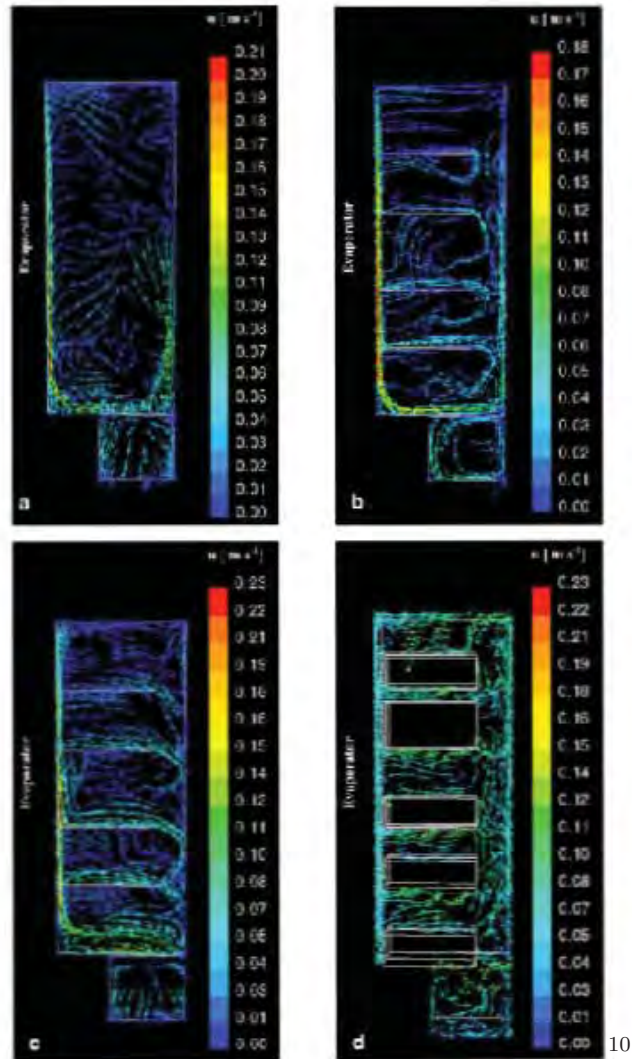


<sup>9</sup>[17]

Sin importar en cual de las tres configuraciones se encuentre el refrigerador (sin contenido en su interior, con estantes o cargado de producto) el aire que se encuentra en la parte superior del refrigerador será  $5^{\circ}C$  mas alta que la temperatura del aire promedio, es por eso que no se recomienda colocar alimentos delicados en el estante superior.

En el siguiente diagrama observaremos la velocidad del flujo de aire al interior del refrigerador, en la cavidad principal, excluyendo la caja de vegetales, en las tres configuraciones de estudio. Para todos los casos, se puede observar la principal circulación de aire cerca de las paredes, creando bucles de recirculación. El aire circula hacia abajo a lo largo del evaporador mientras que su velocidad va incrementando conforme se acerca a la base del refrigerador, llegando a su valor máximo en esta zona del refrigerador ( $u_{max} \approx 0.2ms^{-1}$ ) posteriormente, el aire fluye hacia arriba a lo largo de la puerta y de las paredes, mientras que su velocidad decrece progresivamente hasta que se estanca en la parte superior del refrigerador. Esta observación concuerda con los campos de temperatura vistos en el Diagrama 3.8 anterior con aire frío en la base y caliente en la parte superior. También se puede observar que existe un flujo de aire horizontal muy débil de la puerta al evaporador, la velocidad del aire en el centro de la cavidad es muy pequeña ( $< 0.04ms^{-1}$ ) como se observa en la Figura 3.9[17]

**Figura 3.9.:** líneas de trayectoria: (a) vista de corte de un refrigerador sin contenido; (b) vista de corte de un refrigerador con estantes de vidrio; (c) vista de corte de un refrigerador cargado con producto; (d) vista de corte de un refrigerador cargado con producto a 8 cm de la pared



10

<sup>10</sup>[17]

#### **3.5.4. Deterioro de sellos**

La velocidad del intercambio de calor en lugares cerrados o almacenados de cualquier sistema de refrigeración interactúa con varios factores como las ganancias obtenidas del calor sensible y latente que obtienen de productos perecederos almacenados en su interior, el calor transferido a través de las paredes, y por último el calor transferido asociado a la infiltración de aire. Todas estas ganancias deben ser retiradas por el evaporador del sistema de refrigeración. Mientras mas sea la ganancia de calor mas será el consumo de energía por el compresor.

La transferencia de calor por infiltración de aire ocurre generalmente a través de los sellos magnéticos de las puertas, estos no pueden ser herméticos, si no sería imposible abrir la puerta debido a la diferencia de presión que existe tanto en el interior como en el exterior del refrigerador. Debido al uso frecuente del refrigerador, los sellos magnéticos comienzan a desgastarse perdiendo así su capacidad de sellado permitiendo la filtración de aire, podemos encontrar varias causas a las que se deben las filtraciones de aire como lo son la perdida de la capacidad magnética de la banda, grietas en el hule del sello, cochambre adherido.

Para cuantificar la velocidad con la que se infiltra el aire, Alfonso, CFA y Maldonado utilizaron la técnica del gas indicador. y para tener una mejor idea de cuanto es que afecta al rendimiento eléctrico, se realizaron pruebas, utilizando el mismo refrigerador, en una prueba se mantuvo el sello deteriorado, mientras que en la otra se remplazo por uno nuevo, se midió la energía consumida por el compresor en ambos casos para poder relacionarlo así a través del COP.

El método del gas indicador consiste en introducir una cierta cantidad de un gas conocido donde se quiere medir la infiltración del aire, y medir la concentración indicada con respecto al tiempo, mediante un analizador apropiado de gas. [1]

El análisis experimental arroja la Tabla 3.2

**Tabla 3.2.:** Tabla comparativa de Coeficientes de Desempeño en relación al estado de los sellos magnéticos.

Elementos	Uso de Energía (COP)			
	Prueba sellos nuevos (Wh)	Prueba sellos viejos (Wh)	Diferencia (%)	
$W_{compresor}$	45.5	63.7	40	11
$Q_{util}$	Infiltración	3.29	19.9	506
	A través de paredes	89.0	87.7	-1.5
$COP = \frac{Q_{util}}{W_{compresor}}$	2.03	1.69	-17	

El incremento de la infiltración del aire debido al deterioro del sello magnético de la puerta es de un 505 % en el equipo probado, que refleja un consumo de energía por el compresor que mostrando un incremento del 341 % en energía consumida. Cuando los sellos son nuevos se consume el 3.6 % en energía para el uso del compresor debido a la infiltración del aire y el 96.4 % restante se gana a través de las paredes, cuando el sello magnético comienza a deteriorarse la energía consumida por el compresor debido a infiltraciones de aire aumenta a 18.5 % mientras que a través de las paredes disminuye a 81.5 %. [2]

### 3.5.5. Materiales de cambio de fase

Controlar la temperatura en diferentes ambientes es importante durante la transpor-tación y el almacenaje de productos perecederos, como los alimentos o medicinas. Muchos de estos productos necesitan permanecer a temperaturas bajas, la fluctuación de la temperatura puede ser contraproducente, afectando la calidad del producto. Es por eso que la refrigeración juega un rol importante en la preservación de alimentos a temperaturas bajas, mantener la temperatura estable en la transportación y alma-cenaje de comida como la carne o los helados se complica cuando hay fluctuaciones de temperatura por cargas en el sistema, estas cargas pueden provenir de infiltración de temperatura por las paredes, del sistema de deshielo, y también de la infiltración

<sup>11</sup>[1]

del aire debido a la apertura de puertas, que permite la entrada de aire caliente al sistema, sin contar que la apertura de puertas genera un incremento en el consumo de energía. Muchas de estas cargas de temperatura son inevitables y para ello es necesario un método para disminuir estas fluctuaciones de temperatura.

Los materiales de cambio de fase son capaces de reducir las fluctuaciones en la temperatura, y hasta ahora han sido aplicados con éxito en el área de la construcción. Se ha encontrado que la adición de materiales de cambio de fase en un evaporador reduce el número de ciclos de encendido/apagado aumentando del 5-15 % del coeficiente de desempeño (COP).

Fuqiao Wang y Graeme Maidment probaron colocar intercambiadores de calor con materiales de cambio de fase en diferentes partes del refrigerador en su interior, así como también entre el condensador y el compresor, entre la válvula de expansión térmica estática y el condensador, y finalmente entre el evaporador y el compresor. Con materiales de cambio de fase mejora el COP 6 - 8 %. [24]

Los estudios de Fuqiao Wang y Graeme Maidment han mostrado un incremento en el COP debido a que se lograron cambios en la temperatura del evaporador y el condensador por la inclusión de materiales de cambio de fase en el sistema del refrigerador.

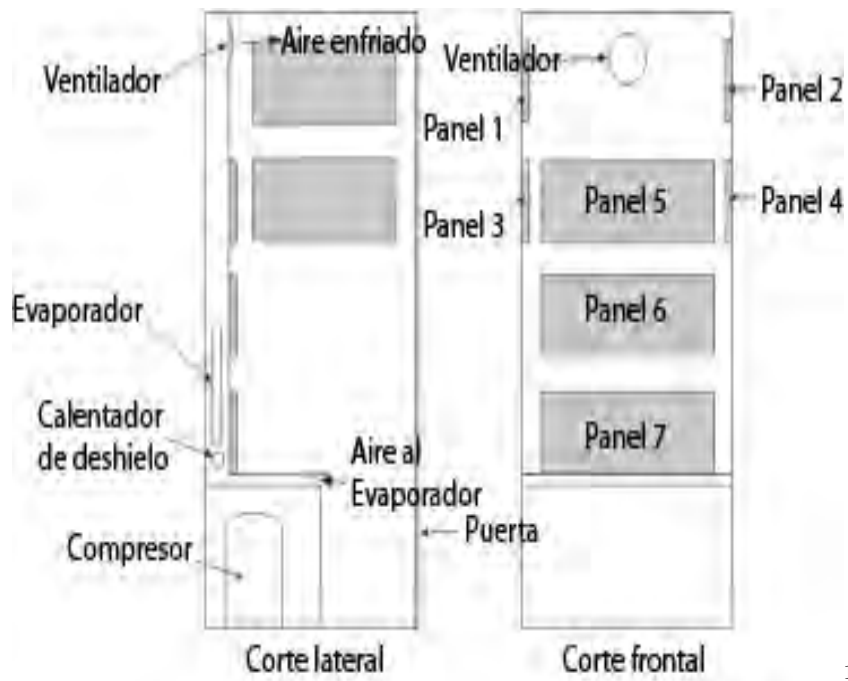
Se utilizó un congelador vertical, el cual dimensionalmente no tiene diferencia sustancial entre un refrigerador doméstico, sin embargo no es así en su comportamiento termodinámico, debido a que maneja diferentes cargas de refrigerante, rangos de temperatura, y distribución de componentes, sin embargo decidí integrarlo al trabajo, debido a que los resultados arrojados por el estudio pueden ser aplicados a un refrigerador domestico.

Al equipo se le realizaron modificaciones para introducirles cargas térmicas a través del sistema de deshielo y aperturas de puerta automáticamente, el ciclo de deshielo es de 30 minutos y diferentes configuraciones de aperturas de puerta.

Se utilizo una solución acuosa de cloruro de amonio, con una temperatura de fase de cambio de  $-15.4^{\circ}C$ . La capacidad de almacenar temperaturas por largos periodos de los materiales de cambio de fase permiten absorber y liberar grandes cantidades de energía en rangos pequeños de temperatura, lo cual es benéfico en aplicaciones de regulación de temperatura, se utilizaron paneles contenedores de aluminio anodizado para contener la solución, colocando siete de estos paneles en las paredes del equipo,

abarcando en total un 26 % del área de las paredes y un 3 % del volumen de la cavidad del equipo. La distribución de los paneles se puede ver en la Figura 3.10

**Figura 3.10.:** Esquema del congelador vertical mostrando la ubicación del evaporador, calentador de deshielo y la distribución de los paneles



12

---

<sup>12</sup>[11]



**Tabla 3.3.:** Resultados de la energía consumida

	Prueba 1: Operación normal	Prueba 2: Deshielo	Prueba 3: Aperturas de puerta	
Sin materiales de cambio de fase				
Consumo de energía (Wh/24h)	1187	1502	1428	13
Temperatura promedio del congelador (°C)	-16.6	-17.1	-17.1	
Con materiales de cambio de fase				
Consumo de energía (Wh/24h)	1173	1380	1323	
Temperatura promedio del congelador (°C)	-16.6	-17	-16.6	

El estudio muestra que el aplicar paneles con materiales de cambio de fase fue benéfico para el congelador vertical, minimizando las variaciones de temperatura. El análisis del desempeño durante el deshielo mostró que los paneles con materiales de cambio de fase ayudan a limitar los picos de aire y las temperaturas alcanzadas por el producto (respectivamente  $2.9^{\circ}C$  y  $1^{\circ}C$  menos con Paneles con materiales de cambio de fase) con un ciclo de deshielo de 30 minutos. El efecto positivo de los materiales con cambio de fase es limitar la velocidad en el incremento de temperatura, esto lo podemos observar durante el deshielo y cuando sucede un paro en la energía, porque los materiales de cambio de fase proveen la mejor fuente de enfriamiento cuando el compresor esta apagado.

Las pruebas de consumo de energía mostraron que el consumo de energía incrementa un 11-17 % y 15-21 % respectivamente resultado de la apertura de puerta . La inclusión de los materiales de cambio de fase disminuyeron el consumo de energía durante el ciclo de deshielo un 8 % y un 7 % durante la apertura de puerta.[11]

### 3.5.6. Consumos Innecesarios

La eficiencia energética de los refrigeradores domésticos a recibido considerable atención debido a que Dorantes Rodríguez Rubén estudió que en el hogar, en México el consumo de hasta el 50 % de la energía total es debido al refrigerador.

<sup>13</sup>[11]

Es por esto que hoy día, en el mercado es posible encontrar refrigeradores inteligentes, ya que se ha desarrollado tecnología en busca de mejorar energéticamente al refrigerador domestico, entre estos avances podemos encontrar, sensores de temperatura, alarmas de puerta, sistemas de deshielo, almacenador de datos.[10]

Esta búsqueda por mejorar energéticamente al refrigerador es motivada por parte de órganos de gobierno internacionales para incrementar la eficiencia utilizando esta tecnología. Por ejemplo, en México existe un programa desde el 2009, en el cual, el gobierno subsidia el 50 % del costo de un refrigerador nuevo, a cambio de un refrigerador viejo y el resto, se podrá pagar a crédito, esto con el afán de ahorrar en consumo energético.

Es por esta búsqueda de innovación tecnológica aplicada al incremento en la eficiencia de refrigeradores que se han hecho estudios en muchas áreas, incluyendo la del sistema de deshielo, el cual se ha automatizado, para remover la escarcha del evaporador antes que sea notable la disminución en su rendimiento. [7]

Usualmente se utiliza un calentador eléctrico que funciona por radiación y es controlado por un termostato y un temporizador para derretir periódicamente la escarcha. La temperatura requerida para derretir la escarcha esta determinada por la cantidad de escarcha acumulada en el evaporador y su temperatura.[3]

El estudio analizó la distribución de energía en el deshielo dentro del refrigerador y cuantifico los efectos del deshielo en relación al consumo de energía, de los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones.

Comparando entre una escarcha mínima y 500 g de escarcha muestran que bajo condiciones normales de uso, se consumirá menos energía si se utiliza un sistema de deshielo automático.

Las pruebas del calentador de deshielo muestran que el deshielo por radiación puede no ser la mejor opción a usar, debido a que la temperatura que alcanza este calentador por radiación es innecesariamente alto para derretir la escarcha del evaporador pudiendo alcanzar los 500 °C dentro del refrigerador.

Un congelador con 500 gr de escarcha y un ciclo normal de deshielo por medio de una resistencia eléctrica consumirá cerca de 30 %. Mientras que se incrementa el 17.7 % de energía consumida para derretir un mínimo de escarcha en un ciclo de deshielo automático.

Dado los resultados anteriores, se propone colocar un calentador sobre el evaporador

### 3.5 Estudios aplicados al diseño del refrigerador y sus sistemas.

---

que use menos energía y por supuesto menos temperatura, esto contribuirá directamente al deshielo sin radiar energía a otros componentes dentro del refrigerador.[8]

Un factor importante que en pocas ocasiones no se valora, es la desinformación, en la mayoría de los equipos se puede encontrar un manual del usuario, en el que podemos encontrar entre otras muchas cosas, la temperatura recomendable de uso, sin embargo es difícil plantear un temperatura standard recomendable, debido a que todos los alimentos son diferentes y por supuesto, cada usuario tiene diferentes necesidades de uso. En una revisión histórica en los datos de refrigeradores domésticos en relación a su rendimiento, se menciona que una gran cantidad de refrigeradores funcionan por arriba de las temperaturas recomendadas. [15]

## 4. Metodología.

En este capítulo se presentarán dos propuestas para mejorar la eficiencia de un equipo de refrigeración, la primer propuesta se dirige al usuario final quien mediante la aplicación de la siguiente metodología podrá mejorar la eficiencia de su equipo de refrigeración.

Dado que los equipos de refrigeración funcionan bajo un diseño establecido, es complicado alterar las condiciones del equipo de fábrica, sin embargo se presentarán recomendaciones al usuario, es importante señalar de esta manera que es posible mejorar la eficiencia del equipo de refrigeración con el que se cuenta en casa alterando lo menos posible el diseño original.

La segunda propuesta esta enfocada al diseño mismo del equipo casero, mediante la implementación de paneles tanto de aislamiento como de absorción de temperatura ambos a partir de estudios realizados por diferentes empresas e investigadores en el área de almacenamiento de energía térmica. Los materiales propuestos se seleccionan de acuerdo a sus mejores características técnicas especificadas por los fabricantes. Al mismo tiempo se propone la incorporación de componentes específicos de alto desempeño basándose en las condiciones deseadas de operación.

Tanto en la propuesta dirigida al usuario, como la propuesta enfocada al diseño del equipo se quiere mejorar la eficiencia del equipo de refrigeración en el hogar, implementando paneles de aislamiento al vacío, paneles de materiales de cambio de fase, compresor de velocidad variable, aire forzado a diferencia de un equipo de refrigeración convencional, el cuál no cuenta con las implementaciones propuestas atacando tanto el diseño como el uso del equipo.

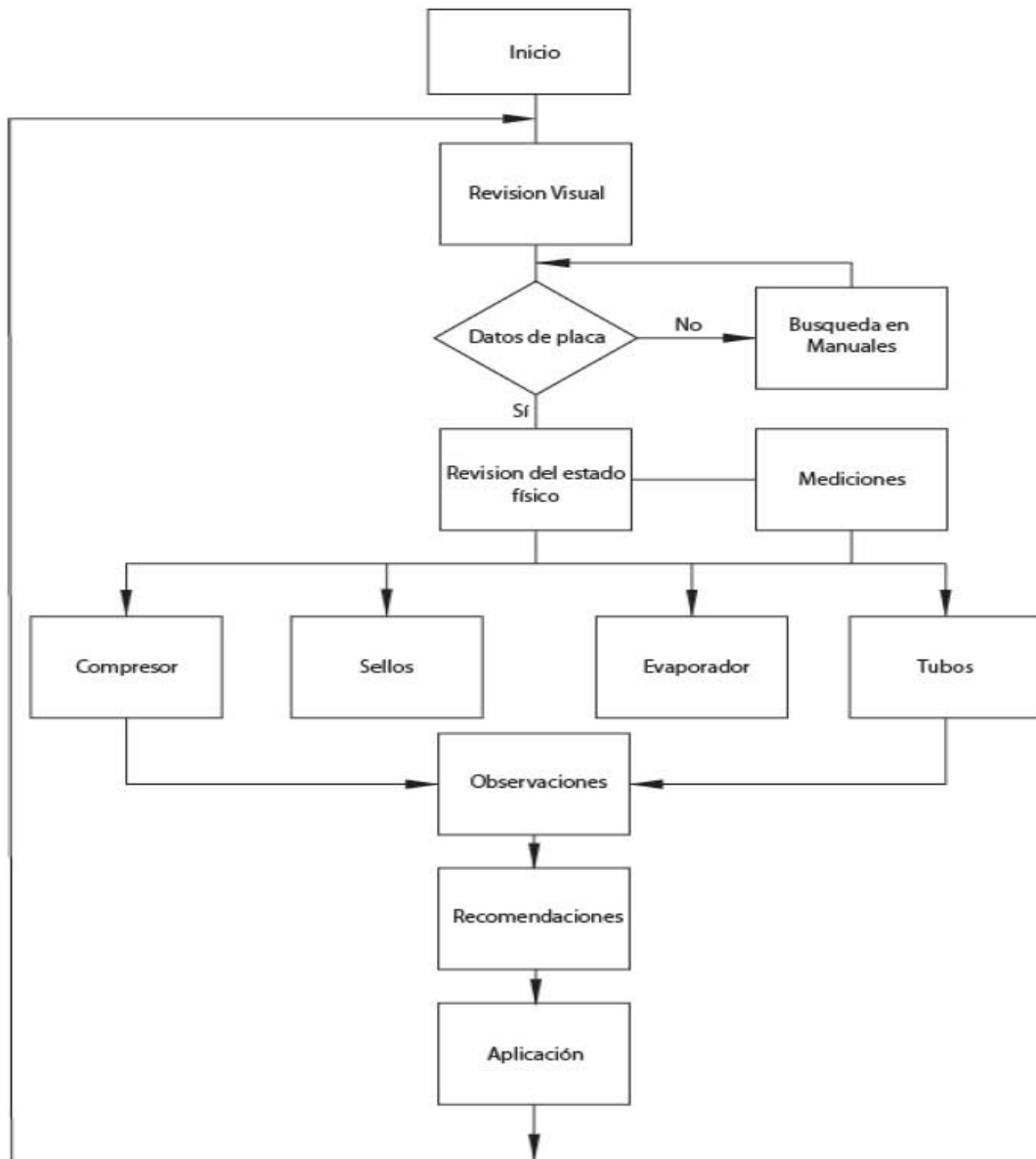
Se utilizaran tablas de revisión visual para observar las características técnicas y estado del refrigerador convencional

### **Descripción.**

Para establecer una metodología para mejorar la eficiencia de un equipo de refrigeración, es necesario realizar una evaluación general del equipo, para determinar en que condiciones se encuentra el equipo, físicamente como termodinámicamente, empezaremos por realizar una inspección visual donde observaremos características y comportamientos tanto de componentes del equipo de refrigeración, como del equipo, en seguida recopilaremos la información técnica del equipo, con esta información se enlistaran las características específicas con las que cuentan los componentes del equipo de refrigeración. Posteriormente con los datos obtenidos, podremos realizar un análisis donde podremos observar las primeras opciones de mejoras, que nos arrojará un plan de acción, así mismo es necesario diseñar un programa de mejoramiento, en este programa se establecerán las necesidades de cambio y se clasificarán las mejoras de acuerdo al equipo, inmediatamente es necesario implementar cada uno de los cambios antes visualizados, llevando un control de las variables para verificar que se lleven a cabo de acuerdo a lo establecido en el programa, no debemos olvidar que nuestro proceso no termina en la implementación ya que es necesario tener un monitoreo continuo a cerca del comportamiento del equipo de refrigeración, debido a que esto nos dará una retroalimentación muy valiosa y al final nos arrojará si nuestro programa es el indicado para el equipo.

Para comprender mejor la secuencia que se seguirá en esta propuesta de mejora en la eficiencia de un equipo de refrigeración se atenderán los pasos del siguiente diagrama.

Diagrama 4.1.: Diagrama de la Metodología



## **4.1. Revisión visual**

En esta inspección se buscará encontrar información cualitativa respecto a los componentes de nuestro refrigerador, tipo de evaporador, compresor, si cuenta con deshielo, condición de sellos magnéticos, localización del refrigerador, temperatura de funcionamiento, condición del condensador, distribución de los artículos en el interior del equipo de refrigeración en cuestión.

Para obtener estos datos de una manera más simple utilizaremos la siguiente tabla de revisión visual en la que al llenarla con los datos del equipo de refrigeración, obtendremos información necesaria para llevar a cabo posteriormente un análisis del equipo de refrigeración.

Tabla 4.1.: Tabla de Revisión Visual



# Revisión Visual

Modelo del equipo		Fecha		
xxxxxx		xx/yy/zz		
Condiciones Generales				
Capacidad del equipo	xxxxxxxxxxxxx dm <sup>3</sup>			
Condiciones de Operación	xxxxxxxxxxxxx			
Unidad Condensadora				
Tipo de Compresor	Piston	Tomillo	Rotativo	Scroll
	x	x	x	x
Condensador	xxxxx			
Motor	Sí	xxxxxxxxx	No	xxxxx
Unidad Evaporadora				
Evaporador	xxxxxxxxxxxxx			
Motor	Sí	xxxxxxxxx	No	
Consumo eléctrico				
Consumo de Energía	xxxkWh/año			
Volts/Recuencia/Fases	xxxxxxxxxxxxx			
Amperes	xxxxxxxxxxxxx			
Carga	xxxxxxxxxxxxx			
Refrigerante	xxxxxxxxxxxxx			
Sistema de deshielo	Sí	No	Cual?	
	x	x	xxxx	
Estado de sellos	Bueno		Malo	
	x		x	
Fugas	Sí		No	
	x		x	
Acumulación de escarcha	Sí		No	
	xxxx		xxxx	
Ubicación del equipo	Buena		Mala	
	x		x	
Observaciones	xx			
Elaboró	xxxxxxx			



## 4.2. Recopilación de información técnica del equipo de refrigeración

Todo equipo electrodoméstico al adquirirse cuenta con una ficha técnica, en esta ficha podemos encontrar toda la información técnica del equipo, como lo es el voltaje a que trabaja, la corriente eléctrica, la frecuencia, el refrigerante que es utilizado, así como su carga de refrigerante, consumo de energía, así como de sus componentes mas importantes y que requieren de nuestra atención porque afectan directamente el desempeño del equipo. A continuación se enlistaran los componentes que se deben considerar:

### **Compresor**

Como se mencionó en el capítulo anterior es importante seleccionar correctamente el compresor debido a que existe una relación entre el diseño del compresor y el refrigerante, que repercute en las condiciones de uso, ver Tabla 3.1 además que nos dará el consumo eléctrico.

### **Condensador**

En el mercado podemos encontrar dos tipos de condensadores, los que se encuentran al exterior del equipo o los condensadores antes mencionados de pared caliente.[5]

### **Deshielo automático**

Existen en el mercado diferentes tipos de deshielo, sin embargo en general la mayoría funcionan con resistencias eléctricas, como lo analizaron Pradeep Bansal y David Fothergill concluyendo que hay sistemas de deshielo que consumen más electricidad y nos dejan menos beneficios que el deshielo mismo. [8]

### **Evaporador**

Para conocer como se lleva a cabo la circulación del aire al interior del equipo de refrigeración es necesario saber si la circulación de aire es forzado (propiciada por un motor) ó es natural.

### 4.3. Revisión del estado físico de los componentes del equipo.

Ya que conocemos los datos proporcionados por el fabricante, es necesario revisar como es el funcionamiento de cada uno de los componentes que hacen posible que el equipo de refrigeración retire el calor de su interior, como es natural, todos los componentes están expuestos al desgaste natural, debido a su funcionamiento y a las condiciones de trabajo, es por esto que es importante revisar como es su estado físico, ya que si se encuentran deteriorados es posible que esto afecte la eficiencia del equipo de refrigeración.

### 4.4. Observaciones

En este paso tendremos claramente que componentes tienen un comportamiento no adecuado para fines de mejoramiento en el rendimiento del equipo de refrigeración, y es preciso tener en cuenta cuales son para poder generar un criterio y comenzar con las recomendaciones para solucionar el problema presente.

**Tabla 4.2.:** Tabla de Observaciones

Componentes	Observaciones
Compresor	ruido excesivo, no trabaja correctamente.
Evaporador	escarcha excesiva, daño a la tubería, fuga.
Condensador	tiene polvo y pelusa, pegado a la pared, daño a la tubería, fuga.
Localización	equipo cerca de fuentes de calor, mal nivelado.
Puerta	mal cerrada, sellos magnéticos dañados, descuadrada.

## 4.5. Recomendaciones

Con las observaciones realizadas, y los estudios antes referenciados podremos hacer recomendaciones de como atacar las propuestas para mejorar la eficiencia del equipo de refrigeración como lo es el deshielo manual debido a que el consumo energético aumenta considerablemente al ser utilizados sistemas de deshielo automático por resistencia eléctrica.

La selección del refrigerante a utilizar también requiere de especial atención, debido a que México tiene el compromiso ante el Protocolo de Montreal, la eliminación del 100 % de consumo de CFC's (Clorofluorocarbonos) al año 2010, sin embargo esta no es nuestra realidad, aun existen muchos equipos de refrigeración doméstica y comercial, así como de aire acondicionado que contienen CFC's (Clorofluorocarbonos) a pesar que desde el año 2005 ya no se producen en México estas sustancias.

Hasta ahora existe un procedimiento para deshacerse de los gases CFC's y es por medio de la incineración, por medio de Hidrógeno, que genera Ácido Clorhídrico y Ácido Hidrofluorico y Metano, estos subproductos pueden fácilmente manipulados. Ambos procedimientos aun no se desarrollan en México. (Ver Anexo).

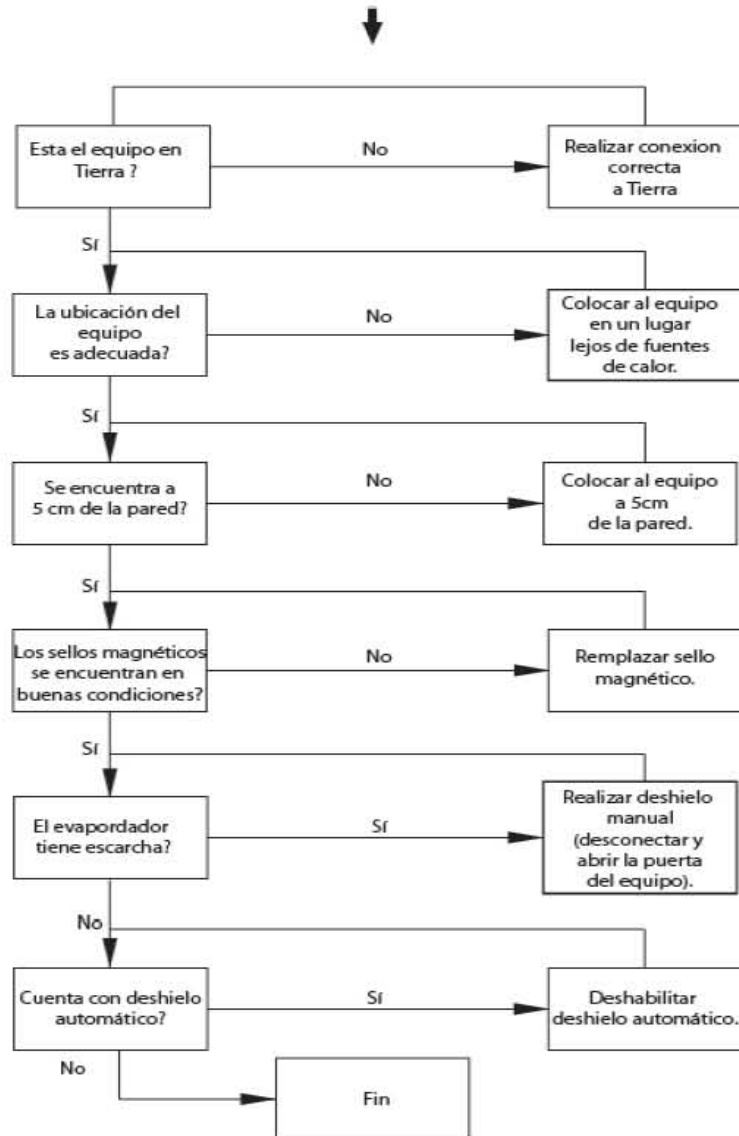
Es por esta razón que otra de las recomendaciones es si se cuenta con un refrigerador con diez a mas años de uso, se busque ser beneficiario del programa de sustitución de equipos electrodomésticos para ahorro de energía, que ofrece el gobierno Federal "Cambia tu viejo por uno nuevo". Esta última recomendación es bajo el criterio unicamente de obtener un equipo de refrigeración con menos consumo eléctrico y sobre todo con un refrigerante menos nocivo para el medio ambiente, sin considerar el aspecto económico que este programa conlleva.

Para cerrar estas recomendaciones seguiremos un programa de mejoramiento el cual menciono enseguida:

### **Programa de mejoramiento**

Para realizar el programa de mejoramiento se usará el siguiente Diagrama 1.2, donde se observará paso a paso que requiere de nuestra atención y como resolverlo para incrementar la eficiencia del equipo de refrigeración, el diagrama va dirigido principalmente para el usuario del equipo de refrigeración, ya que la secuencia de pasos, así como la resolución de estos son sencillos y directos para que el usuario pueda llevarlos a cabo sin necesidad de utilizar herramienta alguna; cabe mencionar que a pesar de que este programa esencialmente va dirigido al usuario, también es importante recalcar que no solamente el usuario puede hacer uso de este, ya que la información y estudios previamente referenciados pueden ser utilizados por el ingeniero de producto para tener un mejor panorama al diseñar un equipo de refrigeración, como es el caso del empleo de materiales con cambio de fase, ya que se ha comprobado el incremento de la eficiencia al ser utilizados dentro del equipo de refrigeración.

Diagrama 4.2.: Diagrama del Programa de mejoramiento.



### **4.6. Aplicación**

Mediante el diagrama anterior del programa de mejoramiento aplicaremos lo teóricamente analizado en los capítulos anteriores, el usuario seguirá los pasos hasta mejorar la eficiencia de su equipo de refrigeración, es necesario remarcar que los cambios realizados por el usuario son los permitidos por el diseño original del equipo.

#### **Monitoreo de resultados diagnósticos**

El monitoreo de los resultados en las modificaciones del equipo de refrigeración nos retroalimentara como se comporta nuestro equipo de refrigeración con las modificaciones, dictándonos si nuestro programa de mejoramiento es el indicado, o si es necesario suprimir algún paso o enriquecerlo, o simplemente tener un registro del comportamiento del equipo, todo con el fin de mejorar nuestro programa de mejoramiento.

### **4.7. Caso Práctico**

La metodología explicada en este capítulo, se aplicó con fines de evaluación a un equipo de refrigeración doméstico, el equipo de refrigeración al cuál se aplicó la metodología es marca “SANYO” modelo SR-4432SM 2007.

Siguiendo el diagrama de análisis del equipo de refrigeración, se tabuló la revisión visual para obtener todos los datos técnicos y así comenzar con el análisis del equipo. En la Tabla 1.3 podemos observar el ejemplo de uso de la Tabla de Revisión equipo: SANYO SR-4432SM 2007.

Tabla 4.3.: Tabla de Revisión Visual



## Revisión Visual

Modelo del equipo		Fecha		
Sanyo SR-4432SM		09/02/2012		
Condiciones Generales				
Capacidad del equipo		124.59 dm <sup>3</sup>		
Condiciones de Operación		24.9°C Humedad relativa 59.6%		
Unidad Condensadora				
Tipo de Compresor	Piston	Tornillo	Rotativo	Scroll
	x			
Condensador		Pared caliente		
Motor		No		
Unidad Evaporadora				
Evaporador		Placa y tubo		
Motor		No		
Consumo eléctrico				
Consumo de Energía		335 kWh/año		
Volts/Frecuencia/Fases		120/60/2		
Amperes		0.9 A		
Carga		1.9 Oz		
Refrigerante		R-134a		
Sistema de deshielo	Sí	No	Cual?	
	x	-	manual	
Estado de sellos	Bueno		Malo	
	-		x	
Fugas	Si		No	
	x		-	
Acumulación de escarcha	Sí		No	
	x			
Ubicación del equipo	Buena		Mala	
	-		x	
Observaciones	El refrigerador se encuentra junto a la estufa, el sello magnético es demasiado flojo, el evaporador cuenta con escarcha			
Elaboró	M. Alberto González Sepúlveda			

### **Observaciones**

Las observaciones encontradas en el equipo de refrigeración son las siguientes:

El equipo de refrigeración se encuentra en un lugar inadecuado, debido a que se encuentra a un costado de la estufa, lo cuál incrementa la penetración de calor al interior del equipo de refrigeración produciendo que el compresor trabaje más tiempo de lo previsto en el diseño del equipo.

El Evaporador esta cubierto por escarcha, esto reduce la eficiencia del equipo, debido a que el evaporador ya no absorbe la misma cantidad de calor debido a que la escarcha no permite que la transferencia de calor sea igual, produciendo que el compresor trabaje por mas tiempo.

Los sellos magnéticos están flojos, esto produce que penetre calor mas fácilmente al interior del equipo.

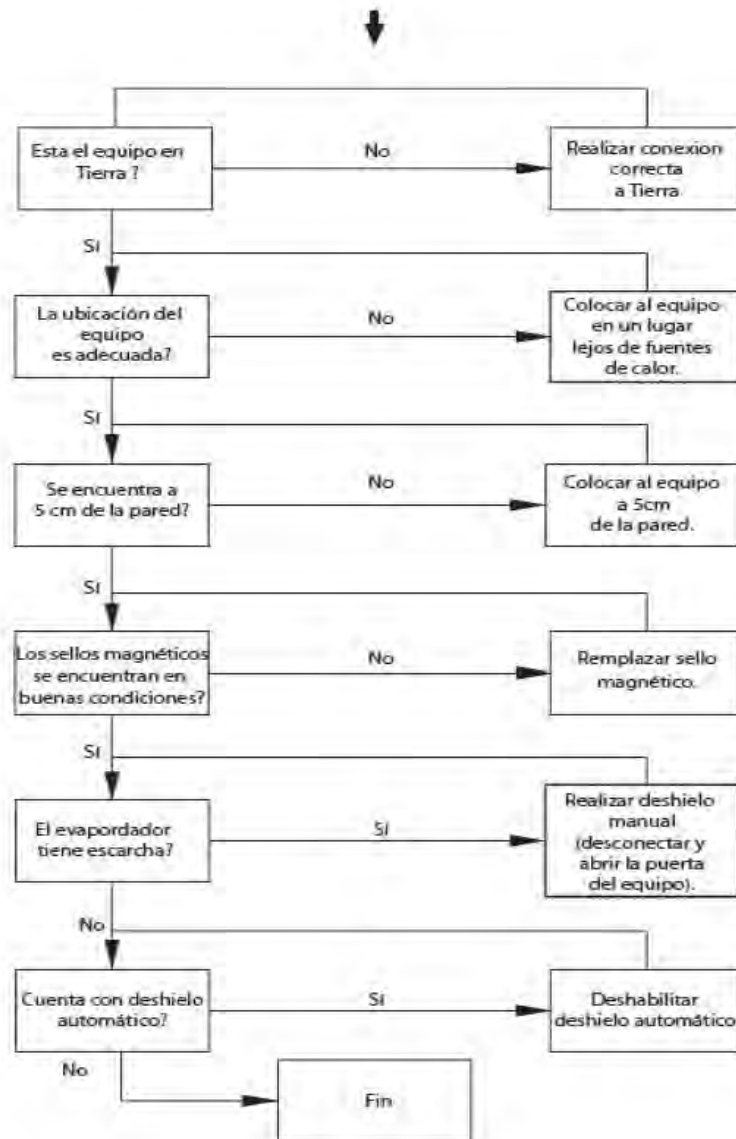
### **Recomendaciones**

- Se le recomienda mover el equipo lo mas lejos posible de la estufa, debido a que es el área mas caliente de la cocina y esta produce penetración de calor al interior del equipo de refrigeración.
- Observar cuál es la causa del estado del sello magnético, en este caso, el sello magnético está parcialmente flojo, debido a que en cierto punto de la puerta se zafó el sello magnético del marco, la recolocación del sello requiere de presionar el sello contra el marco hasta que este embone.
- Colocar el control de temperatura en deshielo y abrir la puerta del equipo de refrigeración, hasta que este completamente libre de escarcha el evaporador.

Las recomendaciones las tomaremos del siguiente diagrama.



## 4.7 Caso Práctico



### **Implementación de componentes**

Observamos en la metodología anterior que el usuario puede verificar si su equipo no esta trabajando eficientemente, como el usuario puede localizar fácilmente la fuente de la causa y como solucionarla, sin embargo no se busca alterar el diseño de fábrica, es por ello que se realizó una segunda propuesta que a diferencia de la primera va dirigida al diseño del equipo de refrigeración proponiendo la implementación de componentes los cuales se observa tienen características específicas para el ahorro de energía, se mencionan de manera ascendente en relación a la posibilidad real de implementarlo en una línea de producción en México debido a los altos costos de los materiales con que se fabrican, la tecnología necesaria para conformarlos y la ausencia de una normatividad que regule su uso.

### **Compresor de capacidad variable**

Debido a que el compresor consume la mayor cantidad de energía en un equipo de refrigeración, es el responsable de más del 80% del consumo total de energía, es necesario implementar el uso de compresores de capacidad variable, el compresor por si mismo tiene mejor eficiencia debido a que se ajusta a la capacidad de refrigeración en relación a la carga controlando la velocidad del compresor ahorrando hasta el 40% de energía. [4]

La empresa Embraco cuenta con la línea VEM utilizados unicamente para uso doméstico, opera con los refrigerantes: R-134a y R-600a a 115 V, 50 Hz y el rango de rotación es de 1600 a 4500 RPM. teniendo una capacidad de 45 kcal/h y una eficiencia de 1.33 kcal/Wh

### **Control electrónico y aire forzado**

Anteriormente la distribución del flujo de aire era realizado de manera natural, es decir debido a la acción de la gravedad, el evaporador que se localiza en la parte superior del equipo retira el aire caliente que se encuentra en esa zona debido a que el aire con menos densidad es el mas caliente por lo tanto tiende a subir dentro del equipo, al mismo tiempo el aire mas frío desciende completando así el ciclo del flujo de aire. No es el caso así del aire forzado, que distribuye el flujo del aire dentro del equipo por medio de un motor eléctrico, se propone utilizar un motor eléctrico Wellington con control electrónico integrado, opera con dos velocidades una para el día y otra para la noche, reduciendo el consumo de energía, también puede cambiar el sentido de rotación para

el ciclo de deshielo, manteniendo los tubos del condensador limpios y mas eficientes. El rango de temperatura de operación es de  $-30^{\circ}C$  a  $50^{\circ}C$ , el rango de voltaje es de  $100V$  a  $127V$ .

Para complementar de manera eficiente la propuesta del uso de aire forzado para la distribución del flujo de aire se propone la implementación de un control electrónico para reducir el consumo de energía. El control electrónico Ako controlará el encendido del motor ventilador encendiéndolo cuando el compresor entre en funcionamiento y apagándolo cuando se este en ciclo de deshielo ó cuando se abra la puerta del equipo.

### **Paneles de materiales de cambio de fase**

Los materiales de cambio de fase tienen capacidad para almacenar frío o calor y es posible aprovechar esta característica para estabilizar la temperatura dentro de un compartimento como lo es un refrigerador reduciendo los efectos de cargas máximas y pérdidas de frío durante periodos de apertura de puerta.

Los materiales de cambio de fase que se utilizan para aplicaciones de refrigeración son los de cambio de estado de sólido a líquido o viceversa debido a que la energía absorbida o liberada es más estable que en cualquier otro estado. Partiendo de esto, los materiales de cambio de fase se dividen en soluciones orgánicas o inorgánicas, soluciones eutécticas, y sales hidratadas dependiendo los rangos de temperatura con los cuales se requiere trabajar, en el caso del refrigerador doméstico se requieren de  $3$  a  $7^{\circ}C$ . La empresa Climator fabrica la sal hidratada ClimSel C7 utilizando como compuesto Sulfato de Sodio ( $Na_2SO_4$ ), agua y aditivos, tiene una capacidad de almacenamiento de  $0-15^{\circ}C$  y la transferencia de calor es de  $0.5$  a  $0.7 W/m/^{\circ}C$

Para implementar los paneles con materiales de cambio de fase se propone utilizar lámina de aluminio anodizado, debido a que el aluminio es un buen conductor térmico y la capa anodizada lo protege de la corrosión, debido a que existe una gran gama de equipos de refrigeración en el mercado, es difícil pensar en dimensiones específicas para los paneles, así que deberán calcularse.

### **Paneles de aislamiento de vacío**

La propuesta de utilizar paneles de aislamiento de vacío se sustenta en la conductividad térmica con la que cuentan, en este caso se propone un panel de aislamiento con una conductividad térmica de  $0.019 W/mK$  y  $15 mm$  de grosor. De acuerdo a las investigaciones de la empresa Yin Xing Electric utilizando paneles de aislamiento al vacío es

posible ahorrar de un 10 a un 30 % de energía. Esta compuesto por óxidos inorgánicos, el mayor compuesto es Carbonato de silicio ( $SiC$ ), dióxido de silicon ( $SiO_2$ ), opacificadores para minimizar la radiación infrarroja y silicatos. El panel esta conformado por un núcleo de carbonato de silicio el cual contiene el vacío, teniendo una presión interna de  $\pm 5\text{ mbar}$ , enseguida hay una capa de poliuretano de baja densidad, y todo esta cubierto por láminas de aluminio, por lo que es necesario tener cuidado de no dañar al panel al manipularlo debido a que podría aumentar la presión al interior perdiendo así sus características de aislamiento, el panel esta sellado por medio de calor produciendo vacío. La presión baja al interior y el panel microporoso del núcleo hacen que los valores de conductividad térmica sean extremadamente bajos.

Partiendo de los estudios realizados por O. Laguerre y S. Ben Amara [17] se propone colocar paneles en todas las paredes del equipo de refrigeración prestando atención a la parte superior del equipo, la parte inferior en las paredes donde se encuentra por fuera la unidad condensadora y la puerta.

A continuación se muestra la siguiente tabla donde observaremos el comparativo de un refrigerador con las implementaciones propuestas y el refrigerador antes mencionado como caso práctico Sanyo SR-4432SM 2007, la fuente para obtener los información del número de equipos de refrigeración en México es del INEGI y las tarifas y tipo de consumo se tomo directamente de CFE.

### **Obtención de Consumos y ahorros.**

Para realizar el cálculo del consumo y el posible ahorro, se obtuvo la estadística del INEGI levantada en el año 2010 en la cual, en el territorio mexicano se cuenta con 23,091,296 hogares con refrigerador considerando la tarifa 1 de consumo básico en el mes de abril, la tarifa es de  $\$0.741\text{ kW h}$

Tomando como ejemplo el refrigerador Sanyo SR-4432SM que tiene un consumo de  $335\text{ kW h/año}$  se calcula que genera un costo de  $\$248.235$  anuales, multiplicando este resultado por los refrigeradores en todo el país se obtiene un costo anual de  $\$5,732,067,862$

Se considera que por cada  $\text{kW}$  consumido en una hora se generan  $600\text{ gr}$  de  $CO_2$  generando  $201\text{ kg}$  de  $CO_2$  en un año y en todo el país  $4,641.35$  Toneladas de  $CO_2$

La propuesta de implementar compresores de velocidad variable disminuye un 40 % el consumo eléctrico es decir  $201\text{ kW h}$  al año, si se implementan paneles aislantes de vacío

#### 4.7 Caso Práctico

---

se obtiene una disminución del 10 % dando un total de consumo anual de 180.9 *kW h* generando un costo de \$ 134.046 anuales multiplicados por los refrigeradores existentes hasta el año 2010 en México se obtienen \$ 3, 095, 316, 645 generando en el país 2, 513.48 Toneladas de  $CO_2$ .

**Tabla 4.4.:** Tabla de consumos y ahorro

	Sanyo SR-4432SM		Propuesta		Ahorro
	Individual	México	Individual	México	
Consumo anual					
kW/h	335	7,735,584,160	180.9	4,177,210,562	3,558,373,598
Tarifa de consumo básico	\$0.741	\$0.741	\$0.741	\$0.741	
	kW/h	kW/h	kW/h	kW/h	
Costo por consumo anual					
kW/h	248.235	5,732,067,863	134.0469	3,095,316,646	\$2,636,751,217
Generación de $CO_2$	201	4641.35	108.540	2513.48	2127.86
	kg de $CO_2$	Ton de $CO_2$	kg de $CO_2$	Ton de $CO_2$	Ton de $CO_2$

## 5. Conclusión

Mediante la aplicación de la metodología, que forma parte de la propuesta para la mejora en la eficiencia de un equipo de refrigeración se concluye que la tabla de Revisión Visual es funcional y ayudó a localizar la información principal para atacar de manera adecuada la mejora en la eficiencia, el Diagrama del programa de mejoramiento ayuda de manera directa al usuario a comprender que situaciones y elementos afectan tanto a su equipo de refrigeración como a la eficiencia misma. La propuesta de implementación de compresores de velocidad variable, circulación del aire tipo forzado, controles electrónicos, paneles de cambio de fase, y paneles aislantes de vacío han mostrado que es posible consumir menos energía, gastar menos recursos económicos y sobre todo cuidar mas al ambiente emitiendo menos toneladas de  $CO_2$

Sin embargo es necesario seguir desarrollando componentes mas eficientes que por si solos no nos darán la eficiencia que tanto buscamos se requiere juntar las diferentes tecnologías de diversos componentes para en realidad poder observar cambios cuantitativos en la eficiencia en los equipos de refrigeración, así como establecer una normatividad que regule el uso obligatorio de estos componentes.

Durante la elaboración de este trabajo se encontró que la eficiencia en un equipo de refrigeración es sumamente baja debido a:

- Sellos magnéticos desgastados.
- Obstrucción del flujo de aire al interior del equipo de refrigeración.
- Condensador obsoleto de tubos al exterior.
- Uso de deshielo automático por resistencia.
- Formación de escarcha en el evaporador.
- Carga inadecuada de refrigerante.

- Selección incorrecta de compresor.
- Ausencia de cintas adhesivas de aluminio en el ensamble.
- Mala localización del equipo de refrigeración.

Los puntos mencionados anteriormente pueden ser atacados desde el diseño, sin embargo también desde su uso, por eso es importante mencionar que el usuario es pieza clave para el mejoramiento en la eficiencia de un equipo de refrigeración, es necesario que el usuario comprenda los factores que afectan la eficiencia de su equipo de refrigeración.

Las recomendaciones para el usuario son:

- Ubicar el equipo de refrigeración en lugares alejados a fuentes de calor.
- Colocarlo a 5 cm de la pared.
- Hacer revisiones eventuales de la condición del sello magnético.
- Hacer el deshielo cada vez que se encuentre escarchado el evaporador.
- Realizar deshielo manualmente.
- Mantener limpia el área de condensación debido a que un área de condensación sucia aumenta un 20 % el consumo de energía eléctrica.
- 

Las recomendaciones para el diseño de un equipo de refrigeración son:

- Utilizar compresores de velocidad variable
- Hacer uso de controles electrónicos para administrar la energía del equipo
- Implementar placas con materiales de cambio de fase.
- Ensamblar gabinetes interiores con paneles aislantes de vacío.
- Realizar estudios a nuevos diseños para determinar la carga adecuada de refrigerante.
- Seleccionar el compresor de acuerdo al refrigerante utilizado.
- Utilizar cinta adhesiva de aluminio en ensambles y sub ensambles en gabinete interior.

Otro dato importante a mencionar es que en México aun se utilizan refrigerantes contaminantes y debido al fundamento de este trabajo en relación a la mejora en la eficiencia para un mejor cuidado del medio ambiente, también se recomienda la sustitución de equipos que contengan refrigerantes nocivos para el medio ambiente.

Es importante recalcar que no basta con diseñar un programa para sustituir equipos de refrigeración con refrigerantes nocivos, ya que todos esos equipos formaran parte de un gran almacén de basura tóxica, es importante empezar a desarrollar en México plantas incineradoras de gases CFC's.

Es posible mejorar la eficiencia de un equipo de refrigeración ya ensamblado, y que se encuentre en funcionamiento optimo, en algún hogar, sin embargo, será posible visualizar mejoras cuantitativas más interesantes, si se ataca el problema desde el diseño, el uso de paneles con materiales de cambio de fase, paneles aislantes al vacío, compresores de velocidad variable, controles electrónicos, una distribución del tubo de condensador adecuada al equipo de refrigeración, así como la selección y cantidad específica del refrigerante, cabe mencionar que lo importante y esencial de este trabajo es abordar el mejoramiento en la eficiencia de un equipo de refrigeración domestico, sea este nuevo o este en el departamento de investigación y desarrollo de alguna empresa de refrigeración, por lo que para este trabajo, es importante ambos casos en los cuales se logra una mejora en la eficiencia del equipo de refrigeración.



## **A. Anexo**

# ELIMINACIÓN DE REFRIGERANTES AGOTADORES DE LA CAPA DE OZONO POR INCINERACIÓN

José Ignacio Huertas\*, Helmer Acevedo\*\*, Carol Ochoa\*\*\*

## RESUMEN

*Existe la necesidad de encontrar métodos alternativos fácilmente replicables para disponer de las sustancias agotadoras de la capa de ozono. En respuesta a esta necesidad este trabajo propone la incineración como método de disposición final de estas sustancias.*

*Inicialmente se establece analíticamente la sustancia reductora más apropiada. Se concluye que la utilización de hidrógeno para la incineración es la más adecuada ya que asegura una alta eficiencia de destrucción. Adicionalmente se determinan las condiciones óptimas de operación (presión, temperatura y relación de flujos). Posteriormente se diseña y construye un incinerador tipo laboratorio con el objeto de verificar experimentalmente las conclusiones obtenidas analíticamente. La composición de los subproductos de combustión se determinó por cromatografía de gases con espectrometría de masas. Los resultados preliminares muestran que la disposición de los refrigerantes agotadores de la capa de ozono es técnicamente factible mediante incineración con hidrógeno. Se continúa trabajando en alternativas para disminuir los costos del proceso.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las sustancias clorofluorocarbonadas (CFC's) son compuestos con enlaces carbono-cloro ó carbono-fluor que poseen estructuras muy estables. Se usan en forma masiva en refrigerantes y productos en forma de aerosol. Dada su estabilidad química, cuando son liberadas pueden ascender hasta la estratósfera sin sufrir modificaciones. Allí, en presencia de la luz solar, descomponen el ozono ( $O_3$ ) destruyendo la capa que protege la tierra de la radiación UV. Por lo anterior la comunidad internacional, mediante la firma del protocolo de Montreal, decidió no continuar con la produc-

ción de estas sustancias y remplazarlas con sustancias más amigables con el medio ambiente.

En el caso de la industria dedicada a la refrigeración, los refrigerantes agotadores de la capa de ozono que fueron incorporados en la maquinaria industrial en los años anteriores a la firma del protocolo de Montreal, en la actualidad están siendo recuperados y remplazados por refrigerantes más amigables con el medio ambiente. Una vez recuperados y almacenados, estos compuestos pueden ser destruidos por medio de dos técnicas: oxidación térmica y reducción por plasma.[Ref. 1]

\* MSc. DSc., Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes. jhuertas@uniandes.edu.co, Bogotá-Colombia.

\*\* Estudiante de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes, Bogotá.

\*\*\* Joven Investigador de COLCIENCIAS, Estudiante de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes, Col.

Para muchos países, incluyendo Colombia, la única alternativa de disposición posible de los cientos de toneladas de estas sustancias recuperadas y almacenadas es la exportación para su destrucción en laboratorios especializados. Esta es la razón por la cual en la práctica los refrigerantes agotadores de la capa de ozono finalmente son liberados directamente a la atmósfera.

Por tanto existe la necesidad de encontrar nuevas alternativas de disposición de los refrigerantes agotadores de la capa de ozono, que sean de bajo costo y fácilmente replicables. En respuesta a esta necesidad el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes ha venido trabajando en desarrollar un método de disposición de refrigerantes agotadores de la capa de ozono mediante incineración. En este estudio se analiza el caso del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) como refrigerante representativo. Los demás refrigerantes agotadores de la capa de ozono pueden ser incinerados como una extensión de las conclusiones expuestas en el presente trabajo.

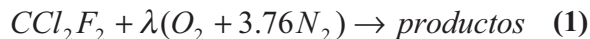
## 2. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE OPERACIÓN

Con el objeto de determinar las condiciones óptimas de incineración, se estableció analíticamente la composición de los productos de combustión resultantes al incinerar R12 a diferentes condiciones de operación (presión, temperatura del reactor y flujos de los reactivos) [Ref. 2, 3, 4]. En todos los casos se consideró que los reactantes entran a condiciones estándar ( $P = 1 \text{ atm}$  y  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Se consideraron como alternativas de agentes reductores aire e hidrogeno. Inicialmente también se consideró usar sodio. Sin embargo esta alternativa se descartó por el alto riesgo que representa la manipulación de esta sustancia.

### 2.1 Aire como agente reductor

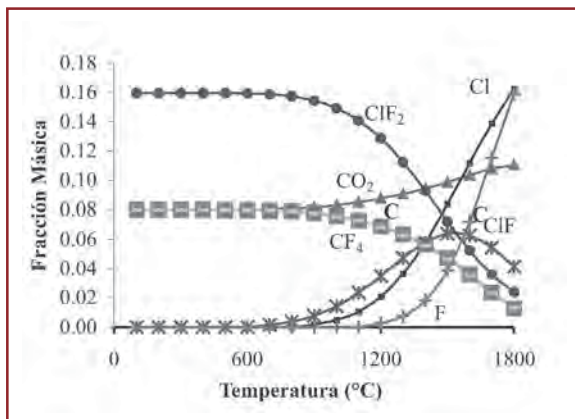
Considerando que el aire es el oxidante más barato y abundante en la naturaleza, se evaluó

en primera instancia la alternativa de incinerar el refrigerante R12 con aire. La ecuación 1 muestra la reacción global a considerar.



donde  $\lambda$  es el porcentaje de aire usado. La figura 1 muestra la composición de equilibrio de los productos de combustión cuando el incinerador se encuentra a presión atmosférica, a diferentes temperaturas de trabajo y  $\lambda=1$ . Se observa que los principales subproductos son  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $ClF$ ,  $ClF_2$ ,  $CF_4$ ,  $Cl_2$  y  $F$ . El compuesto  $CF_4$  se denomina tetrafluoruro de carbono (tetrafluormetano) y pertenece al grupo de sustancias llamadas fluorocarbonadas. Es una sustancia muy estable.

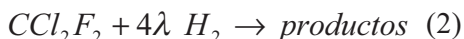
La figura 1 muestra que para reducir la fracción másica de  $CF_4$  hasta el 1% bajo estas condiciones, se requiere llevar el incinerador por encima de los  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo cual encarece el proceso y representa un reto tecnológico. Por tanto se puede concluir que la incineración de R12 con aire requiere altas temperaturas para disminuir las concentraciones de los subproductos indeseables hasta límites aceptables.



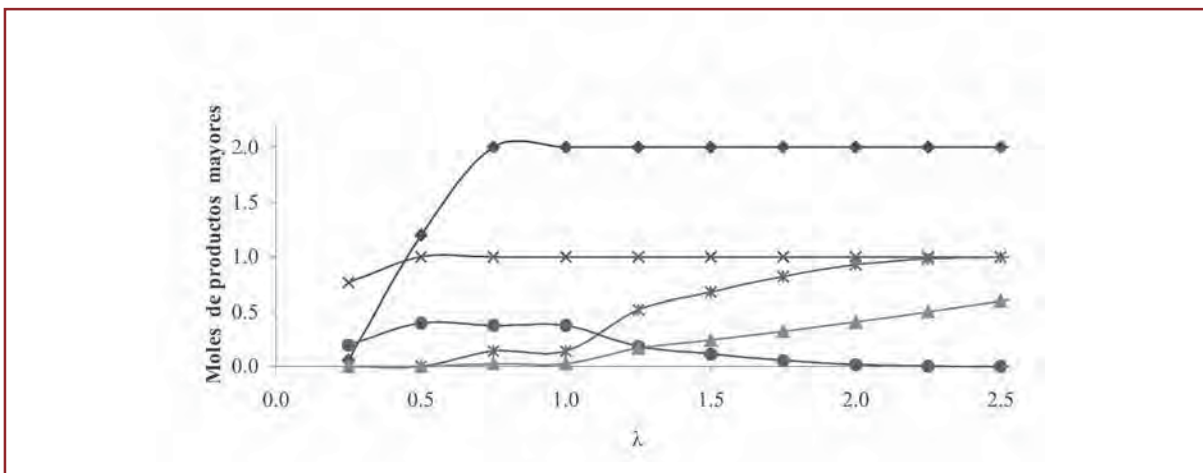
**Figura 1.** Subproductos de la incineración del R12 con aire como función de la temperatura del incinerador a  $P=1 \text{ atm}$  y  $l=1$ .

### 2.3 Hidrógeno como agente reductor

Como segunda alternativa para incinerar R12 se escogió hidrógeno por ser un compuesto que tiene afinidad con los elementos halógenos y es factible que forme hidruros con el cloro y con el flúor. La ecuación 2 muestra la reacción global a considerar.



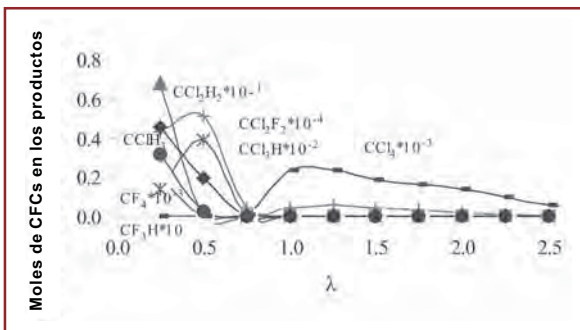
La figura 2 muestra los principales productos de la incineración entre el R12 y el  $H_2$  a diferentes valores de  $\lambda$ . Se observa que los productos de mayor concentración son HF, HCl,  $H_2$  y  $CH_4$ . Estos subproductos pueden ser fácilmente manipulados o dispuestos mediante tecnologías de tratamiento de gases bien conocidas y accesibles.



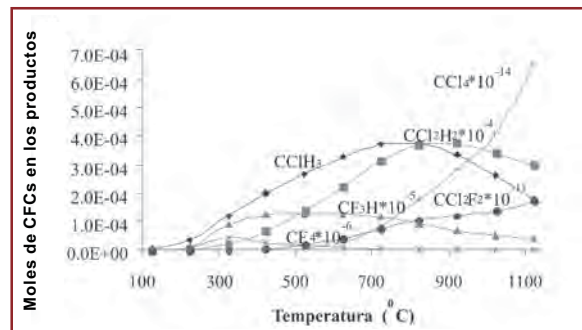
**Figura 2.** Productos de mayor concentración en los productos de la incineración del R12 con  $H_2$  a diferentes  $\lambda$ , Temperatura adiabática y  $P = 1 \text{ atm}$ .

La figura 3 muestra la fracción de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada bajo condiciones adiabáticas como función de  $\lambda$ . La figura 4 igualmente muestra la fracción

de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada para un  $\lambda=1$  y como función de la temperatura de la cámara de incineración.



**Figura 3.** Moles de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada bajo condiciones adiabáticas como función de  $\lambda$



**Figura 4.** Moles de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada para un  $\lambda=1$  y como función de la temperatura de la cámara de incineración.

Las figuras 3 y 4 muestran que se requiere de un  $\lambda$  cercano a 1 y una temperatura de la cámara de incineración superior a 825°C para alcanzar una eficiencia de destrucción superior al 99.99%.

Para estimar los requerimientos de energía del incinerador se calculó la temperatura adiabática de llama para el caso de  $\lambda=1$ . Se encontró que para este caso es de 1100°C. Esto significa que no es necesario adicionar energía al proceso para lograr la temperatura mínima de trabajo deseada ( $T > 825^{\circ}\text{C}$ ).

### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL INCINERADOR

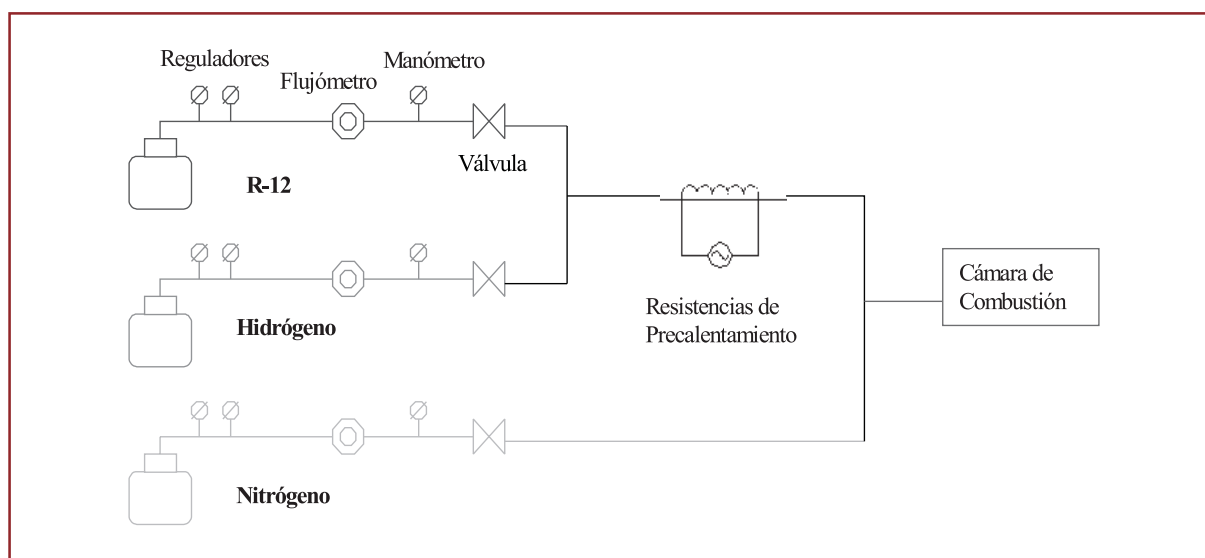
Con el objeto de verificar experimentalmente que es factible técnicamente incinerar R12 con

hidrogeno y obtener eficiencias de destrucción superiores al 99.99%, se procedió a diseñar y construir un incinerador con las siguientes características:

- de llama por difusión y con premezcla
- flujo laminar
- tipo laboratorio

El incinerador permite controlar y cuantificar los flujos de los diferentes reactivos y la temperatura de la cámara de incineración. La figura 5 muestra el diagrama de flujo del incinerador construido.

La temperatura de la cámara de incineración es regulada mediante resistencias eléctricas y un control automático ON/OFF. El calentamiento de las líneas de conducción de los



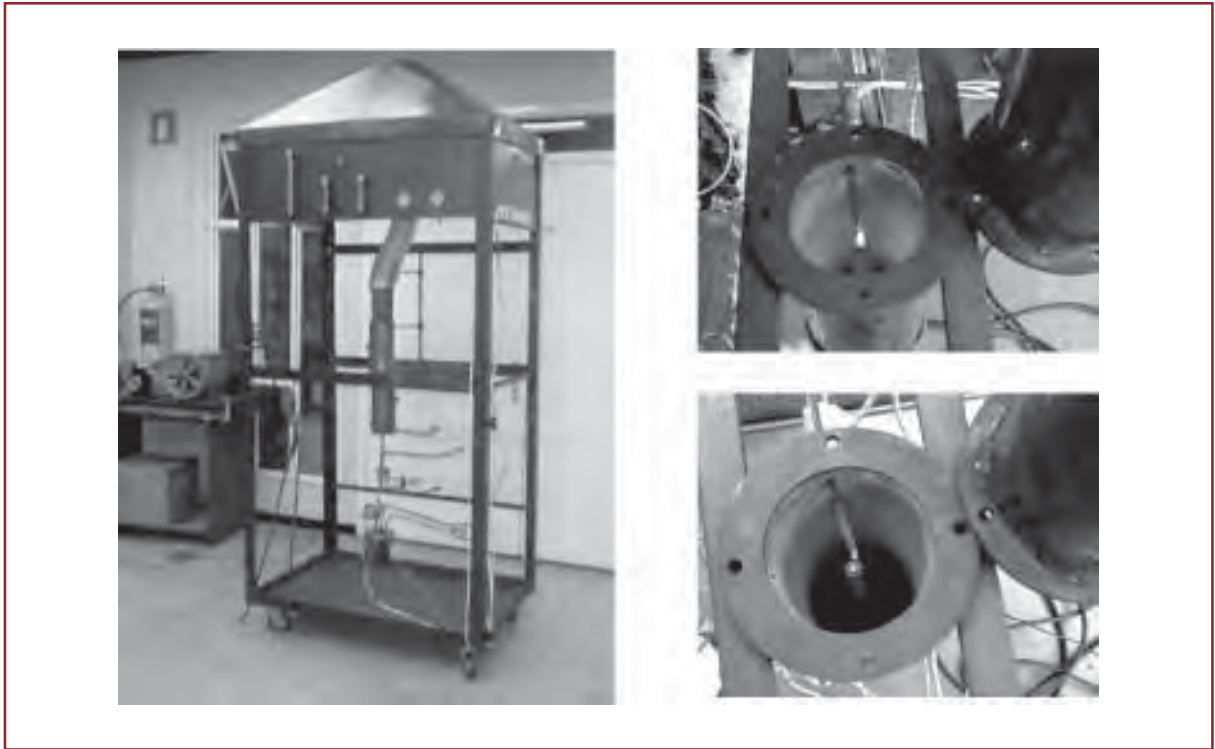
**Figura 5.** Ilustración de la operación del incinerador de refrigerantes agotadores de la capa de ozono.

reactivos se logra mediante el uso de resistencias eléctricas de 600 W controladas por variadores de voltaje. El orden en que los reactivos ingresan a la cámara de combustión de adentro hacia fuera es R12,  $\text{H}_2$ , y el gas inerte. Para lograr una combustión apropiada de los reactantes se usa una primera etapa de premezcla.

El inerte utilizado en el incinerador es nitrógeno, el cual tiene por finalidad realizar la purga de aire de las tuberías por donde circulará el hidrógeno y el refrigerante e inertizar la cámara de combustión asegurando que el hidrógeno y el aire no se encuentren en concentraciones tales que puedan causar reacciones violentas. Tanto el hidrógeno como el R12 entran a la cámara de incineración a una presión de 11.7 psia y a temperatura ambiente.

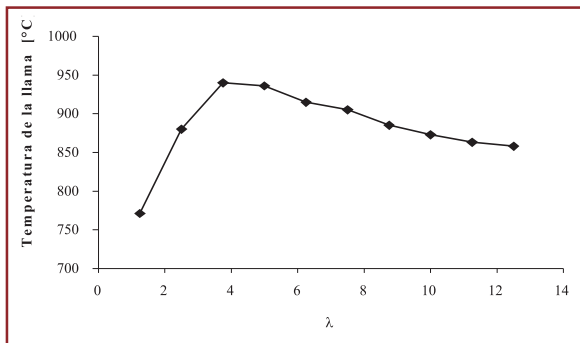
#### 4. EXPERIMENTACIÓN

Inicialmente se operó el incinerador ajustando la temperatura de la cámara de incineración a 700°C y el flujo de hidrógeno entre 0 y 2 L/min. Se ajustó la relación R12/H<sub>2</sub> hasta obtener una llama limpia y sin formación de condensados. La figura 6 muestra una foto del tipo de llama obtenida.



**Figura 6.** Ilustración del incinerador y tipo de llama obtenida en la incineración de refrigerantes agotadores de la capa de ozono.

Se tomaron lecturas indicativas de la temperatura de la llama por medio de un termopar tipo



**Figura 7.** Lecturas indicadoras de la temperatura de la llama obtenidas en la incineración de R12 con H<sub>2</sub> para diferentes  $\lambda$

K. La figura 7 ilustra la variación de la temperatura de la llama como función de  $\lambda$ . Se encontró que se obtiene 938 °C como indicador de la máxima temperatura cuando  $\lambda = 3.8$  en lugar de  $\lambda = 1$  como predicen los resultados analíticos. La diferencia se debe a que el diseño del quemador requiere alimentar H<sub>2</sub> en exceso para que haya suficiente Hidrógeno en el frente de llama.

Con el objeto de medir los niveles de concentración de los subproductos de la incineración, se tomó una muestra de los gases de combustión cuando el indicador de temperatura de la llama alcanza su máximo en  $\lambda=3.8$ . Esta muestra fue analizada por cromatografía de gases

con espectrómetro de masas. Los resultados preliminares muestran que las concentraciones de los subproductos indeseados están por debajo de la concentración máxima recomendada por la OSHA [Ref. 5] para una atmósfera limpia.

Actualmente se continúa trabajando en la exploración de los niveles de concentración de subproductos a porcentajes de hidrógeno menores buscando optimizar el proceso. Como alternativa para eliminar las sustancias cloradas de los productos de combustión se está implementado una etapa de lavado con agua de estos gases. Por otro lado el trabajo continúa buscando formas de reducir los costos de incineración por este método.

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone como alternativa de disposición de las sustancias clorofluorcarbonadas la incineración con  $H_2$ . Analíticamente se encontró que las condiciones óptimas de operación se presentan cuando la relación de flujos es cercana a la estequiométrica y la cá-

mara de incineración está por encima de los  $825^\circ C$ . Resultados experimentales preliminares muestran que la concentración de sustancias clorofluorcarbonadas generadas como subproductos de la incineración son muy bajas asegurando una alta eficiencia de destrucción. Se continúa trabajando en busca de disminuir el consumo de  $H_2$  en el proceso y una cuantificación más adecuada de los subproductos de la incineración.

## 6. REFERENCIAS

1. United Nations Environment Program (UNEP). Handbook of International Treaties on the Protection of the Ozone Layer-Section 2.4-Destruction Procedures. Approved destruction processes.1992
2. JANAF. Thermochemical Tables. Standard Reference Data System. 2<sup>nd</sup> Ed.1971
3. HSC Chemistry. Ver 1.12
4. Van Wylen, Sonntag, Borgnakke. Fundamentals of Classical Thermodynamics. 4<sup>th</sup> Ed. 1994
5. OSHA. Part 1910. Occupational Safety and Health Standards. Subpart z. Toxic and Hazardous Substances. Table z-1.Limits for Air Contaminants.1993



## Bibliografía

- [1] CFA Afonso, EAB Maldonado, and E. Skåret. A single tracer-gas method to characterize multi-room air exchanges. *Energy and buildings*, 9(4):273–280, 1986.
- [2] Clito Afonso and Manuel Castro. Air infiltration in domestic refrigerators: The influence of the magnetic seals conservation. *International Journal of Refrigeration*, 33(4):856 – 867, 2010.
- [3] B and Zakrzewski. Optimal defrost cycle for the air cooler. *International Journal of Refrigeration*, 7(1):41 – 45, 1984.
- [4] P.K Bansal. Developing new test procedures for domestic refrigerators: harmonisation issues and future needs a review. *International Journal of Refrigeration*, 26(7):735 – 748, 2003.
- [5] P.K. Bansal and T.C. Chin. Design and modelling of hot-wall condensers in domestic refrigerators. *Applied Thermal Engineering*, 22(14):1601 – 1617, 2002.
- [6] PK Bansal and TC Chin. Modelling and optimisation of wire-and-tube condenser. *International journal of refrigeration*, 26(5):601–613, 2003.
- [7] P.K. Bansal and G. Xie. A simulation model for evaporation of defrosted water in household refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 22(4):319 – 333, 1999.
- [8] Pradeep Bansal, David Fothergill, and Ryan Fernandes. Thermal analysis of the defrost cycle in a domestic freezer. *International Journal of Refrigeration*, 33(3):589 – 599, 2010.
- [9] Erik Björk and Björn Palm. Performance of a domestic refrigerator under influence of varied expansion device capacity, refrigerant charge and ambient temperature. *International Journal of Refrigeration*, 29(5):789 – 798, 2006.
- [10] Denise and Young. When do energy-efficient appliances generate energy savings? some evidence from canada. *Energy Policy*, 36(1):34 – 46, 2008.



- [11] B. Gin, M.M. Farid, and P.K. Bansal. Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Conversion and Management*, 51(12):2698 – 2706, 2010.
- [12] J.K. Gupta and M. Ram Gopal. Modeling of hot-wall condensers for domestic refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 31(6):979 – 988, 2008.
- [13] J.P. Holman. *Transferencia de calor*. Compañía Editorial Continental, 1977.
- [14] Cemil Inan, Turgay Gonul, and M.Yalcin Tanes. X-ray investigation of a domestic refrigerator. observations at 25°C ambient temperature. *International Journal of Refrigeration*, 26(2):205 – 213, 2003.
- [15] S.J. James, J. Evans, and C. James. A review of the performance of domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*, 87(1):2 – 10, 2008. <ce:title>CHISA 2006 Special Section (pp. 1-63)</ce:title> <ce:subtitle>Selected papers from the symposium Food Processing and Technology held at the 2006 CHISA Congress, Prague, Czech Republic</ce:subtitle> <xocs:full-name>2006 CHISA Congress</xocs:full-name>.
- [16] MJP Janssen, JA De Wit, and LJM Kuijpers. Cycling losses in domestic appliances: an experimental and theoretical analysis. *International journal of refrigeration*, 15(3):152–158, 1992.
- [17] O. Laguerre, S. Ben Amara, J. Moureh, and D. Flick. Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*, 81(1):144 – 156, 2007.
- [18] O. Laguerre and D. Flick. Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*, 62(1):79 – 88, 2004.
- [19] O. Laguerre and D. Flick. Frost formation on frozen products preserved in domestic freezers. *Journal of Food Engineering*, 79(1):124 – 136, 2007.
- [20] RC Martins, MG Almeida, and CLM Silva. The effect of home storage conditions and packaging materials on the quality of frozen green beans. *International journal of refrigeration*, 27(8):850–861, 2004.
- [21] Dorantes. R. Auditorias energéticas en el sector doméstico. *Procesos de conversión de energía*, 2010.

- [22] S.M. Sami and J. Comeau. Prediction of condensation of refrigerant mixtures under magnetic field inside enhanced surface tubing. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(3):261 – 268, 2007.
- [23] YS Tian and TG Karayiannis. Low turbulence natural convection in an air filled square cavity: part i: the thermal and fluid flow fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(6):849–866, 2000.
- [24] Fuqiao Wang, Graeme Maidment, John Missenden, and Robert Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. part 1: Experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 27(17-18):2893 – 2901, 2007.

# Nomenclatura

A	Área
a	Aceleración
COP	Coefficiente de desempeño
Cp	Calor específico
E	Energía
Ec	Energía Cinética
Ep	Energía potencial
F	Fuerza
g	Gravedad
H	Entalpía
h	altura
K	Energía cinetica interna
Kg	Kilogramo
kg	kilogramo
m	Masa
m	metros
N	Newton

## Nomenclature

---

P	Presión
Q	Cantidad de energía térmica
qs	Calor sensible
U	Energía interna total
v	Velocidad
W	Trabajo