



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**ESTUDIO DE LA REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA COMO  
ALTERNATIVA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR  
COMPRESIÓN DE GAS PARA USO AUTOMOTRIZ**

**José David Dardón Pereira  
Asesorado por Ing. José Guillermo Bedoya**

**Guatemala, julio de 2004**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LA REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA COMO  
ALTERNATIVA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR  
COMPRESIÓN DE GAS PARA USO AUTOMOTRIZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
POR

**JOSÉ DAVID DARDÓN PEREIRA**

ASESORADO POR ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. SIDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
VOCAL I	Ing. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS
VOCAL II	Lic. AMAHÁN SÁNCHEZ ÁLVAREZ
VOCAL III	Ing. JULIO DAVID GALICIA CELADA
VOCAL IV	Br. KENNETH ISSUR ESTRADA RUIZ
VOCAL V	Br. ELISA YAZMINA VIDES LEIVA
SECRETARIO	Ing. PEDRO ANTONIO AGUILAR POLANCO

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. SIDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
EXAMINADOR	Ing. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA
EXAMINADOR	Ing. ERWIN EFRAÍN SEGURA CASTELLANOS
ESAMINADOR	Ing. CARLOS ANIBAL CHICOJAY
SECRETARIO	Ing. PEDRO ANTONIO AGUILAR POLANCO

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ESTUDIO DE LA REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA COMO ALTERNATIVA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE GAS PARA USO AUTOMOTRIZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha agosto 21 del 2003.

José David Dardón Pereira

## DEDICATORIA A:

**DIOS Y A LA VIRGEN MARÍA** Por ser los pilares que me guiaron y acompañaron durante este camino

**MIS PADRES  
ABEL Y MARÍA LUISA** Por ser mi apoyo incondicional y mis fuerzas en todo momento

**MIS HERMANOS JUAN  
PABLO Y LUISA MARIBEL** Por ser parte de este hogar, que siempre me apoyó y no me dejó desvanecer

**MIS ABUELOS ALFONSO,  
ALICIA, FELIZA Y  
SALVADOR** Por ser un pilar importante en mi vida y brindarme amor y comprensión

**MIS AMIGOS y AMIGAS** Por recordarme todos los días, la necesidad de terminar esta etapa

## **AGRADECIMIENTO A:**

**MI ASESOR**

**Ing. Guillermo Bedoya**

**MI REVISOR**

**Ing. Erwin Segura**

**MIS AMIGOS**

**Fradique Lee y Pablo Letona**

**LA ESCUELA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

## INDICE PRELIMINAR

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	V
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	VII
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>OBJETIVOS</b> .....	XIII
<b>RESUMEN</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVII
<b>1. PRINCIPIOS DEL AIRE ACONDICIONADO</b> .....	1
1.1. Características del aire.....	1
1.1.1. Especificaciones del aire a presión constante.....	2
1.1.2. Concentración de vapor de agua en el aire.....	3
1.1.2.1. Humedad absoluta.....	4
1.1.2.2. Humedad relativa.....	4
1.1.3. Peso del aire.....	6
1.1.4. Volumen del aire.....	6
1.2. Temperatura específicas del ambiente.....	7
1.2.1. Temperatura punto de rocío.....	7
1.2.2. Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.....	10
1.2.3. Relación entre las temperaturas punto de rocío, bulbo seco y húmedo.....	10
1.3. Leyes psicrométricas.....	12
1.3.1. Carta psicrométrica.....	13
1.3.2. Volumen de aire requerido para mantener la humedad relativa.....	17

1.3.3. Volumen de aire requerido para absorber la carga de calor.....	18
1.3.4. Cargas de calor.....	19
1.4. Carga de refrigeración para enfriar o secar.....	22
1.5. Aparato de aire acondicionado.....	23
1.5.1. Componentes básicos.....	24
1.5.1.1. Evaporador.....	26
1.5.1.2. Compresores.....	28
1.5.1.3. Condensador.....	30
1.5.1.4. Dispositivo regulador de líquidos.....	33

<b>2. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE REFRIGERACIÓN DE AUTOMÓVILES.....</b>	<b>35</b>
2.1. Bomba de calor compacta.....	35
2.1.1. Diseño.....	38
2.1.2. Beneficios.....	39
2.2. Aire acondicionado con líquido sobrealimentado.....	40
2.3. Sensor de contaminación.....	42
2.3.1. Beneficios del sensor.....	43
2.3.2. Beneficios del sistema de odorización.....	44
2.4. Sistema de clima multizona.....	45
2.4.1. Sistema modular flexible.....	45
2.4.2. Componentes del sistema.....	46
2.5. Aire acondicionado con refrigerante CO <sub>2</sub> .....	47
2.5.1. Beneficios.....	49
2.5.2. Razones para el uso del CO <sub>2</sub> .....	51
2.5.3. Cómo trabaja el sistema.....	51
2.6. Refrigeración por absorción.....	53

2.7. Refrigeración termoeléctrica.....	54
<b>3. MATERIALES MAGNÉTICOS EN LA REFRIGERACIÓN.....</b>	<b>59</b>
3.1. Fundamentos magnéticos de la materia.....	61
3.1.1. Momentos magnéticos y magnetización.....	62
3.1.2. Ecuación fundamental en un sistema magnético.....	64
3.1.2.1. Capacidades caloríficas.....	65
3.1.2.2. Susceptibilidades magnéticas.....	66
3.1.2.3. Coeficientes piromagnéticos.....	66
3.1.2.4. Relaciones de Maxwell.....	66
3.1.3. Trabajo expansivo y trabajo magnético.....	67
3.2. Ecuaciones de estado magnéticas.....	68
3.2.1. Paramagnetismo.....	69
3.2.1.1. Temperatura de Néel o Curie.....	70
3.2.1.2. Representación de ecuación Langevin – Weiss.....	73
3.2.1.3. Paramagnetismo nuclear.....	74
3.2.2. Diamagnetismo.....	75
3.2.3. Ferromagnéticos.....	77
3.2.4. Antiferromagnéticos.....	79
<b>4. CICLOS DE LA REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA.....</b>	<b>81</b>
4.1. Efecto magnetocalórico.....	83
4.1.1. Materiales magnetocalóricos.....	87
4.1.1.1. Lantánidos.....	87
4.1.1.2. Actínidos.....	88
4.1.2. Sistema para la obtención de bajas temperaturas.....	91

4.1.3. Sistema para la medición de calor específico a baja temperatura.....	93
4.1.4. Temperatura magnética.....	94
4.1.5. Comparación del ciclo convencional al magnético.....	98
4.1.6. Regeneradores.....	99
4.1.6.1. Eficiencia de un intercambiador.....	101
4.1.6.2. Clasificación por la distribución de flujo.....	102
4.2. Tipos de refrigeradores magnéticos.....	102
4.2.1. Clasificación en función de la temperatura de trabajo...	103
4.2.2. Según su mecanismo.....	104
4.2.2.1. Rotativos.....	104
4.2.2.2. Pistón.....	105
4.2.2.3. Bobina de pulsos de corriente.....	106
4.2.2.4. Ferrofluidos.....	107
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>108</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>111</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Curva de saturación punto de rocío.....	9
2	Relación de temperatura controlada.....	11
3	Relación de temperatura fuera de ensayo.....	12
4	Carta psicrométrica.....	16
5	Componentes básicos sistema de refrigeración.....	26
6	Caídas de presión en un evaporador.....	27
7	Diagrama guía del compresor.....	30
8	Comportamiento del gas R – 12 pasando por el condensador.....	33
9	Diagrama del sistema bomba de calor.....	36
10	Eficiencia de la bomba de calor.....	36
11	Esquema del funcionamiento de la bomba de calor.....	38
12	Distribución del sistema multizona en el vehículo.....	46
13	Comparación de R – 134 <sup>a</sup> con el CO <sub>2</sub> .....	48
14	Comparación de temperaturas diferentes sistemas.....	50
15	Celda termoeléctrica.....	56
16	Diagrama de enlaces moleculares.....	60
17	Representación de la ecuación Langevin – Weiss.....	73
18	Curva de histéresis.....	77
19	Direcciones magnéticas de diferentes materiales magnéticos.....	79
20	Diagrama de temperatura de diferentes materiales magnéticos.....	80

21	Ciclos de la refrigeración magnética.....	83
22	Comportamiento de la entropía y temperatura en ausencia del campo magnético.....	85
23	Etapas sucesivas de enfriamiento.....	86
24	Tabla periódica de los elementos.....	90
25	Sistema para la obtención de bajas temperaturas.....	91
26	Sistema de medida de calor específico.....	94
27	Incrementos isotérmicos y reducciones adiabáticas.....	96
28	Comparación refrigeración magnética y convencional.....	99
29	Regeneradores típicos.....	101
30	Modelo rotativo.....	105
31	Modelo de refrigerador de pistón.....	106
32	Muestra de ferrofluido atrayéndose.....	107

## TABLAS

I	Gases naturales e impurezas.....	2
II	Depreciación del punto de rocío.....	18
III	Factores para carga de calor.....	20
IV	Temperatura de curie para diferentes compuestos químicos.	72
V	Descripción de partes del sistema para medida de calor específico.....	93
VI	Rangos de termómetros.....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Cp</b>	Coeficiente de calor específico.
<b>T</b>	Temperatura.
<b>Hr</b>	Humedad relativa
<b>Pr</b>	Punto de rocío
<b>Pm</b>	Presión del medio
<b>Ps</b>	Presión de saturación
<b>V</b>	Volumen del aire
<b>K</b>	Constante que determina la cantidad de calor que pueda absorber determinado volumen.
<b>H</b>	Entalpía molar
<b>H</b>	Entalpía total
<i>u</i>	Energía interna molar
<b>U</b>	Energía interna total
<b>A</b>	Área
<b>Td</b>	Temperatura diferencial en condiciones interiores y exteriores.
<b>F</b>	Factor de luz solar o energía libre
<b>A/A</b>	Aire acondicionado
<b>CFC</b>	Cloruro fluoro carbonos
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono.
<b>M</b>	Momento magnético
<b>B</b>	Campo magnético
$\frac{\partial x}{\partial t}$	La derivada parcial de x respecto de t

$\frac{dx}{dt}$	La derivada de x respecto de t
$\delta$	Diferenciales inexactas de funciones de trayectoria
$d$	Diferenciales exactas de funciones punto
$\mathbf{u}_o$	Momento bipolar
$\mathbf{X}_m$	Susceptibilidad magnética
$\mathbf{K}_m$	Permeabilidad relativa del material
$\mathbf{W}$	Trabajo sistema magnético
$\mathbf{H}_m$	Intensidad de campo magnético
$\mathbf{S}$	Entropía molar
$\mathbf{S}$	Entropía total
$\lambda$	Coefficiente de conductividad térmica
$\mathbf{I}$	Imanación
$\mu_0$	Permeabilidad magnética en el vacío

## GLOSARIO

<b>Aire acondicionado</b>	Es el sistema que hace posible la circulación del aire en un espacio que necesita ser condicionado para enfriarse o deshumedecerse. Buscando condiciones ideales en temperatura para la habitación
<b>Campo magnético</b>	Es el que se produce de manera natural (imanes) o por medio de una corriente eléctrica en un solenoide.
<b>Carta psicrométrica</b>	Es el principio que gobierna la relación entre el aire puro y el vapor de agua que se describe en una gráfica.
<b>Compresor</b>	Es el dispositivo mecánico que comprime el gas que contiene el calor absorbido, aumentando su presión y temperatura al hacerlo circular por el condensador donde entrega su calor y se condensa.
<b>Condensador</b>	Son intercambiadores de calor diseñados para transferir el calor absorbido por el refrigerante, al medio ambiente, transformando el refrigerante en el estado gas – líquido.

<b>Diamagnetismo</b>	Propiedad de los materiales que se magnetizan débilmente en sentido opuesto a un campo magnético aplicado. Son repelidos por los imanes
<b>Evaporador</b>	Dispositivo utilizado en la refrigeración para extraer el calor del ambiente en que se desea disminuir la temperatura.
<b>Entalpía de atomización</b>	Es la energía necesaria para formar un mol de átomos gaseosos a partir del elemento en condiciones estándar.
<b>Entalpía de fusión o calor de fusión</b>	Es la cantidad de energía (calor) que se necesita aportar a un mol del elemento para que, a su temperatura de fusión, pase de la fase sólida a la líquida.
<b>Entalpía de vaporización o calor de vaporización</b>	Es la cantidad de calor o energía para conseguir que todo el líquido pase a la fase de vapor que debe ser aportada al sistema.
<b>Entropía</b>	Es el grado de desorden atómico en el que se encuentra un cristal o en este caso un material magnético.

<b>Ferromagnetismo</b>	Propiedad de algunos materiales que hacen que resulte intensamente imantado cuando se sitúan en un campo magnético y conservan parte de su imantación cuando desaparece dicho campo.
<b>Humedad</b>	Mezcla de vapor de agua con aire, según la temperatura es la cantidad de humedad y la zona en la que se encuentre.
<b>Momento magnético</b>	Atómicamente se asocia con el movimiento orbital de los electrones que forman una espiral de corriente.
<b>Refrigeración</b>	Es la transformación repetitiva de un refrigerante de gas a líquido y viceversa al hacer enfriar la sustancia.
<b>Refrigeración magnética</b>	Es el proceso de desmagnetización adiabática de las sales paramagnéticas que tienen propiedades que hacen posible el funcionamiento del sistema.
<b>Refrigerante</b>	Es un fluido químico cuyo estado puede cambiarse fácilmente de líquido a gas y

viceversa, que enfría por absorción de calor en su expansión.

**Paramagnetismo**

Propiedad de los materiales por la que se magnetizan en la misma dirección que un campo magnético aplicado. Si este desaparece también el magnetismo inducido.

**Temperatura de rocío**

Es la medida de humedad del aire, si se enfría. A ese punto el aire se vuelve saturado condensándose.

# OBJETIVOS

## General

Proponer la refrigeración magnética como una alternativa a los sistemas convencionales de refrigeración por compresión en los automóviles de combustión interna.

## Específicos

1. Tener el conocimiento de la refrigeración convencional utilizada actualmente en los automóviles.
2. Mostrar los materiales magnéticos que deben ser utilizados en la aplicación de la refrigeración magnética dando a conocer su diferencia de la gama de materiales magnéticos convencionales.
3. Exponer el principio de funcionamiento del ciclo de la refrigeración magnética utilizando la entropía y sus efectos de transferencia de calor de forma adiabática.
4. Conocer las tecnologías utilizadas en diferentes tipos de refrigeración magnética.



## RESUMEN

En el transcurso de la última década se midió la disminución de la capa de ozono. Los futuros niveles de ozono y de rayos UV dependerán de la combinación de factores naturales y antropogénicos; como por ejemplo, la utilización de los CFC, que se crean a partir de 1928 en los Estados Unidos. En aquel momento, causan buena recepción industrial por sus características estables, atóxicas, no corrosivas y no inflamables. Después, 50 años más tarde, se descubre que los CFC forman parte de las sustancias agotadoras de ozono. Sus fabricantes se expresan que cuando iniciaron su producción lo hacían ignorando cuales serían los graves efectos secundarios de esos productos sobre la capa de ozono. La investigación de las diferentes tecnologías de refrigeración es para disminuir estos gases que son contaminantes para el medio ambiente; la refrigeración magnética es una opción viable.

La refrigeración magnética es un proceso con el cual se puede alcanzar temperaturas muy bajas. Este proceso es conocido como desmagnetización adiabática, involucra ciertas sales que poseen propiedades paramagnéticas. El ciclo de trabajo de un refrigerador magnético es análogo a un ciclo de gas, pero en vez de comprimir y expandir un gas, se magnetiza y desmagnetiza el material con el que se trabaje. Los elementos de las tierras raras, de la tabla periódica de los elementos, hacen factible el uso industrial y doméstico como los sistemas de A/A



## INTRODUCCIÓN

La refrigeración magnética es una de las alternativas que se debe tomar en cuenta a la hora de pensar en sustitutos de los sistemas convencionales de refrigeración. Si se observa de cerca los refrigerantes utilizados para el proceso de compresión por medio de sistemas mecánicos, que hasta ahora han sido muy eficientes pero tienen la desventaja de ser contaminantes para el medio ambiente, porque producen emisiones de CFC o cloruro fluoruro carbonos que son los causantes del calentamiento global.

Debye y Giauque observaron las propiedades magnéticas de la materia, en particular las de las sales paramagnéticas (sustancias tales como el sulfato de hierro y amonio, sulfato de cromo y potasio y nitrato de cesio y magnesio). En cada una de estas sustancias, en especial las que contienen hierro, se puede observar que cada átomo se comporta como un imán pequeño que debido a la separación entre las fuerzas magnéticas entre ellos son muy débiles. Esto significa que cada pequeño imán perteneciente a un átomo de hierro puede orientarse en cualquier dirección, y esta libertad en sí implica un alto grado de desorden atómico o entropía.

Cuando se discute el uso de los refrigerantes para obtener bajas temperaturas, se puede mencionar el uso de sistemas mecánicos a fin de alterar el volumen del gas y en consecuencia variar la entropía. El pistón puede ejercer fuerza sobre las moléculas del gas y de esta manera alterar su energía.

Ahora bien si se quiere alterar la energía de los imanes atómicos se debe utilizar un campo magnético y lo que hay que hacer para lograr muy bajas temperaturas es realizar un ciclo de operaciones sobre las propiedades magnéticas de la materia. En lugar de empujar un pistón hacia dentro y hacia fuera en un cilindro a fin de comprimir y rarificar un gas, se aplica un imán para que actúe sobre los átomos magnéticos. El uso de gases para alcanzar bajas temperaturas está limitado esencialmente por la temperatura a la que los mismos se licúan; es decir la temperatura a la cual la energía cinética de los átomos es tan débil como para permitir que las fuerzas interatómicas los mantengan unidos.

# 1. PRINCIPIOS DEL AIRE ACONDICIONADO

## 1.1. Características del aire

La atmósfera que nos rodea es una combinación de gases, los cuales se pueden dividir en dos clases: puros o no puros. La atmósfera también está formada por partículas que están en forma de polvo, la cantidad de partículas depende de la localidad de la misma. En algunas partes altas como en montañas que están arriba de los océanos, se espera que el aire esté libre de partículas y de gases impuros. Por otra parte, en la ciudad o en las áreas urbanas las impurezas siempre están presentes, la diferencia es la concentración de las mismas dependiendo de la industrialización de la zona donde se encuentren.

En las condiciones normales, el aire se puede definir como una mecánica mezcla de gases tales como vapor de agua según la zona, 78% nitrógeno, 21% oxígeno y 1% dióxido de carbono, argón, hidrógeno, neón, helio criptón, xenón. Entre las sustancias presentes en una ciudad pueden encontrarse las siguientes:

**Tabla 1. Gases naturales e impurezas**

GASES NATURALES	IMPUREZAS
Oxígeno	Vaporaciones sulfúricas
Nitrógeno	Vaporaciones ácidas
Hidrógeno	Dióxido de carbono
Vapor de agua	Polvo (limas, sedientos, ceniza)
Argón	Sólidos minerales
Helio	Vegetales
Neón	Sólidos de animales
Kriptón	Micro organismos (bacterias, mohos)
Xenón	

El aire contiene vapor de agua que varía de 0% hasta 4% en las condiciones normales de atmósfera. El control del vapor, denominado humedad de agua es una de las funciones del aire acondicionado. La cantidad de los demás gases en las fórmulas para el cálculo del aire acondicionado son despreciables. Y para fines prácticos, ese aire que es una mezcla de varios elementos químicos, cumple con las leyes de los gases, precisamente como cualquier otro gas perfecto o ideal.

### **1.1.1. Especificaciones del aire a presión constante**

Las especificaciones del calor del aire a presión constante, no son constantes en todas las temperaturas. Para el aire acondicionado, el promedio del valor es de 0.24112 o simplemente 0.24 Btu por libra por °F. Para mayor resultado, la especificación del calor del aire a cualquier temperatura dada es determinada por esta fórmula:

$$(C_p) = 0.24112 + 0.000009t$$

Donde: t = temperatura de consideración

C<sub>p</sub> = Especificación de calor en el aire dado en Btu\*lb/°F

### **1.1.2. Concentración de vapor de agua en el aire**

La humedad es un término usado en referencia al vapor de agua contenida y mezclada en la atmósfera. Otra propiedad importante del aire es la habilidad de retener una cantidad de vapor de agua. La cantidad de vapor que puede retener el aire depende de la temperatura del mismo. Un aire seco, por ejemplo, depende de la cantidad de vapor que contenga y la temperatura con la cual se relaciona.

#### **1.1.2.1. Humedad absoluta**

El vapor de agua mezclado con el aire es conocido como humedad. El peso del vapor de agua contenido en un determinado volumen de aire es la humedad absoluta. El peso del vapor de agua es expresado en gramos por libra por pies cúbicos de aire ( $\text{gr}\cdot\text{lb}/\text{Ft}^3$ ). El valor numérico de la humedad absoluta no necesariamente refleja lo seco o húmedo del aire. La temperatura del ambiente también debe conocerse.

#### **1.1.2.2. Humedad relativa**

Se dijo anteriormente que el aire puede almacenar humedad en una cantidad según la temperatura a la que se encuentre. Si la cantidad de humedad que se encuentre en un volumen de aire, es suficiente para saber que si se la agrega más humedad a una presión y temperatura constante provocará que haya una precipitación, significa que el aire se encuentra en un estado de saturación. Cuando al aire es saturado, significa que ha llegado a un límite de humedad absoluta para la temperatura estudiada. Esto indica que tiene una humedad relativa de 100%.

La humedad relativa puede ser definida como el rango de la humedad absoluta a una temperatura existente; la humedad absoluta correspondiente al máximo de humedad capaz de retener a la misma temperatura. Puede ser determinado por medio de porcentaje mediante esta fórmula:

$$\text{Humedad relativa} = \frac{\text{humedad absoluta a una temperatura}}{\text{Capacidad de saturación a una temperatura}} \times 100\%$$

Otra manera de definir la humedad relativa es como el rango del peso de la humedad a un volumen de aire a una temperatura dada, al peso de la humedad necesaria para saturarlo a la misma temperatura.

La manera para aumentar la humedad relativa puede ser la siguiente:

- Reducir la temperatura con el contenido a una humedad constante.
- Incrementar la cantidad de humedad a una temperatura constante.

La forma de reducir la humedad relativa es el inverso de las condiciones que se mencionaron. También se puede definir la humedad relativa mediante las presiones de los rangos existentes en la mezcla entre aire y el vapor de agua en los dos estados, en la actual y el estado saturado. La ecuación que se relaciona a esta definición es la siguiente:

$$HR = \frac{P_m}{P_s}$$

### 1.1.3. Peso del aire

Los factores que afectan esta característica del aire son la temperatura, la presión barométrica, y la cantidad de humedad que contenga. El peso del aire es directamente proporcional a la presión barométrica e inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Para determinar el peso del aire a cualquier presión y temperatura, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$W = W_1 \left( \frac{459.6 + t_1}{459.6 + t} \right) \frac{p}{p_1}$$

Donde:

$W$  = peso del aire a una temperatura  $t$  y presión  $p$

$W_1$  = peso del aire a una temperatura  $t_1$  y presión  $p_1$

$P$  y  $p_1$  = presión barométrica en pulgadas en mercurio.

### 1.1.4. Volumen del aire

Los cálculos del aire acondicionado dependen del volumen de aire, no así del peso del mismo. Para convertir el peso en volumen, se puede seguir la regla de que el volumen es recíproco al peso en las mismas dimensionales, que son de pulgadas por pie cúbico por libra:

$$V = \frac{1}{W}$$

La capacidad de un sistema de aire acondicionado es determinada por el volumen de aire que se requiere mantener bajo condiciones de predeterminadas cargas de calor.

Para simplificar los cálculos, es posible encontrar un coeficiente que determine el volumen del aire en pulgadas por pie cúbico, que pueda absorber 1 Btu en el incremento de 1 °F en la temperatura. Este coeficiente se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{1}{c_p * W} \qquad K = \frac{V}{c_p}$$

Donde:

K = pies cúbicos de aire calentados por 1 °F por 1 Btu.

C<sub>p</sub> = calor específico de aire a una temperatura t.

W = libras por pies cúbicos de aire a una temperatura t.

V = pies cúbicos por libra a temperatura t.

## **1.2. Temperaturas específicas del ambiente**

### **1.2.1. Temperatura punto de rocío**

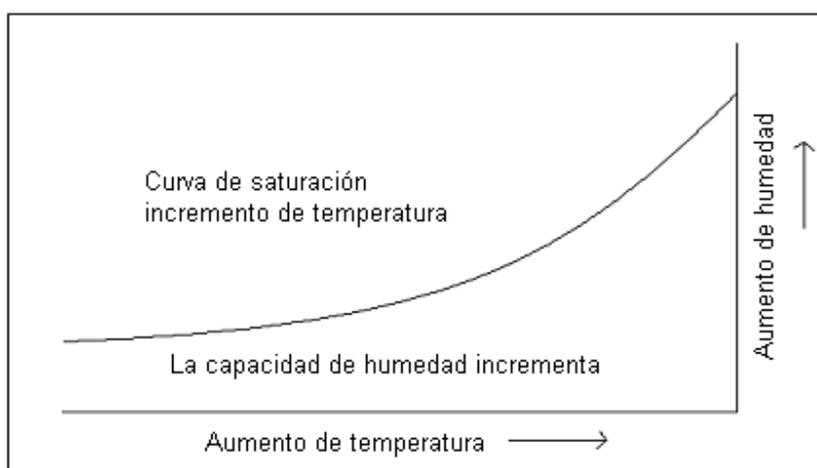
La temperatura de punto de rocío mide la cantidad de humedad contenida en el aire. Es la temperatura a la cual se vuelve saturado el aire si se enfría al nivel en el cual no se puede añadir o substraer humedad.

La temperatura de punto de rocío del aire no se puede cambiar sin un cambio en el contenido de humedad del mismo, indiferentemente de la cantidad de calor que se le agregue o se le extraiga por arriba del nivel punto de rocío. Si el aire es enfriado a una temperatura debajo de la existente especificada por punto de rocío, ocurre condensación y un nuevo punto de rocío es establecido.

El nuevo nivel establecido para el punto de rocío dependerá en la cantidad de calor extraída que estuvo contenido en el punto original en su estado saturado, en la antigua temperatura de punto de rocío.

La temperatura de punto de rocío puede ser reducida decreciendo la cantidad de vapor de agua de un peso requerido del aire. Y puede ser incrementada añadiendo vapor de agua al aire con una humedad relativa debajo del 100% en un estado no saturado.

**Figura 1. Curva de saturación punto de rocío**



La figura 1 muestra una curva de saturación, en donde el incremento en los puntos de los estados se da por la mezcla entre el aire y el vapor de agua. Así como cambia la temperatura, cambia la habilidad del aire de retener el vapor de agua. Este fenómeno se explica porque si una temperatura de 70 °F saturada es enfriada unos 5 °F, ocurre una precipitación. La pérdida del vapor de agua corresponderá a unos 5 °F y el aire seguirá saturado a los 65 °F que faltan. Así el estado de saturación continuará a lo largo de la reducción de la temperatura por debajo de la temperatura de saturación.

Cada nueva temperatura de saturación será el nuevo punto de rocío de la mezcla. Esto significa que algo del vapor de agua siempre quedará en el aire dependiendo de la temperatura que al final se enfrió. Añadiendo calor a la mezcla, aumentará la temperatura, pero la temperatura de rocío se mantendrá constante porque no se le está agregando vapor de agua a la mezcla. Cuando se regresa a la temperatura inicial a la cual se empezó a enfriar la mezcla, la temperatura de rocío sigue constante.

La temperatura de punto de rocío de cualquier mezcla de aire y vapor de agua puede ser determinada de las siguientes maneras:

- Al enfriar gradualmente una probeta llena de aire que va a ser evaluado, gravando la reducción de temperatura. La temperatura a la que empiece aparecer la humedad en la parte interna del recipiente será la temperatura de rocío.
- El punto de rocío también puede ser calculado por medio de la carta psicrométrica, por la relación entre la temperatura de bulbo seco y húmedo.

### **1.2.2. Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo**

La temperatura de bulbo seco mide la sensibilidad del calor en el aire, es decir la temperatura en el mismo, que puede ser expresada en grados centígrados y Fahrenheit. Se establece por medio de un simple termómetro de bulbo de mercurio seco.

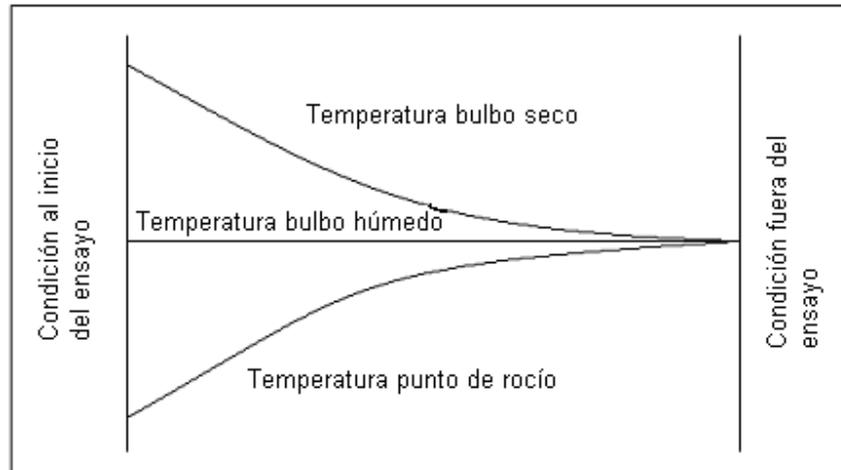
La temperatura de bulbo húmedo es la medida total del calor de aire y puede ser expresada por medio de grados centígrados o Fahrenheit. Se mide con un termómetro de bulbo seco con una mecha de algodón saturada con agua.

### **1.2.3. Relación entre la temperatura de rocío, bulbo seco y húmedo**

Por medio de la figura 2, se puede visualizar la relación entre las temperaturas de bulbo seco, húmedo y punto de rocío del aire que pasa en medio de un *spray* de agua donde el total de calor permanece constante. Tomando como referencia que la temperatura de bulbo húmedo se mantiene constante.

El aire entra en la cámara en una condición no saturada. La temperatura del agua es la misma que la del bulbo húmedo, entonces la condición de la escalera no cambia. Mientras el agua es absorbida el punto de rocío aumenta.

**Figura 2. Relación de temperatura controlada**



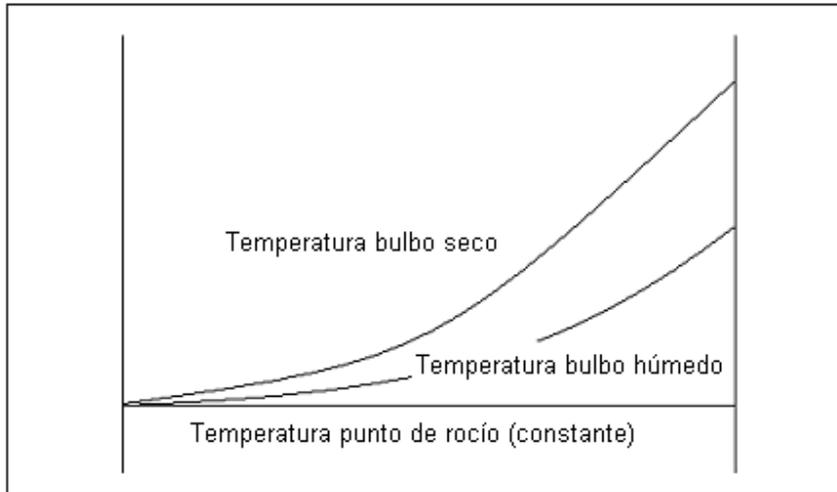
Al final el aire se vuelve saturado a la temperatura de bulbo húmedo, que también va hacer la temperatura de punto de rocío y la de bulbo seco. El proceso se conoce como humectación del aire saliente de la cámara.

Cuando el aire sale de la cámara de ensayo absorbe el calor de entorno, la relación entre las temperaturas de punto de rocío, bulbo seco y húmedo pueden observarse en la figura 3. Asumiendo que no se absorbió humedad, el punto de rocío permanecerá constante.

La sensibilidad del calor del aire aumentará haciendo que aumente la temperatura de bulbo seco y húmedo.

La temperatura del bulbo seco aumenta más que la del húmedo debido a que no se le agregó humedad, entonces no hubo una conversión de calor sensible a calor latente.

**Figura 3. Relación de temperatura fuera del ensayo.**



### **1.3. Leyes psicrométricas**

Los principios que gobiernan la relación entre el aire puro y el vapor de agua pueden explicarse por medio de un apartado del señor Willis H. Carrier. Estas leyes revelan las bases en las cuales son fundamentados los comentarios acerca de la humedad relativa y el comportamiento de la temperatura y son las siguientes:

- Cuando el aire seco es saturado adiabáticamente, la temperatura es reducida y la humedad absoluta es incrementada. Decae la sensibilidad calórico equitativamente que sube el calor latente debido a la evaporación.

- Cuando el contenido de humedad es incrementado adiabáticamente, la temperatura es reducida simultáneamente hasta que la presión de vapor corresponda a la temperatura. Esta última temperatura es definida como *la temperatura de saturación adiabática*.
- Si se toma una columna de agua aislada y se deja evaporar libremente en el aire, asume la temperatura de saturación adiabática del ambiente. La verdadera temperatura de bulbo húmedo es idéntica a la temperatura de saturación adiabática.
- La verdadera temperatura de bulbo húmedo del aire depende enteramente del total del calor latente y sensible, y es independiente de las relaciones proporcionales. En otras palabras, la temperatura de bulbo húmedo del aire es constante, al tomar en cuenta que el total de calor del aire es constante.

### **1.3.1. Carta psicrométrica**

La psicometría maneja la relación entre el aire y el vapor de agua o humedad. Esta relación es descrita por una serie de curvas, las cuales conforman la carta psicrométrica. Hay varias formas de cartas pero en ellas sólo se consideran sus principales características. Se debe mencionar que tres propiedades independientes como la presión, temperatura y composición de la mezcla, determinan el estado de esta mezcla binaria.

La carta sicrométrica básica es una gráfica de la relación de humedad (ordenada) en función de la temperatura de bulbo seco (abscisa) y como parámetros la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo y la entalpía de la mezcla por masa de aire seco. Si se fija la presión total para la cual se construye la carta, se pueden trazar sobre ella líneas de humedad relativa constante y de temperatura de bulbo húmedo, porque para una determinada temperatura de bulbo seco están fijas la presión total y la relación de humedad. Por la presión total se podría construir una segunda ordenada que indique la presión parcial del vapor de agua. De la misma manera, sería posible incluir el volumen específico de la mezcla y la entropía en la misma carta.

La mayoría de las cartas sicrométricas proporcionan la entalpía de una mezcla de aire y vapor por kilogramo de aire seco; por lo regular estos valores son tomados suponiendo que la entalpía del aire seco es cero a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Entonces, el valor que se utiliza en la carta sicrométrica es:

$$h \equiv h_a - h_a(-20^{\circ}\text{C}) + \omega h_v$$

Donde:  $h$  = entalpía total

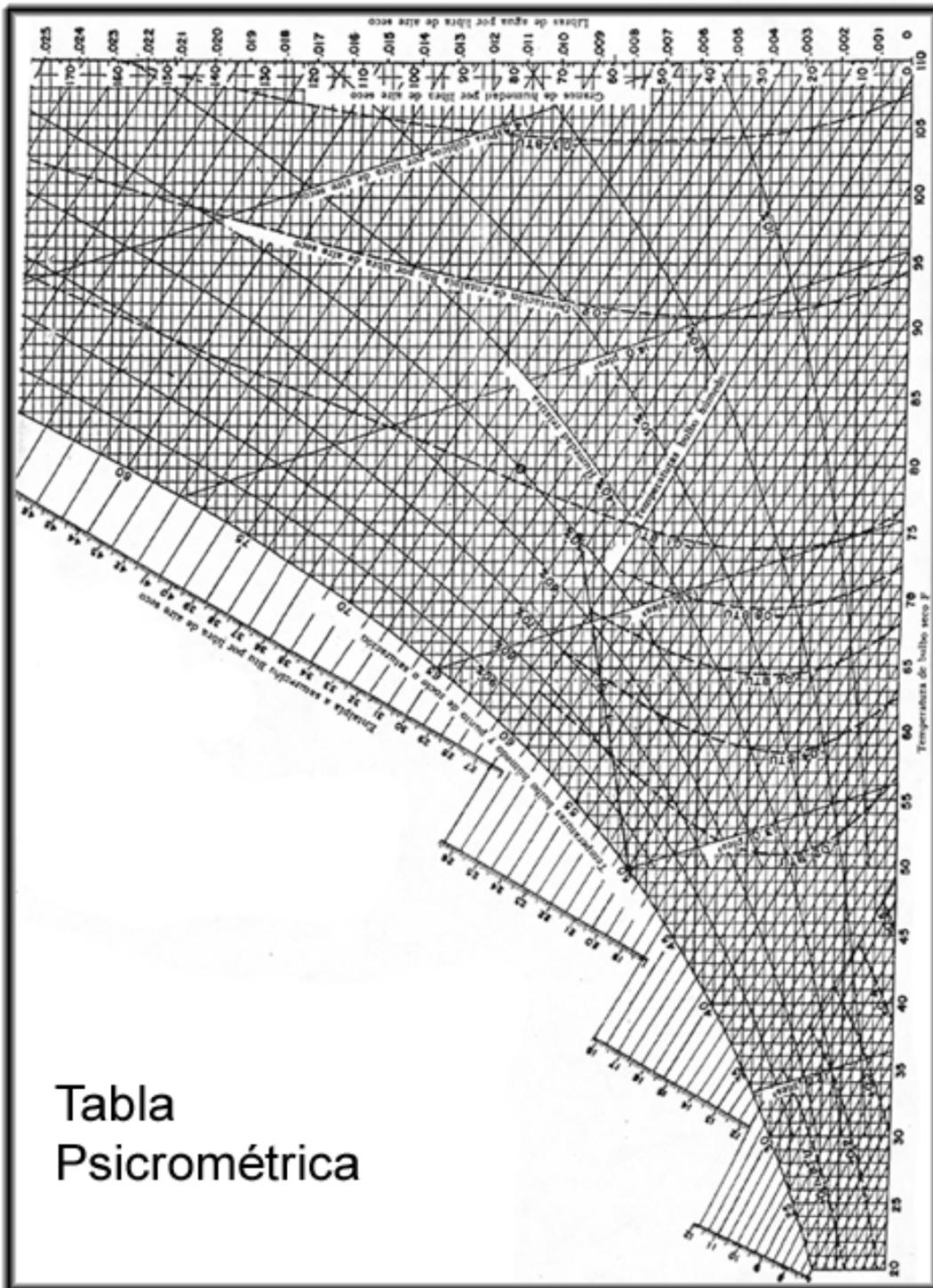
$h_a$  = entalpía de estado inicial

$\omega$  = relación de humedad

$h_v$  = entalpía del volumen específico

Este procedimiento es satisfactorio porque en general sólo interesan las diferencias de entalpía. La carta trazada en la gráfica 4 también indica la zona de comodidad para el humano, como el intervalo de condiciones que son más convenientes para el bienestar. Un acondicionador de aire, para considerarse adecuado, debe entonces poder mantener un ambiente dentro de la zona de confort. Cualesquiera que fueran las condiciones atmosféricas.

Figura 4. Carta psicrométrica.



### 1.3.2. Volumen de aire requerido para mantener la humedad relativa

El propósito del proceso de humectar el aire es mantener constante la humedad relativa dentro de un determinado espacio, sin necesidad de enfriar el agua en donde recircula el aire. Dentro de condiciones de humedad la temperatura de bulbo seco no se puede controlar en el espacio que se encuentre. Para determinar el volumen del aire requerido para un espacio dado, se necesita saber la humedad relativa y la carga de calor.

La acción del aire, que se encuentra saturado a la temperatura de bulbo húmedo, en la cámara humedecida absorbe el calor del espacio humedecido y elevar la temperatura de bulbo seco, en consecuencia baja la humedad relativa. Para reducir la humedad relativa al nivel deseado, la temperatura de bulbo seco debe ser incrementada de manera proporcional. En la tabla 2 se muestra la depreciación del punto de rocío correspondiente a varias humedades relativas. Por ejemplo, si la temperatura de punto de rocío final debe ser 10.8 °F arriba del punto de rocío para mantener un 70% de humedad relativa. El calor necesario para elevar la temperatura de punto de rocío que es absorbido por la humedad del espacio.

El volumen de la humedad en el aire necesario para mantener constante la humedad relativa es determinado por esta ecuación:

$$\frac{\text{Carga en Btu por min} \times 56}{\text{PR correspondiente a HR}} = \text{pies cúbicos por min.}$$

**Tabla 2. Depreciación del punto de rocío**

Humedad relativa %	Depresión (°F) punto de rocío
100	0
95	1.8
90	3.2
85	4.9
80	6.8
75	8.7
70	10.8
65	12.9
60	15.2
55	17.6
50	20.4
45	23.3
40	26.5

### **1.3.3. Volumen de aire requerido para absorber la carga de calor**

Para determinar el volumen de aire requerido para mantener la temperatura deseada y las condiciones de humedad en un medio enfriado, se debe conocer las siguientes propiedades:

- Carga de calor (Btu por min.)
- Humedad relativa (porcentaje)
- Temperatura de bulbo seco (grados F)

Al conocer estos datos es posible calcular el volumen que se desea, teniendo como herramienta la tabla 2.

#### **1.3.4. CARGAS DE CALOR.**

Los factores que enlistados en la tabla 3, pueden ser considerados en los cálculos de las cargas de calor para deshumedecer o enfriar sistemas deseados.

**Tabla 3. Factores para cargas de calor.**

<b>Calor sensible:</b>		
Conducción	Paredes externas	$A \times U \times t_d$
	Vidrios externos	$A \times U \times t_d$
	Piso	$A \times U \times t_d$
	Techo	$A \times U \times t_d$
	Paredes internas	$A \times U \times t_d$
Luz solar	Paredes sur y oeste	$A \times f \times 60$
	Ventanas sur y oeste	$A \times f \times 60$
	Terrazas	$A \times f \times 60$
	Tragaluz solares	$A \times f \times 60$
Equipo mecánico y eléctrico	Luces eléctricas	$\text{Watts} \times e_E$
	Motores eléctricos	$H_p \times e_M$
Ocupantes	Personas	$\text{No.} \times h$
Infiltración	Volumen de cuarto x número de cargas	$\text{lb.} \times 0.24 \times t_d$
<b>Calor latente:</b>		
Personas	Descansando	$\text{No} \times L_d$
	Activas	$\text{No} \times L_a$
Infiltración	Volumen del cuarto x cargas x (gramos por libra afuera – gramos por libra adentro)	BTU.

A continuación se especifican las variables que se están mencionando en cada uno de los puntos correspondientes:

A = área

U = coeficiente de transmisión de calor

$t_d$  = temperatura diferencial entre condiciones exteriores e inferiores o temperaturas altas.

f = factor de luz solar. Este valor varía dependiendo la superficie dada en Btu.

Por pies cúbicos.

- Ventanas sin protección\_\_\_\_\_3.0
- Ventanas con protección\_\_\_\_\_1.5
- Ventanas con pestañas\_\_\_\_\_0.5
- Tragaluz horizontal\_\_\_\_\_1.0
- Tragaluz vertical\_\_\_\_\_1.5
- Pared normal\_\_\_\_\_0.1
- Pared de concreto\_\_\_\_\_0.5
- Terraza\_\_\_\_\_0.15

e = equivalente mecánico y eléctrico.

- $e_E = 3.4$  Btu. Por hr x watt
- $e_M = 2.545$  Btu. Por hr x Hp

h = factor de calor sensible por persona que es igual a 225 Btu por persona

L = factor de calor latente por persona.

- $L_d = 175$  Btu por persona, descansando.
- $L_a = 450$  Btu por persona activa.

Es necesario notar la conducción no se debe de tomar en cuenta cuando se calculan cargas para requerimientos de humedad, excepto cuando se requiere una humedad relativa de 75% o mayor. También las cargas se deben de calcular por áreas de paredes que no sean expuestas al sol.

#### **1.4. Carga de refrigeración para enfriar o deshumedecer**

Los factores de carga de calor que deben ser considerados a la hora de requerimientos de refrigeración o sistemas de enfriamientos son los siguientes:

- Total de calor ganado en el espacio a ser enfriado.
- Calor ganado por aire fresco. Usualmente el porcentaje aceptado es de 5 a 10% de aire fresco que es pasado por el ventilador por los serpentines. Esto no sólo provee cambios periódicos en el aire si no que también permite que se desarrolle una presión positiva en el espacio acondicionado.

El calor ganado debido a la entrada de aire fresco es determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{Btu} = \frac{\text{Volumen aire fresco} \times (H_{fa} - H_{dp})}{\text{Pies cúbicos por libra}}$$

Donde:

$H_{fa}$  = total de calor contenida en 1 libra de aire fresco a temperatura ambiente.

$H_{dp}$  = total de calor contenido en condiciones de temperatura de bulbo seco.

Otro factor que debe incluirse son las pérdidas de calor del aparato (deshumecedor) debido a las condiciones y la bomba de agua que se está usando. El total de calor ganado por el sistema se da al sumar cada factor de ganancia de calor puntual.

### **1.5. Aparato de aire acondicionado**

El aparato de aire acondicionado, es un sistema de refrigeración que hace el proceso de remover el calor de cualquier sustancia. Esto se logra mediante la repetición constante de transformación del estado líquido al gaseoso y viceversa de una sustancia. Este agente es conocido como refrigerante, y es el medio por el cual se produce el efecto de enfriamiento. Este aparato de aire acondicionado consta de varias partes esenciales para su funcionamiento, que se describirán en apartados siguientes.

### 1.5.1. Componentes básicos

Los componentes esenciales para un sistema de aire acondicionado de ciclo cerrado son evaporador, compresor, condensador y dispositivo regulador del líquido. Cuando estos componentes funcionan bien el sistema de refrigeración opera a dos niveles definidos de presión, como se puede observar en la figura 5. Por definición, el lado de alta presión del sistema incluye todos los componentes que actúan por encima de la presión de condensación. Esto comprende el lado de descarga del compresor, el condensador, el depósito y todos los tubos de interconexión al sistema regulador. Para propósitos prácticos, la totalidad del compresor se considera el lado de *alta presión*.

El lado de baja presión del sistema comprende todos los componentes que funcionan a la presión de evaporación o por debajo de ésta. Se incluyen en el lado de baja presión el dispositivo regulador (válvula de expansión), el evaporador y todos los tubos de interconexión, hasta la succión del compresor. Para propósitos prácticos, el dispositivo regulador se considera parte del lado de *baja presión*.

El lado de alta presión se conoce comúnmente como presión de carga o presión de descarga. El lado de baja presión se denomina presión inversa o presión de succión, o de aspiración

Para resumir los componentes mencionados, se puede decir que se necesita lo siguiente:

- Un refrigerante para absorber el calor indeseable
- Evaporador que absorba el calor a extraer de la sustancia al refrigerante.
- Compresor que expanda o comprima el refrigerante a través del sistema y establezca simultáneamente los dos niveles de presión necesarios para la operación del mismo
- Condensador que elimine el calor absorbido de la sustancia antes y lo transfiera a otro medio, licuando de nuevo el refrigerante.
- Un dispositivo regulador del líquido para estrangular a presión constante la circulación del refrigerante.

Otro componente utilizado a menudo es un depósito separado que se usa para almacenar el refrigerante. La eficiencia del sistema es evaluada por medio del descenso de la temperatura de bulbo seco del aire que pasa por el sistema. La eficiencia de la humectación es expresada por la siguiente ecuación:

$$E_h = \frac{BS_1 - BS_2}{BS_1 - BH} \times 100$$

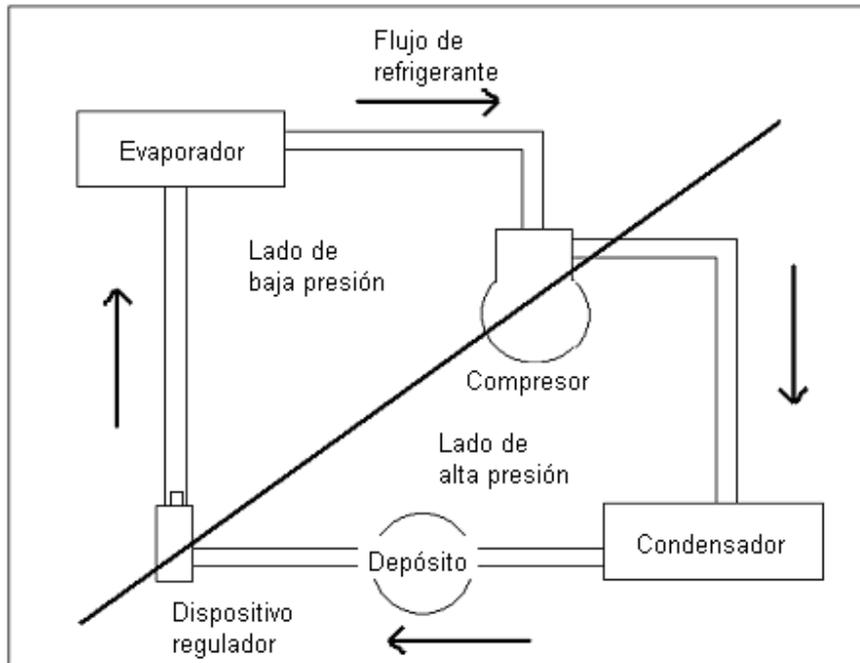
Donde:

$BS_1$  = temperatura de bulbo seco de aire entrando.

$BS_2$  = temperatura de bulbo seco de aire saliendo.

$BH$  = temperatura de bulbo húmedo de aire entrando.

**Figura 5. Componentes básicos sistema de refrigeración**

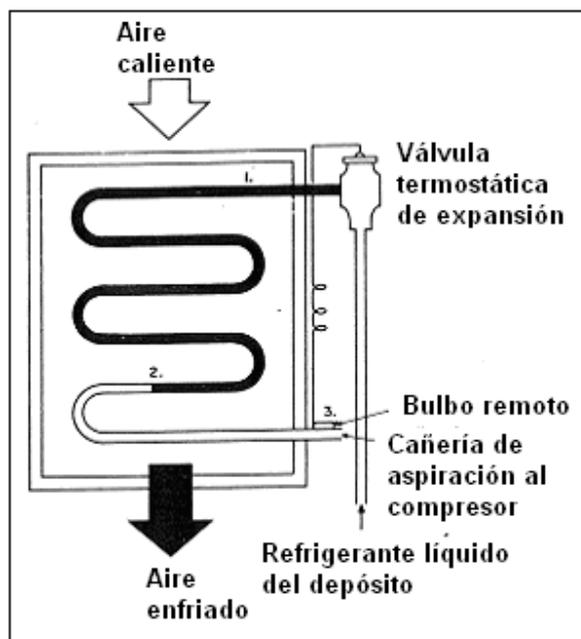


### 1.5.1.1. Evaporador

El evaporador es el dispositivo en el cual hierve el refrigerante para extraer el calor del medio que lo rodea. Las serpentineras enfriadoras, las unidades enfriadoras y el recinto donde se forman los cubitos de hielo, en las heladeras pueden considerarse como evaporadores. Para realizar esta función, por lo general el evaporador está arrollado en forma de *serpentina*, o bobinado ida y vuelta, o sobre si mismo varias veces.

Se puede observar que en la Figura 6 es posible mantener la apropiada velocidad y la caída de presión del refrigerante dentro de límites definidos. La velocidad importa mucho porque el refrigerante debe tener fuerza suficiente para vencer el rozamiento de las paredes de la serpentina, a fin de evitar que se adhiera a las paredes una película de refrigerante y aceite lubricante. Además, la velocidad debe ser tal que el aceite se desplace en forma continua con el refrigerante, pero no con tanta rapidez como para causar un gran descenso de presión, puesto que esto produciría una carga adicional en el compresor.

**Figura 6. Caídas de presión en un evaporador.**



Básicamente, hay dos tipos de serpentina para evaporadores. El de envuelta o inundado y el seco o de expansión directa. El de envuelta se diseña para transportar un nivel constante de líquido refrigerante dentro del evaporador, manteniéndose dicho nivel por medio de una válvula de flotante u otro nivel apropiado. El tipo seco o de expansión directa se diseña para manejar sólo la cantidad de refrigerante demandado por la carga. El refrigerante líquido pasa al evaporador de expansión directa a través de una válvula de expansión en la cantidad necesaria para que todo el líquido se convierta en gas antes que el refrigerante alcance el final de succión del evaporador.

#### **1.5.1.2. Compresores**

Al compresor se le denomina a menudo el corazón del sistema de refrigeración. Proporciona al sistema la fuerza necesaria para drenar el vapor desde el evaporador, condensarlo y mantener la circulación.

Para explicar su funcionamiento se puede decir que el vapor a baja temperatura proveniente del evaporador circula a través de la línea de succión hacia el compresor. Éste comprime el vapor a baja temperatura, elevando la presión y la temperatura. El vapor caliente y a alta presión circula hacia el condensador, donde entrega su calor al medio ambiente o a otro luego que se condensa. Debido a la reducción de la temperatura resultante, circula calor desde el espacio a enfriar en el evaporador y se vaporiza mayor cantidad de líquido refrigerante. El vapor que contiene el calor absorbido circula hasta el compresor, donde se le comprime y aumenta su temperatura.

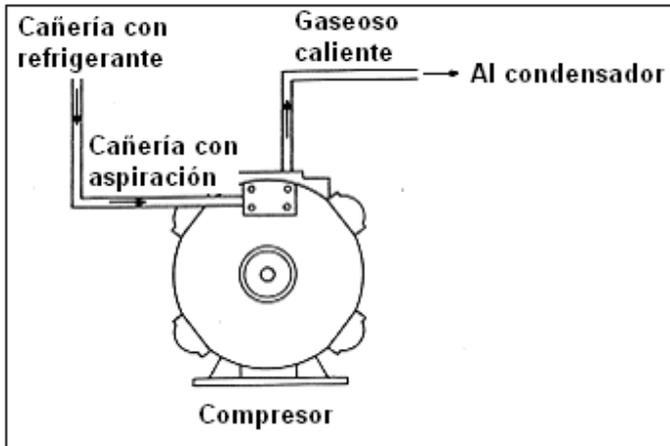
El vapor a alta temperatura, que contiene el calor absorbido en el evaporador, se descarga en el condensador, donde el calor circula el vapor caliente hacia el aire o agua más fríos que rodean al condensador.

Hay dos grupos principales de compresores los de desplazamiento positivo y los dinámicos. Los tipos de desplazamiento positivos son aquellos que comprimen un fluido dentro de un espacio cerrado; en esta categoría entran los compresores reciprocantes o alternativos y de tipo rotativo. El tipo dinámico son los que poseen paletas giratorias o impulsores que toman el fluido y luego lo expelen con gran fuerza, en esta categoría entran los que pertenecen a los compresores centrífugos.

La compresión puede llevarse a cabo en una operación simple, doble o múltiple. La compresión de una sola etapa es aquella donde sólo funciona un cilindro, con la salida de su válvula de descarga que alimenta directamente el depósito de fluido, en este caso el condensador.

La compresión de dos o tres etapas es aquella en la cual la descarga de un cilindro alimenta la válvula de succión de un segundo cilindro, donde se produce una compresión adicional. La descarga del segundo cilindro alimenta luego el depósito de fluido. La compresión de etapas múltiples es una expansión de la compresión de dos etapas, con tres o más cilindros en funcionamiento. La figura 7 muestra un compresor típico y su sistema en lo más simple.

**Figura 7. Diagrama guía del compresor**



### **1.5.1.3. Condensadores**

Los condensadores son intercambiadores de calor diseñados para transferir del calor absorbido por el refrigerante, al calor de compresión agregado por el compresor. Esto se lleva a cabo condensando el gas caliente descargado por el compresor y transfiriendo el calor a algún medio externo, generalmente agua o aire.

El diagrama de la figura 8 indica el proceso de un refrigerante, tal como el R-12, cuando pasa a través del condensador. Este proceso se describe a continuación:

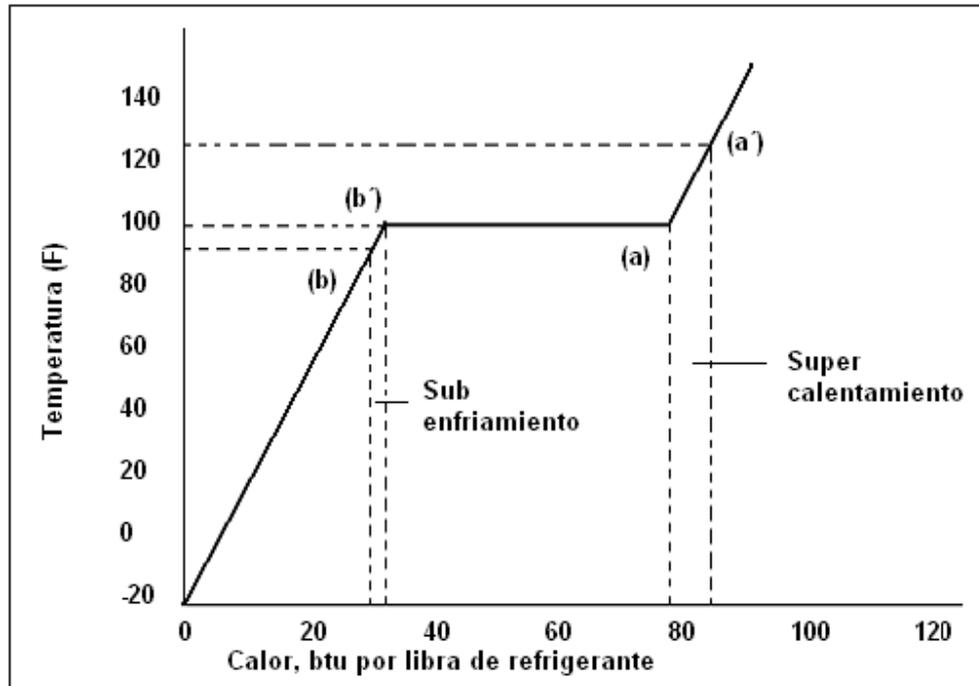
- a. El punto (a) representa una presión de  $9.6 \text{ kg/cm}^2$  y una temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , es un gas *supercalentado*.
- b. El punto (a') representa el gas después que se ha enfriado parcialmente. Este punto se denomina estado saturado, porque un posterior enfriamiento da como resultado la formación de niebla, o gotas de líquido.
- c. El trazo (a-a') muestra que eliminando 1.4 calorías el gas supercalentado se pasa a la condición de saturado. Este proceso se denomina *súper-enfriamiento*.
- d. El trazo (a'-b') indica que cualquier otra eliminación de calor no cambia la temperatura del refrigerante. A lo largo de esta línea el refrigerante cambia de una forma gaseosa a una líquida.
- e. El punto (b') representa al refrigerante cuando se ha transformado totalmente en líquido.
- f. El trazo (b'-b) indica el enfriamiento adicional del refrigerante que se conoce como *sub-enfriamiento*.
- g. El punto (b) representa al refrigerante cuando abandona el condensador.

Un condensador deberá tener superficie y capacidad suficiente para producir un sub-enfriamiento del refrigerante líquido desde el momento en que se condensa hasta que abandona el condensador. El sub-enfriamiento es necesario para asegurar el suministro de líquido al depósito de expansión. Si no hay sub-enfriamiento, un ligero calentamiento en la línea del líquido puede producir la formación de gas y por consiguiente, degradar el desempeño del sistema.

Los condensadores para refrigeración se dividen en dos tipos básicos, enfriados por aire y enfriados por agua. Ambos trabajan bajo el principio de aumentar el contenido de calor sensible del medio de enfriamiento.

El medio de enfriamiento aumenta su temperatura cierta cantidad de grados, lo suficiente para absorber el calor tomado del refrigerante que se condensa

Figura 8. Comportamiento del gas R-12 al pasar por el condensador



#### 1.5.1.4. Dispositivo regulador de líquido

El principal problema de control, en los modernos sistemas de aire acondicionado convencional, es el método de expansión de un líquido a elevada presión en una mezcla de gas húmedo a baja presión, la proporción exacta a la velocidad de evaporación en el evaporador. Los sistemas modernos emplean una variedad de dispositivos para controlar el flujo de refrigerante, y son los siguientes:

- *Tubos capilares*: restringen o controlan el flujo de refrigerante en el evaporador. Funciona con el principio de que los líquidos pasan a través de él más fácil que el gas. Reducen la presión del refrigerante del lado de alta presión al lado de baja presión.
  
- *Válvulas de expansión de presión constante*: se diseñaron para operar a la presión del evaporador y mantenerla constante, puesto que la presión del refrigerante en el evaporador es determinada por la temperatura de éste.
  
- *Válvula termostática de expansión*: es un dispositivo de precisión diseñado para regular la velocidad de flujo del líquido, en la proporción exacta a la velocidad de evaporación del líquido refrigerante. Esta válvula responde a la temperatura del gas que abandona el evaporador y a la presión en el evaporador.
  
- *Válvula de flotante de alta presión*: opera por el nivel del líquido refrigerante en el lado de alta presión del sistema. La válvula de flotante de alta presión permite la circulación de refrigerante en el evaporador a la misma velocidad a que se bombea el gas fuera del evaporador, mediante el compresor.

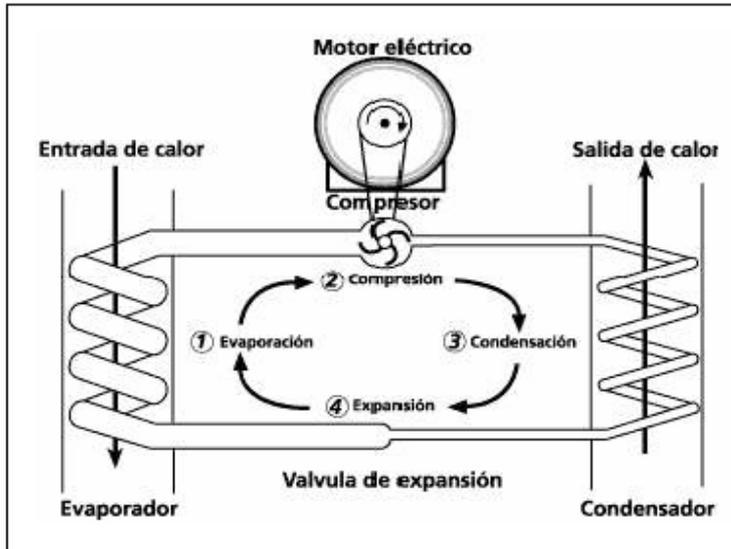
## **2. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE REFRIGERACIÓN DE AUTOMÓVILES**

### **2.1. Bombas de calor compactas**

Se está desarrollando una bomba de calor miniatura para un amplio campo de aplicaciones de aire acondicionado y refrigeración, para automóviles, camiones y embarcaciones. La bomba de calor está basada en el sistema de absorción y usa refrigerantes como el Bromuro de Litio/Agua o Amoniaco/Agua. La bomba de calor miniatura utiliza la transferencia de calor y de masa por el flujo del fluido en micro canales. Al usar micro canales en paralelo, las bombas de calor pueden ser reducidas radicalmente en tamaño y peso comparado con los sistemas convencionales. Para el sistema de ciclo de absorción con Bromuro de Litio/Agua, el tamaño de la bomba de calor puede ser reducido 60 veces, comparable con una bomba en un sistema convencional.

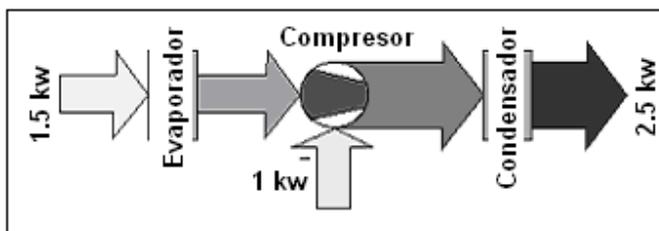
La ventaja fundamental de la bomba de calor consiste en que es capaz de suministrar más energía de la que consume como se presenta en la figura 9, que es un diagrama del sistema en funcionamiento en su expresión más simple. Esta aparente contradicción con uno de los principios más sólidos de la termodinámica, se explica por el hecho de que el equipo recupera energía "gratuita" del ambiente exterior.

**Figura 9. Diagrama del sistema de bomba de calor**



Por ejemplo, una bomba de calor puede proporcionar a un local 2,5 Kwh. absorbiendo de la red tan solo 1 Kwh. Los restantes 1,5 Kwh. se obtienen gratuitamente del aire exterior.

**Figura 10. Eficiencia de la bomba de calor**



La figura 10 representa un diagrama de bloques que ilustra la eficiencia, o en otras palabras el rendimiento, de una bomba de calor. Las cifras indicadas en la figura son:

1. Energía total entregada por el condensador al local (2,5 Kwh.)
2. Energía "no gratuita" tomada de la red eléctrica por el compresor (1 Kwh.)
3. Energía "gratuita" tomada del aire exterior por el evaporador (1,5 Kwh.)

La eficiencia de esta bomba de calor está expresada por el cociente entre la energía entregada al local (efecto útil) y la energía absorbida de la red eléctrica, es decir:

$$\text{Eficiencia} = 2,5$$

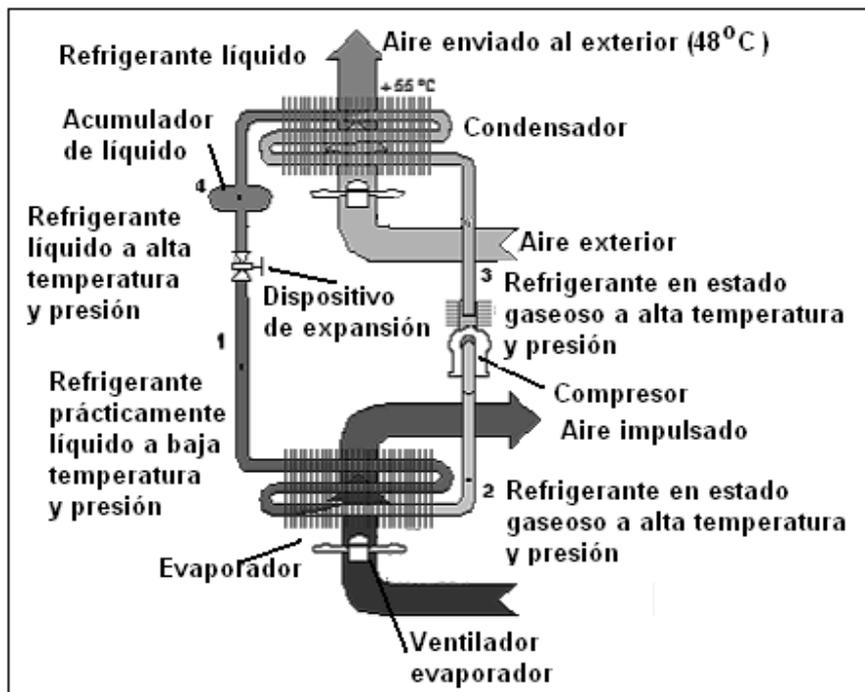
En consecuencia, la bomba de calor es potencialmente de gran interés para el usuario, dado que éste paga por una cantidad de energía menor que la aportada por el equipo para calentar el local.

Puede deducirse la conveniencia de utilizar equipos acondicionadores con bomba de calor, para su funcionamiento tanto en verano como en invierno. Además, un equipo con bomba de calor sólo supone, aproximadamente, un 20% de incremento, frente a la inversión necesaria para un acondicionador convencional exclusivamente para el verano.

### 2.1.1. Diseño

La mayoría de los componentes de la bomba de calor son hechos de hojas de metal y plástico que son maquinados con micro canales. Las hojas individuales son utilizadas para absorción, deserción, condensación, evaporación e intercambiador de calor, estas hojas se apilan juntas para formar un sistema integral. En la figura 11 se encuentra un esquema de las partes esenciales para su funcionamiento.

Figura 11. Esquema de funcionamiento bomba de calor



### **2.1.2. Beneficios**

- El sistema es más pequeño y menos pesado que con tecnología convencional. Para un automóvil, el sistema podría ser 10% más pequeño y 25% más ligero.
- La bomba de calor no toma potencia del motor, en lugar de eso es actuado por el calor que ya no utiliza el motor o con un microcombustor integrado para vehículos eléctricos. y No se usan refrigerantes.
- La bomba de calor puede ser colocada en cualquier parte del vehículo, o podría ser dividida en dos o más unidades, para hacer un control de distribución del clima. Los sistemas de distribución eliminan la necesidad de ductos.
- La operación del sistema es independiente de la orientación. Esto permite que se pueda usar en barcos u otros transportes donde no siempre es posible un nivel de orientación.
- Al no usar refrigerantes se elimina la contaminación por medio de los CFC.

## **2.2. Aire acondicionado con líquido sobrealimentado**

Los automóviles sin aire acondicionado son la excepción a la regla hoy en día, a muchos conducir en verano sin Aire acondicionado (A/A) les parece increíble. Por ejemplo los equipos de A/A juegan un papel importante durante el invierno, tienen un mejor funcionamiento. Pero también reducen el funcionamiento del motor y disminuye el rendimiento de combustible, especialmente en vehículos pequeños.

La falta de confort toma más importancia cuando se trata de mejorar el rendimiento de combustible y el uso de una amplia variedad de nuevas tecnologías automotrices, como son los vehículos híbridos. En tal caso se ha encontrado una manera de reducir la falta de confort, se ideó un concepto de recuperación de calor en un intercambiador y lo adaptaron al ciclo de enfriamiento de un acondicionador de aire automotriz, dando como resultado una mejora sustancial en su eficiencia.

Esta invención denominada Sistema de Aire Acondicionado de Líquido Sobre-alimentado es esencialmente un intercambiador de calor que sobrealimenta refrigerante a través del evaporador del sistema, incrementando su capacidad de enfriamiento. El exceso de líquido que sale del evaporador es llevado al intercambiador de calor, protegiendo el compresor de la unidad y disminuyendo su capacidad de trabajo, el cual a su vez disminuye la carga del motor, que debe accionar el compresor así como el tren de impulsión cuando el A/A está encendido.

Si la industria automotriz está interesada en modificar su sistema de enfriamiento, el diseño debe incluir un intercambiador de calor de líquido sobrealimentado, la tarea no debe ser demasiado difícil porque este dispositivo no ocupa mucho espacio. Algunos automóviles ya cuentan con un acumulador en su sistema de enfriamiento, la adición de líquido sobrealimentado sería algo fácil.

El interés del uso de refrigerantes que no contienen clorofluorocarbonos (CFC) ha venido en aumento; sin embargo, la mayoría no enfrían con tanta eficacia como los que contienen CFC, y se está intentando encontrar maneras de mejorar la eficacia de los equipos de A/A. Se está estudiando el ciclo termodinámico para encontrar maneras de mejorar la eficiencia de los refrigerantes sin CFC.

Lamentablemente los daños ambientales (agotamiento de la capa de ozono y el calentamiento global) causados por el escape de refrigerantes en los equipos de A/A del automóvil han llamado más la atención y preocupación que el rendimiento energético. Si un automóvil tiene 100 caballos de fuerza, se ocupan 5 para hacer funcionar el motor del A/A, esto no parece ser muy grande. Sin embargo, el mismo auto a la velocidad de crucero requiere solamente 25 caballos de fuerza, entonces relativamente hablando, esos cinco caballos de fuerza representan una demanda mucho más grande en el motor.

La eficiencia energética del aire acondicionado llegará a ser más importante tanto para vehículos eléctricos como vehículos híbridos. Cada Kilowatt-hora de energía de la batería usada por el aire acondicionado es un Kilowatt-hora menos para accionar el vehículo eléctrico. Operando el aire acondicionado, la recarga de un vehículo eléctrico podría caer considerablemente de 160 a 120 Km. lo cual pondría en duda su viabilidad. Se ha estimado que si la tecnología de líquido sobrealimentado fuera puesta en los automóviles por la industria automotriz en Estados Unidos, el dispositivo podría ahorrar 1300 millones de litros de combustible por año y reducir las emisiones de dióxido de carbono. El sistema también podría ayudar a extender el uso de vehículos eléctricos.

### **2.3. Sensor de contaminación**

Se ha desarrollado un dispositivo que tiene como función limpiar el aire que entra al interior del automóvil. Este avance tecnológico está basado en un proceso fotocatalizador que reduce significativamente los agentes contaminantes dañinos en el interior del vehículo, ofreciendo a los ocupantes aire más limpio, saludable y más agradable para respirar. El nuevo desarrollo promete incrementar el confort interior, reducir la fatiga al conducir y mejorar el ambiente interior para personas que sufren de alergias.

En condiciones de tránsito denso, el aire tiene un alto contenido de agentes contaminantes por la emisión de los autos, tal como sulfuros, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. Estos contaminantes pueden causar fatiga, falta de confort y puede contribuir a problemas respiratorios si se inhalan por periodos prolongados. También gracias a un nuevo limpiador de aire, es ahora posible proporcionar el incremento de confort a los ocupantes removiendo una cantidad considerable de gases y partículas que antes entraban al vehículo e inhalaban los pasajeros. Usando luz ultravioleta para activar una reacción fotocatalítica con Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ), los contaminantes orgánicos así como el humo no quemado de la gasolina son completamente eliminados. Adicionalmente los contaminantes inorgánicos como dióxidos de sulfuro son altamente reducidos. Por separado se ha desarrollado un sensor de contaminantes que se encuentra en la toma de aire capaz de detectar Óxidos de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y otros contaminantes. Cuando el sensor detecta una cantidad excesiva de contaminantes en el aire, el flujo de aire es temporalmente aislado y limpiado en un instante. Durante este corto proceso de eliminación de contaminantes el sistema de aire acondicionado está programado para estar en modo de recirculación para asegurar que el aire se encuentre limpio.

### **2.3.1. Beneficios del sensor**

- Además de su pequeño tamaño, volumen, el sensor se integra fácilmente al sistema de A/A.
- Completa la eliminación de componentes orgánicos volátiles, nitrógeno y óxidos de Sulfuro

- Elimina bacterias, matándolas en el filtro, Decrece 20% la concentración de contaminantes y 40% los malos olores.
- Regeneración del fotocatalizador (TiO<sub>2</sub>) por sí mismo asegurando un largo periodo de vida, 70% de eficiencia después de 6 minutos en el modo de recirculación
- Encendido automático asociado con el sensor de contaminación, de 1.8 segundos
- Está previsto que el nuevo limpiador de aire tenga un auge importante y pueda ser combinado con un reciente lanzamiento del Sistema de Odorización que permite a los ocupantes del vehículo tener un ambiente placentero ya que se puede seleccionar una fragancia preferida.

### **2.3.2. Beneficios del sistema de odorización**

- Disfraz de olores: reducción de malos olores.
- Efectos psicológicos: tónicos, mantener despierto al conductor, etc.
- Preferencias de olor personales.
- Posibilidad de escoger: apagado, encendido o intensidad de olor.
- Sensación limpia y homogénea de la cabina.

## **2.4. Sistema de clima multizona**

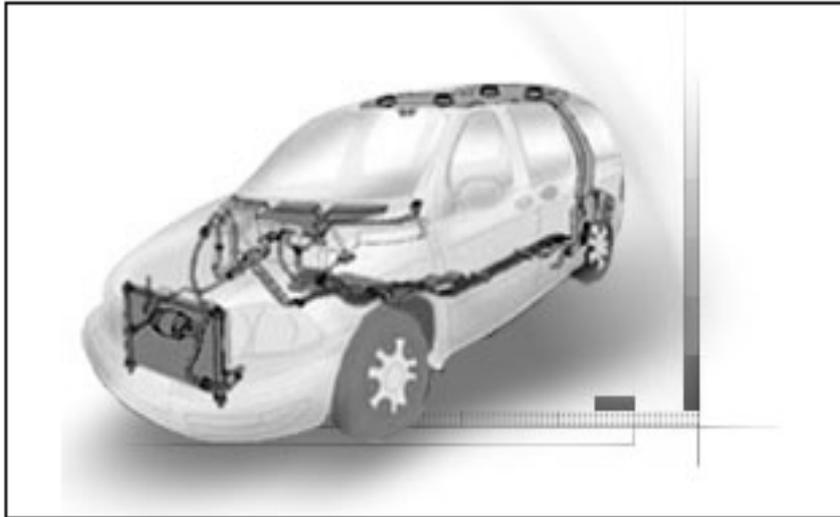
Este sistema provee niveles de confort personalizado para múltiples pasajeros, permite al conductor y a los pasajeros un control individual y fácil ajuste de la calefacción o A/A dentro del vehículo. Dependiendo del nivel de personalización del fabricante el conductor y los pasajeros serán capaces de crear ajustes personales hasta en cuatro zonas del vehículo.

### **2.4.1. Sistema modular flexible**

Este sistema permite a los fabricantes construir diferentes niveles de personalización dentro del vehículo usando un sistema básico que puede ser fácilmente modificado para trabajar dentro de una variedad de opciones.

Dentro de un vehículo, se pueden crear hasta cuatro zonas de temperatura donde llegan los ductos desde una unidad principal, asegurando que los pasajeros de los asientos posteriores estén tan confortables como en el frente del mismo, como se puede apreciar en la figura 12.

**Figura 12. Distribución del sistema en el vehículo**



#### **2.4.2. COMPONENTES DEL SISTEMA.**

- Líneas de calefacción y aire acondicionado
- Unidades de control manual y electrónico
- Actuadores electrónicos
- Compresor
- Condensador
- Unidad de calefacción y A/A

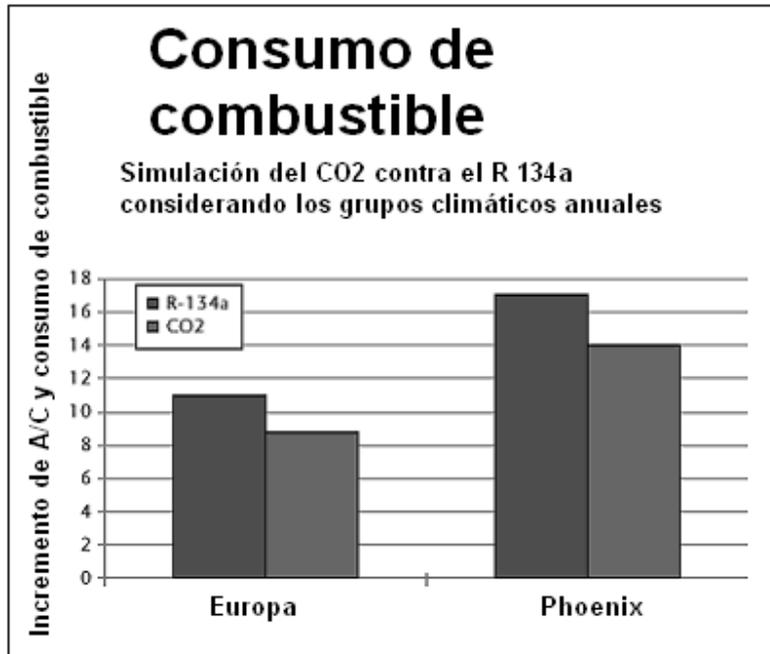
Además, la industria cuenta con herramientas analíticas como *United Parametric Vehicle (UPV)*, que permite a los ingenieros crear modelos virtuales para predecir el comportamiento del sistema de clima multizona sin tener un prototipo físico, y permite examinar todo el sistema integrado tanto en el interior como el exterior para que los pasajeros tengan un mayor comodidad.

Esto permite a los fabricantes medir exactamente la interacción y el impacto de una amplia variedad de factores, desde la configuración de los ventiladores hasta un cambio de las condiciones climáticas. El concepto de carros que incluyen Sistema de Clima Multizona es actualmente mostrado en demostraciones comerciales, y posiblemente podría implementarse a los vehículos en el año 2005.

## **2.5. Aire acondicionado con refrigerante CO<sub>2</sub>**

En el mundo el refrigerante CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) se ha utilizado como bomba de calor para calentadores de agua domésticos. Comparado con el sistema de combustión para generar agua caliente, el sistema con refrigerante CO<sub>2</sub> reduce la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> aproximadamente 50%, además de su "diseño innovador y su característica de ahorro de energía". Esta relación se puede observar perfectamente en la figura 13.

Figura 13. Comparación del R-134 con el CO<sub>2</sub>



Este sistema tiene un gran potencial para una enorme reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, porque el suministro de agua caliente usa 1/3 del total de energía consumida por calentadores domésticos. El refrigerante CO<sub>2</sub> del calentador de agua en la bomba de calor reduce el impacto de calentamiento global y toma la delantera para estilos de vida ecológicos. Ha crecido la preocupación por el sobrecalentamiento de la tierra, por razones conocidas, de acuerdo con la EPA (*Environmental Protection Agency*), la tierra se ha calentado 1°F en el siglo pasado. Durante la pasada era de hielo, la tierra estaba 5 a 9°F más fría que hoy. La comunidad científica determinó que el R-12, refrigerante del A/A del automóvil, estaba contribuyendo al calentamiento global y la reducción de la capa de ozono.

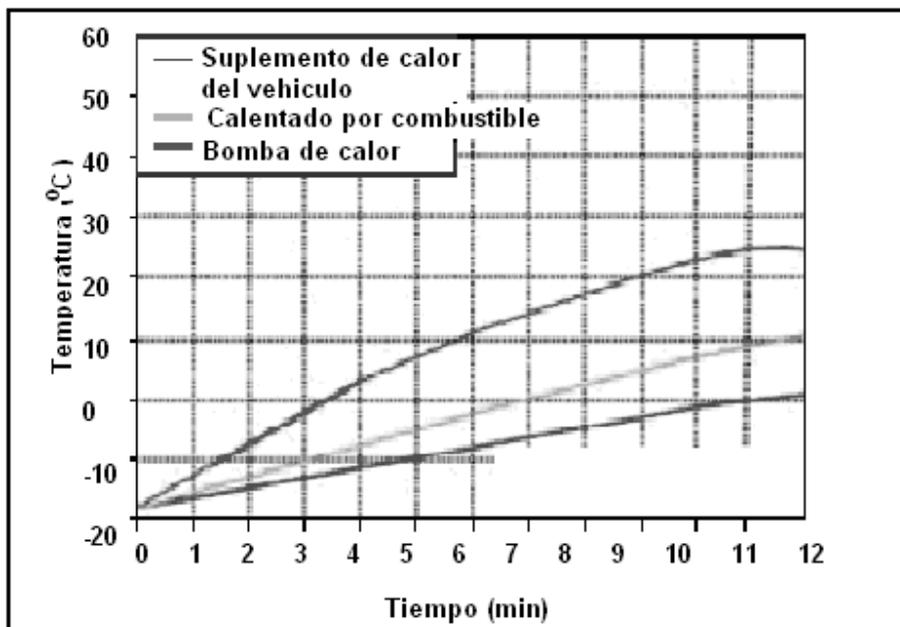
Este descubrimiento hizo que se llevara a cabo un cambio de R-12 a R-134"A" para sistemas de A/A en automóviles. Pero no fue una idea perfecta porque el R-134"A" no daña la capa de ozono, pero su potencial para el calentamiento global es todavía alto. Por eso es la necesidad de encontrar una nueva generación de refrigerantes, por ejemplo el CO<sub>2</sub>. Se ha desarrollado un sistema de aire acondicionado y calefacción que usa CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo y puede ser operado como una bomba de calor para proveer calor al instante o un suplemento. Gracias al empleo de algoritmos de control inteligente este sistema provee dióxido de carbono (que es un gas natural) para enfriar el vehículo ofreciendo a los ocupantes un ambiente más amigable comparado con sistemas convencionales.

### **2.5.1. Beneficios**

- La bomba de calor se integra completamente al sistema de A/A de CO<sub>2</sub>.
- Se tiene alta eficiencia sobre los sistemas de refrigeración hoy en día.
- Mejora el rendimiento de combustible.
- Provee de calor a los pasajeros inmediatamente o un suplemento.
- Supera a la calefacción por combustión del combustible, mejorando el comodidad y la calidad de aire.
- Elimina emisiones evaporativas concernientes a los calentadores de combustión de combustible.

- Permite a los vehículos a Diesel tener una eficiencia térmica igual o mejor que los vehículos a gasolina *algoritmo de control inteligente*.
- Permite al conductor tener la temperatura deseada.
- No requiere directamente la intervención del conductor.
- Permite que el sistema trabaje a máxima eficiencia para mejorar su funcionamiento. El CO<sub>2</sub> puede ser utilizado como fluido de bomba de calor o A/A.
- Mejora el tiempo de vida útil, mejor reciclaje y utilidad.
- El CO<sub>2</sub> es un gas natural.

**Figura 14. Comparación temperatura de los diferentes sistemas**



### **2.5.2. Razones para el uso del CO<sub>2</sub>**

El CO<sub>2</sub> es un refrigerante que existe en la naturaleza y tiene un efecto insignificante en el medio ambiente, de hecho, si todos los carros en el mundo usaran refrigerante CO<sub>2</sub> el día de hoy, habría 35% de mejoría en la reducción de la capa de ozono y una disminución del calentamiento global para el 2005. El CO<sub>2</sub> es un buen fluido de trabajo para enfriar y para calentar en sistemas de bomba de calor. El CO<sub>2</sub> no daña la capa de ozono.

### **2.5.3. Cómo trabaja el sistema**

El ciclo fundamental es el mismo que el de R-12 y R-134"A", conocido como ciclo de compresión de vapor. Sin embargo, para el CO<sub>2</sub>, el sistema necesita operar con presiones más altas que el sistema con R-134"A". El compresor bombea CO<sub>2</sub> a una presión alta para que éste sea un gas, el gas es enfriado por el aire del medio ambiente en el enfriador de gas localizado enfrente del vehículo.

Luego de enfriado el gas es expandido a través de una válvula de expansión electrónica y entra al evaporador localizado en el compartimiento de pasajeros, enfriando el aire del interior del vehículo. El CO<sub>2</sub> caliente entra de nuevo al compresor para cerrar el ciclo. El CO<sub>2</sub> también es un buen fluido de trabajo para sistemas de bombas de calor. Un sistema de bomba de calor logra calentar la cabina utilizando los mismos componentes que el sistema de A/A, con sólo invertir el sentido del flujo.

Como la presión de operación de un sistema de CO<sub>2</sub> es bastante elevada, requiere diferentes materiales para las mangueras y las juntas, y en general todos los componentes deben ser rediseñados. Los sistemas de CO<sub>2</sub> son actualmente usados para aplicaciones especializadas. Sin embargo, antes de que el sistema de A/A con CO<sub>2</sub> pueda entrar al mercado necesita mejorar en los siguientes aspectos:

- Reducción de costos.
- Reducción de peso.
- Mejora de la confiabilidad.
- Contar con equipo de servicio y mantenimiento.
- Estandarizar los procedimientos para no desperdiciar el CO<sub>2</sub> durante el servicio y mantenimiento.

## **2.6. Refrigeración por absorción**

En este nuevo diseño se aplica el principio de refrigeración por absorción utilizando el calor producido por el motor de un vehículo para hacer funcionar el sistema. El objetivo de este proyecto es diseñar, calcular y construir un sistema de aire acondicionado por absorción para un vehículo automotriz. Las ventajas que se obtienen al utilizar la refrigeración por absorción es el ahorro de combustible, ya que no se resta la potencia del motor porque no lleva un compresor que le reste potencia al motor, y se tiene por consiguiente menor consumo de combustible y consumo eléctrico.

Las ventajas son que se aprovechará la energía calorífica que se desperdicia en el motor. Al momento de empezar a trabajar el aire acondicionado en los vehículos el compresor es accionado por una polea electromagnética la cual esta conectada con una banda a la polea del cigüeñal del motor, restándole potencia cuando el sistema está encendido. El objetivo para el desarrollo de este proyecto es que en los sistemas de aire acondicionado automotriz existentes, basados en el principio de refrigeración (compresión del vapor), el compresor le resta energía mecánica al motor del automóvil por lo cual el consumo del combustible aumenta.

El resultado que se tiene, es el aprovechamiento de la energía calorífica generada y desperdiciada por un motor de combustión interna; ya que en el ciclo de refrigeración por absorción la fuerza que hace circular el refrigerante a través del sistema, que proporciona la diferencia de presiones en el proceso de evaporación y condensación, es producida por el generador al cual se debe aplicar o suministrar calor para que realice este efecto.

En este caso se aprovecha la energía producida por el motor de combustión interna y se aplica en el generador mediante un intercambiador de calor instalando el generador donde el motor nos proporcione la energía calorífica necesaria para el sistema.

## **2.7. Refrigeración termoeléctrica**

El enfriamiento termoeléctrico empezó a ser factible ya que los nuevos materiales *semiconductores* estaban produciendo rendimientos mucho más altos, ya que tienen características termoeléctricas superiores a los metales (conductores). La termoelectricidad se considera como rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad donde se estudian fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad. El fenómeno más conocido es el de electricidad generada por la aplicación de calor a la unión de dos materiales diferentes, si se unen por ambos extremos y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de voltaje que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones, este fenómeno es conocido como *Efecto Seebeck*.

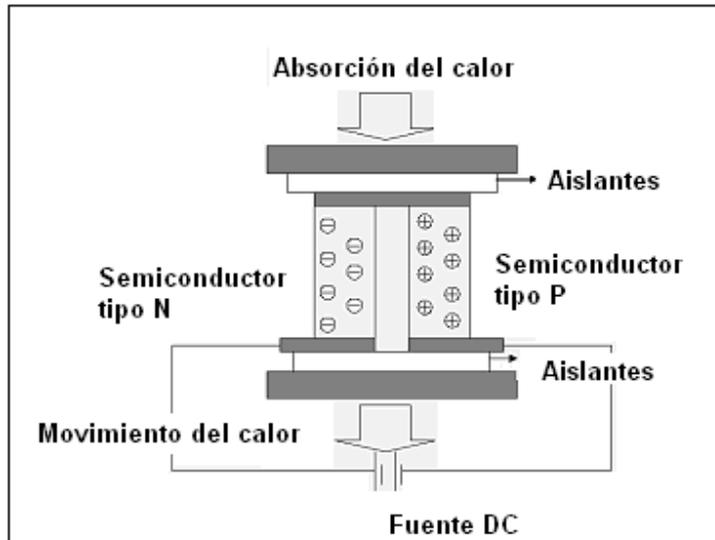
Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales distintos cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso. En este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. Este fenómeno se conoce como *Efecto Peltier*.

Las células Peltier son dispositivos termoeléctricos basados en la tecnología de los semiconductores y que actúan como una pequeña bomba de calor. Cuando se le aplica voltaje a la célula, una de sus caras se enfría mientras que la otra se calienta. Esto provoca un movimiento de calor de la cara fría a la caliente, este movimiento es fácilmente reversible con sólo cambiar la polaridad de la alimentación de la célula, se consigue que la cara caliente pase a ser la cara fría y viceversa.

Las aplicaciones se pueden usar la refrigeración termoeléctrica, así como en la elaboración de diferentes equipos de refrigeración que satisfagan las necesidades actuales; hay que tener en cuenta que la refrigeración por métodos termoeléctricos podría sustituir en bastantes casos a los sistemas de refrigeración actuales, eliminando así el uso de los CFC. Además de ésta, posee diversas ventajas, entre las que se pueden destacar:

- Producción de frío y calor indistintamente simplemente invirtiendo la polaridad al voltaje aplicado.
- Es totalmente silenciosa y no produce vibraciones.
- Fácil variación de la potencia refrigerante actuando sobre el voltaje de alimentación.
- No necesita mantenimiento.
- No posee elementos móviles.

**Figura 15. Celda termoeléctrica**



El Coeficiente de Diseño (COP), es un indicador de la eficiencia de un sistema termoeléctrico. Está esencialmente definido por el calor bombeado por una célula termoeléctrica. Cantidad de potencia suministrada a la celda termoeléctrica, se coloca matemáticamente dentro del COP

$$COP = \frac{Q}{V_{te} * I_{te}}$$

Donde:

- Q = Es la potencia bombeada
- $V_{te}$  = El voltaje que se suministra a la celda en c.c.
- $I_{te}$  = La corriente que se suministra a la celda.

Y Q se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$Q = (DT \times K \times A) / L$$

Donde:

DT = Diferencia de temperatura entre el ambiente y la carga o masa a refrigerar

K = Conductividad térmica del material

L = Espesor del material

A = Área de la celda

Los sistemas termoeléctricos son compactos, su diseño nos permite disponer de un sistema de reserva de energía, y pueden suministrar hasta un 18% de capacidad de refrigeración con tan sólo incrementar la potencia de entrada. Es necesario resaltar que los sistemas termoeléctricos tienen gran fiabilidad, versatilidad y, especialmente, capacidad de ser regulados térmicamente con gran precisión.

Los sistemas termoeléctricos ofrecen a largo plazo ventajas económicas si se comparan con los sistemas convencionales. Los costos de instalación son un 25% más bajo. Bajo las condiciones de operación de un circuito electrónico, requieren baja potencia, lo que aumenta significativamente el ahorro de energía.

$$A(Btu/hr) \left( \frac{1watt}{3.42 Btu/hr} \right) \left( \frac{1kW}{1000watt} \right) \left( \frac{1Quetzal}{1kW} \right) = B(Quetzal/HR)$$

Donde: A = Cantidad de Btu que se necesitan

B = Costo energético a utilizar un equipo de A cantidades de Btu por una hora.

La producción masiva automatizada reducirá los costos del sistema termoeléctrico, frente a un sistema absolutamente mecánico. Al ser una unidad compacta ofrece la posibilidad de un diseño adaptable al sistema que se desea y al ser modular un ahorro de costos, peso y espacio. Un análisis de mantenimiento, observa que bajo un ciclo de vida, el costo de mantenimiento de un sistema termoeléctrico es mucho más bajo que el de un sistema mecánico.

### 3. MATERIALES MAGNÉTICOS EN LA REFRIGERACIÓN

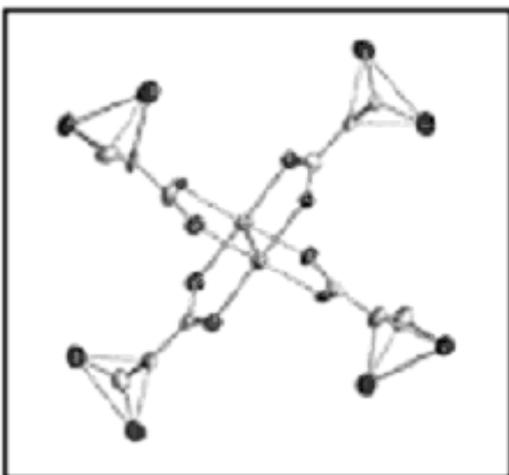
Últimamente, el estudio de estructuras magnéticas características de especies polimetálicas es de gran interés, debido a las diferentes tecnologías que se están desarrollando. El estudio de la interacción de intercambio magnético entre centros metálicos ha sido considerado como un punto de convergencia en la búsqueda de materiales magnéticos y en la comprensión del rol de sitios polimetálicos en metaloproteínas.

Inicialmente, el diseño molecular y la síntesis de sistemas magnéticos simples de baja dimensionalidad (dímeros y cadenas) es de gran interés. Esto con el fin de usarlos como sistemas modelos para establecer relaciones magneto- estructurales y verificar teorías y modelos existentes en física, que daban explicación al fenómeno de magnetismo. El nuevo enfoque en el estudio de propiedades magnéticas consiste en diseñar y proceder a la síntesis de materiales con un fin dado (procesos conocidos como "ingeniería molecular" e "ingeniería de red cristalina") en vez de estudiar propiedades magnéticas de materiales ya existentes. Con esta experiencia se fue incrementando la complejidad de los sistemas tanto desde un punto de vista estructural como magnético. Con el aumento de la complejidad se pretende llegar a controlar el paso de propiedades moleculares a fenómenos colectivos, y de agregados moleculares a materiales magnéticos. Con esto se da paso a la transición desde "ingeniería molecular" a "ingeniería de red cristalina".

Agregar complejidad a los sistemas magnéticos preparando materiales cuyas propiedades magnéticas están combinadas con otra propiedad física (eléctrica, óptica, fotofísica, etc.) puede ser muy útil a la hora de usarlo en tecnologías nuevas. Una manera útil de lograr este fin es diseñando un material compuesto de dos redes, tales como los compuestos de intercalación en los cuales un "anfitrión" (red 1) está alternado por un "huésped" (red 2).

Con esto se logra tener dos redes, las cuales proporcionan, cada una de ellas, una propiedad física diferente o una potenciación de una propiedad en particular. Así se puede sintetizar, por ejemplo, una especie magnética combinada con otra que presente conductividad electrónica. También se puede pensar en preparar una red cristalina que presente dos sub-unidades magnéticas; por cuanto se ha encontrado que la interacción entre dos centros magnéticos no equivalentes puede producir fenómenos magnéticos que no se presentan en especies con un sólo tipo de portador de spin.

**Figura 16. Diagrama de enlaces moleculares.**



### 3.1. Fundamentos magnéticos de la materia

Cada material reacciona de una manera distinta a los campos magnéticos. Debido al movimiento de los electrones en el átomo y al spin de los mismos. Cada átomo tiene un momento bipolar magnético asociado, que, al ser introducido en un campo magnético interactuará con él.

Hay que distinguir entre momentos magnéticos inducidos y momentos magnéticos permanentes; estos siempre predominan sobre los inducidos. Cuando el material se introduce en un campo magnético intenso, éste tiende a orientar los dipolos magnéticos permanentes del material, magnetizándolo en su dirección. Este proceso se mide mediante la imantación  $M$ , que mide el momento bipolar magnético neto por unidad de volumen.

$$M = \frac{du_o}{dV}. \text{ Amperios/metro}$$

Donde:  $u_o$  = momento bipolar neto y  
 $V$  = el volumen

El campo magnético producido por un material magnetizado ( $B_m$ ):

$$B_m = u_o * M$$

Si se introduce en un campo magnético el campo total ( $B$ ) será el aplicado ( $B_{ap}$ ) más el propio del material magnetizado ( $B_m$ ):

$$B = B_{ap} + u_o * M$$

Pero además en materiales paramagnéticos y ferromagnéticos la magnetización está en función del campo externo aplicado, por tanto

$$M = X_m \cdot B_{ap} / \mu_0$$

$X_m$  = susceptibilidad magnética

Y por tanto  $B = B_{ap} \cdot (1 + X_m) = K_m \cdot B_{ap}$

$K_m$  = permeabilidad relativa del material  $K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + X_m)$

Para los materiales paramagnéticos  $K_m$  aprox. 1.

Para los materiales ferromagnéticos  $K_m$  aprox. 5000 y 100 000.

### 3.1.1. Momentos magnéticos y magnetización

El magnetismo es inseparable de la mecánica cuántica, ya que un sistema puramente clásico en equilibrio térmico no puede poseer momento magnético, incluso en un campo magnético. El momento magnético de un átomo libre tiene tres orígenes principales que son:

- El espín que afecta a los electrones.
- El momento angular orbital alrededor del núcleo.
- El cambio del momento orbital producido por la aplicación de un campo magnético.

Los primeros dos efectos representan una contribución paramagnética a la imanación, la del tercero es diamagnética. En el estado fundamental 1s del átomo de hidrógeno, el momento orbital es cero y el momento magnético se debe esencialmente al espín electrónico con un pequeño momento diamagnético inducido. En el estado 1s<sup>2</sup> del helio, tanto el momento de espín como el momento orbital son nulos y solamente hay momento inducido. Los átomos con las capas electrónicas llenas tienen un momento de espín y un momento orbital nulos; estos momentos están asociados con las capas incompletas.

Normalmente, la materia presenta los momentos magnéticos compensados pero cada átomo o ion de una sustancia tiene un momento magnético total (J), usualmente no nulo, sensible a la acción de un campo magnético. Si un material magnético se encuentra inmerso en un campo magnético de intensidad  $\vec{H}_m$  los momentos magnéticos individuales se reorientan y tienden a alinearse al campo. Aparece un momento magnético neto en la sustancia llamado magnetización  $\vec{M}$ . Usualmente esta magnetización se toma por unidad de volumen.

El trabajo realizado sobre el sistema magnético inmerso en un campo magnético se debe al trabajo necesario para rotar el momento magnético individual debido a la aplicación del campo. A un cambio elemental del campo, viene dado por:

$$\delta W = -\mu_0 \int \vec{H}_m \cdot d(\vec{M} V)$$

El signo negativo hace que sea favorable, energéticamente, la alineación del momento magnético con el campo. La constante  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío y es necesaria para expresar la ecuación en unidades del Sistema Internacional. El trabajo también se puede escribir en función de la magnetización total  $\vec{I} = V * \vec{M}$ :

$$\delta W_{mag} = -\mu_0 \vec{H}_m dI$$

A la acción externa intensiva (campo magnético) le corresponde un efecto interno extensivo que es la imanación total. Desde un punto de vista físico, campo magnético e imanación son magnitudes conjugadas. El símbolo  $\delta$  se utiliza para representar las diferenciales inexactas.

### 3.1.2. Ecuación fundamental en un sistema magnético

Efectos directos Ts / Mh

Se efectuará mediante la energía interna:  $Tds = du - \mu_0 H_m dM$

$$T(s, M) = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_M \quad \mu_0 H_m(s, M) = \left( \frac{\partial u}{\partial M} \right)_s$$

Despejando  $s = s(T, M) \Rightarrow H_m = H_m(T, M)$ , que sería la ecuación de estado del sistema magnético.

$$h = u - \mu_0 H_m M \quad \text{Entalpía magnética} \Rightarrow \quad TdS = dh + \mu_0 M dH_m$$

$$g = u - Ts - \mu_0 H_m M \quad \text{Entalpía libre magnética} \Rightarrow -SdT = dg + \mu_0 M dH_m$$

$$f = u - Ts \quad \text{Energía libre (no modifica su definición)}$$

El sistema magnético queda caracterizado por sus coeficientes propios. Que son capacidades caloríficas, susceptibilidades magnéticas, coeficientes piromagnéticos. Todas estas ecuaciones dan como resultado nuevas relaciones de Maxwell.

### 3.1.2.1. Capacidades caloríficas

Las capacidad caloríficas de los sólidos es cero a 0 °K y aumenta rápidamente a medida que sube la temperatura, hasta llegar a un valor aproximadamente constante a temperaturas más elevadas. El aumento en la capacidad de calor corresponde a una mayor capacidad de los electrones para aumentar su energía promedio.

La expansión térmica en los sólidos se produce por la asimetría de las fuerzas de enlace entre los átomos. La mayor vibración térmica tiende naturalmente a aumentar la distancia promedio entre los átomos. La conductividad térmica es la transferencia de calor a través de un sólido por los fonones y electrones. En imanación y a campo magnético constante queda de la siguiente manera:

$$c_M = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_P = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_M \quad c_{H_m} = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_{H_m} = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_{H_m}$$

### 3.1.2.2. Susceptibilidades magnéticas

Las susceptibilidades magnéticas son considerablemente más elevada en la mayoría de los metales de transición (que contienen capas electrónicas incompletas) en los metales alcalinos. Estos valores elevados sugieren que la densidad de orbitales es anormalmente elevada para los metales de transición, de acuerdo con las medidas de capacidad calorífica electrónica, se pueden definir de esta manera.

$$X_S = \left( \frac{\partial M}{\partial H_m} \right)_S \quad X_T = \left( \frac{\partial M}{\partial H_m} \right)_T$$

### 3.1.2.3. Coeficientes piromagnéticos

Coeficientes piromagnéticos a campo magnético constante y adiabático

$$\pi_{H_m} = \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{H_m} \quad \pi_S = \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_S$$

### 3.1.2.4. Nuevas relaciones de Maxwell

$$du = Tds + \mu_o H_m dM \quad \left( \frac{\partial T}{\partial M} \right)_S = \mu_o \left( \frac{\partial H_m}{\partial S} \right)_M$$

$$dh = Tds - \mu_o M dH_m \quad \left( \frac{\partial T}{\partial H_m} \right)_S = -\mu_o \left( \frac{\partial M}{\partial S} \right)_M$$

Como se puede observar, éstas ecuaciones están relacionadas por el cambio de temperatura debido al cambio adiabático del campo, es decir, una imanación adiabática.

$$df = -sdT + \mu_o H_m dM \quad \left( \frac{\partial s}{\partial M} \right)_T = \mu_o \left( \frac{\partial H_m}{\partial T} \right)_M$$

$$dg = -sdT - \mu_o M dH_m \quad \left( \frac{\partial s}{\partial H_m} \right)_T = \mu_o \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{H_m}$$

Y en siguientes ecuaciones se deduce que el calor que intercambia el sistema en contacto con una fuente térmica cuando varía el campo magnético es llamado efecto magnetocalórico.

### 3.1.3. TRABAJO EXPANSIVO Y TRABAJO MAGNÉTICO.

Efectos cruzados pV/HM.

La ecuación fundamental es:  $dU = TdS - pdV + \mu_o H_m dI$

Despejado ( $TdS$ ):  $TdS = dU + pdV - \mu_o H_m dI$

La entalpía piezomagnética es  $dH = TdS + Vdp - \mu_o I dH_m$

Sustituyendo  $TdS$  en la entalpía piezomagnética queda de la siguiente manera

$$dH = dU + pdV - \mu_o I dH_m + Vdp - \mu_o H_m dI$$

$$H = U + pV - \mu_0 H_m I$$

La energía libre queda de la siguiente manera:  $dF = -SdT - pdV + \mu_0 H_m dI$

Y de la ecuación fundamental despejando ( $\mu_0 H_m dI$ ):

$$\mu_0 H_m dI = dU - TdS + pdV$$

Sustituyéndola por la energía libre queda de la siguiente manera:

$$dF = -SdT - pdV + dU - TdS + pdV$$

$$F = U - TS$$

Energía libre magnética:  $dG = -SdT + Vdp - \mu_0 I dH_m$

De la energía libre se despeja  $-SdT = dF + pdV - \mu_0 H_m dI$

Sustituyendo en la energía libre magnética queda de la siguiente manera:

$$dG = dF + pdV - \mu_0 H_m dI + Vdp - \mu_0 I dH_m$$

$$G = F + pV - \mu_0 H_m I$$

Pero  $F = U - TS$

Entonces, la ecuación de energía libre magnética queda de la siguiente manera:

$$G = U - TS + pV - \mu_0 H_m I$$

Entonces se redefinen las ecuaciones de la relaciones de Maxwell.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial I}\right)_V = -\mu_0 \left(\frac{\partial H_m}{\partial V}\right)_M \qquad \left(\frac{\partial V}{\partial H_m}\right)_M = -\mu_0 \left(\frac{\partial I}{\partial p}\right)_{H_m}$$

### 3.2. Ecuaciones de estado magnéticos

Las propiedades magnéticas se describen en términos de la dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura, presión y el campo magnético. Para estas ecuaciones es necesario describir para cada tipo de material magnético.

### 3.2.1. Paramagnetismo

El paramagnetismo se presenta en sustancias cuyos momentos bipolares magnéticos permanentes interactúan muy pocos entre ellos. En ausencia de campos magnéticos externos los dipolos se orientan al azar y al aplicar un campo externo, los dipolos tienden a alinearse a favor del mismo, efecto que se ve contrarrestado por la agitación térmica de los átomos. Las sales paramagnéticas se utilizan tanto para la medición como para la obtención de temperaturas bajas.

Estos materiales tienen valor de  $X_m$  pequeña y positiva, también presentan una dependencia mucho más completa con respecto a la temperatura que los no metales. Incluso el signo de la dependencia respecto a la temperatura varía de un elemento a otro en la secuencia periódica de los metales de transición. Para temperaturas bajas, cuando la agitación térmica es pequeña. Con campos intensos se puede llegar a transformar el material paramagnético en ferromagnético, y esta transición puede ser de dos tipos. La primera es de *orden desorden* de los espines electrónicos a la llamada temperatura de Curie. También es conveniente considerar el momento magnético orbital del electrón atómico como resultado de su movimiento alrededor del núcleo. En esta forma, en cualquier sólido, los movimientos orbitales de los electrones atómicos producen momentos magnéticos atómicos permanentes. Por encima de la temperatura de Curie los espines están desordenados y por debajo presentan cierta disposición ordenada particular, convirtiéndose en antiferromagnético, ferromagnético dependiendo del tipo de ordenación.

El segundo es *superconductividad* que introduce el orden, no en dirección de los espines, sino en la distribución de la cantidad de movimiento de los electrones. Los materiales superconductores presentan unas propiedades muy particulares.

Como los átomos de un sólido pueden tener momentos magnéticos permanentes, se puede analizar el comportamiento de estos momentos asumiendo que poseen libertad de rotación

El dipolo tiende a disminuir su energía alineándose con el campo aplicado y con eso produce una susceptibilidad positiva. Es necesario, si embargo, tomar en cuenta el efecto de la temperatura.

#### **3.2.1.1. Temperatura de Néel o Curie**

Es la temperatura por encima de la cual desaparece la imanación espontánea; separa la fase paramagnética desordenada para  $T \geq T_c$  de la fase ordenada ferromagnética a  $T \leq T_c$ . Puede encontrarse  $T_c$  en función  $\lambda$  que es una constante independiente de la temperatura.

Considerando la fase paramagnética, un campo aplicado  $B_a$  originará una imanación finita que, a su vez, engendrará un campo finito de canje  $B_E$ . Si  $x_p$  es la susceptibilidad paramagnética

$$\mu_0 M = X_p (B_a + B_E)$$

La imanación puede escribirse en la forma de producto de una susceptibilidad constante por un campo solamente cuando la fracción de los espines alineados es pequeña. Es aquí cuando interviene la hipótesis de que la muestra se encuentra en la fase paramagnética.

La susceptibilidad paramagnética es dada por la ley de Curie  $X_p = C / T$ , donde C es la constante de Curie, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$B_E = \lambda M, \quad \mu_0 M = x_p (B_a + B_E) \quad \text{Y} \quad MT = C(B_a + \lambda M)$$

Donde:

$$X_p = \frac{M}{B_a} = \frac{C}{(T - C\lambda)}$$

La susceptibilidad en la ecuación de arriba tiene una singularidad que a  $T = C * \lambda$ . A esta temperatura existe una imanación espontánea ya que si  $X_p$  es finita se puede tener M finita para  $B_a$  igual a cero, por eso de la ecuación anterior se tiene la ley de Curie – Weiss. Y  $\lambda$  es el coeficiente de conductividad térmica.

$$X_p = \frac{C}{T - T_c}; \quad T_c = C\lambda.$$

Esta expresión da buena cuenta de la variación observada de la susceptibilidad en la región paramagnética por encima del punto Curie. A continuación se presentan temperaturas para diferentes compuestos químicos, en la tabla 4.

**Tabla 4. Temperatura Curie para diferentes compuestos químicos**

SUSTANCIA	$\theta/K$	T. DE CURIE ( $T_C$ )	TIPO PARA $T \leq T_N$
$Cl_2Co$	-48	25	Antiferromagnético
$Cl_2C_2$	-116	40	Antiferromagnético
$Cl_2Cu$	-52	70	Antiferromagnético
$F_2Fe$	-117	70	Antiferromagnético
$SO_4Fe$	-39	23	Antiferromagnético
$MnO$	-680	116	Antiferromagnético
$MnO_2$	-480	90	Antiferromagnético
$Fe$	1093	1043	Ferromagnético
$Ni$	538	731	Ferromagnético
$Co$	1400	1400	Ferromagnético
$MnOFe_2O_3$	-	783	Ferrimagnético
$FeOFe_2O_3$	-	848	Ferrimagnético
$NiOFe_2O_3$	-	863	Ferrimagnético

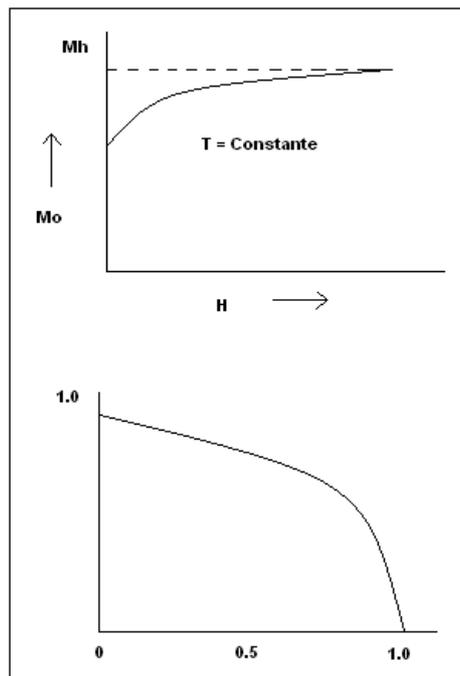
### 3.2.1.2. Representación de la ecuación Langevin - Weiss

La ecuación de estado magnético para los materiales puede aproximarse por la ecuación de Langevin – Weiss:

$$M_{H_m}(T, H_m) = M_o \coth \frac{M_o v_o (H_m + \lambda M_{H_m})}{RT} - \frac{RT}{v_o (H_m + \lambda M_{H_m})}$$

Donde  $M_o$  es la imanación para  $H_m = T = 0$ ,  $v_o$  es el volumen molar para en  $T = 0$ . Donde  $\lambda$  es una constante característica de cada material. En la figura 17 se representa esta ecuación, y su comportamiento en función al campo magnético y la temperatura.

**Figura 17. Representación gráfica de la ecuación Langevin - Weiss**



### 3.2.1.3. Paramagnetismo nuclear

El paramagnetismo que se ha estudiado anteriormente se debe a los spines desapareados de los electrones de elementos de tierras raras o metales de transición como el hierro, cromo, gadolinio etc. Por ello se le denomina paramagnetismo iónico.

Al sumar la contribución de sus protones y neutrones, los núcleos de estos metales contienen spines desapareados. Esto da lugar a un momento magnético de spin nuclear diferente del atómico.

El magnetismo asociado con este momento de spin se denomina paramagnetismo nuclear. La diferencia entre uno y otro es sólo cuantitativa. Los campos necesarios para magnetizar los núcleos atómicos son de varios órdenes de magnitud, mayores que los que se necesitarían para magnetizar los spines electrónicos. Alternativamente, la temperatura característica del paramagnetismo nuclear es varios órdenes de magnitud menor que la electrónica.

Combinado el paramagnetismo iónico y el paramagnetismo nuclear se puede hacer descender aún más la temperatura de los núcleos usando el principio de desimantación adiabática. También es posible extender el concepto de temperatura magnética nuclear a partir de su susceptibilidad. Usando el paramagnetismo nuclear se puede llegar a temperaturas del orden nanokelvin.

### 3.2.2. Diamagnetismo

Cuando la magnetización es negativa, el sólido recibe el nombre de diamagnético. En los sólidos diamagnéticos los momentos magnéticos se oponen al campo, haciendo que el campo dentro del sólido sea menor que el campo fuera de él. Según la ley de Lenz, una corriente inducida por un campo variable se opone siempre al cambio que la produce, o cuando cambia el flujo que atraviesa un circuito eléctrico, se induce una corriente en un sentido tal que se opone al cambio de flujo. Así, el campo de la corriente inducida se opone al cambio del campo aplicado.

Cualquier conductor se opone temporalmente a la penetración de un campo magnético mediante el flujo de sus electrones de conducción, pero estas corrientes desaparecen rápidamente. Se producen cambios más permanentes en los movimientos orbitales de los electrones ligados a los átomos. Estos cambios obedecen también a la ley de Lenz y conduce a un diamagnetismo verdadero.

En la mayoría de sólidos, el diamagnetismo es muy débil, con susceptibilidades del orden de  $10^{-5}$ . Se puede observar solamente cuando todos los demás tipos de magnetismo sean completamente inexistentes.

Explicándolo en otras palabras, el diamagnetismo está asociado con la tendencia de las cargas eléctricas a formar parcialmente una pantalla entre el interior de un cuerpo y el campo magnético aplicado. En un superconductor o en una órbita electrónica, dentro de un átomo, la corriente inducida persiste mientras el campo está presente. El campo magnético producido por la corriente inducida persiste mientras el campo está presente. El campo magnético producido por la corriente inducida se opone al campo aplicado y el momento magnético asociado con la corriente es un momento diamagnético. Incluso en un metal normal existe una contribución diamagnética por parte de los electrones de conducción y este diamagnetismo no se destruye por las colisiones de electrones.

Los diamagnéticos metálicos exhiben un comportamiento similar a temperaturas ordinarias, pero en la región de bajas temperaturas varía acusadamente con la temperatura y oscila violentamente con el campo magnético. Este fenómeno espectacular a bajas temperaturas recibe el nombre de **efecto de Haas-van Alphen**. El tratamiento habitual del diamagnetismo de los átomos utiliza el teorema de Larmor: en un campo magnético, el movimiento de los electrones alrededor del núcleo central es, para el primer orden del campo magnético, el mismo que un posible movimiento en ausencia del campo magnético; excepto el que hay que superponer debido a una presión de los electrones con la frecuencia angular:

$$\omega = \frac{eB}{2m}$$

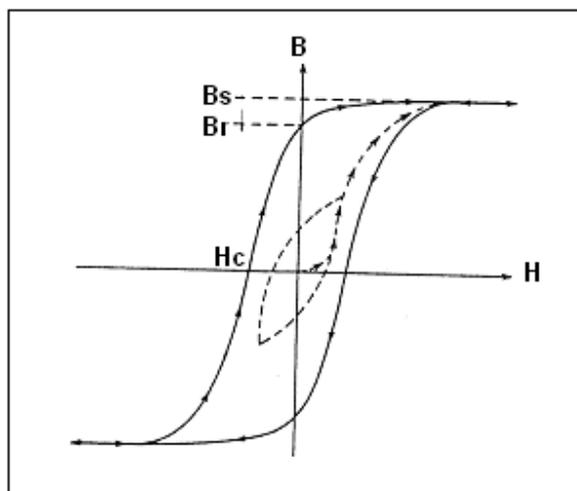
Si el campo se aplica lentamente, el movimiento, con respecto al sistema de referencia en rotación será el mismo que el movimiento inicial en el sistema en reposo antes de aplicar el campo.

Ejemplos de materiales diamagnéticos serían: Haluros metálicos (BrLi, ClNa), cristales de compuestos aromáticos (benceno, antraceno) y algunos metales (bismuto, latón, argón etc.)

### 3.2.3. Ferromagnéticos

Los metales de transición como: hierro Fe, Co y ciertos metales de las tierras raras metálicas como el Gd, y unos pocos óxidos como el  $\text{CrO}_2$  y ErO presentan magnetizaciones muy elevadas. De hecho, estas sustancias permanecen magnetizadas después de remover el campo. Su magnetización no es reversible; esto es, depende de cómo se aplique el campo como se puede observar en la figura 18.

**Figura 18. Curva de histéresis.**

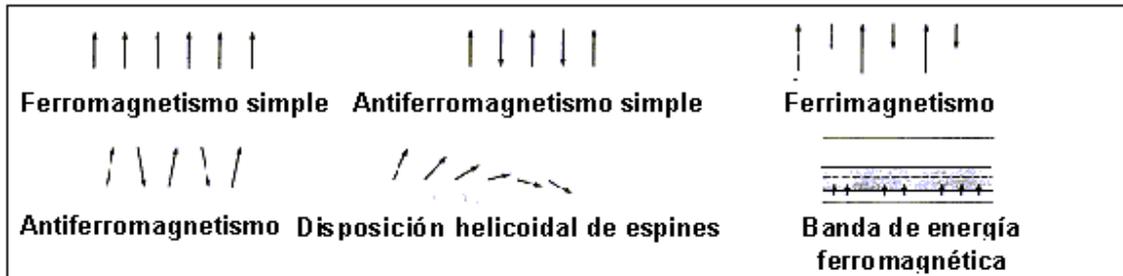


Se puede observar que la inclinación aumenta bruscamente y  $B$  (campo magnético) aumenta rápidamente hasta que se obtiene la inducción de saturación  $B_s$ . Con un mayor aumento del campo, la pendiente se nivela. Cuando disminuye el campo no se retrasa la curva original. Para  $H$  igual a cero, la muestra todavía está magnetizada y  $B = B_r$ , la *Inducción remanente*. Para  $B = 0$ , y  $H_m = H_c$ , la *fuerza coercitiva*.

Si ahora  $H_m$  se hace negativa y la muestra se satura en la dirección inversa antes de regresar al valor cero del campo, se obtiene la curva simétrica ilustrada anteriormente, con una saturación, fuerza coercitiva, y remanencia iguales a la s del lado positivo. Este comportamiento de histéresis, irreversible y con doble valor, es característico del comportamiento magnético de los materiales ferromagnéticos. El trabajo necesario para recorrer una vez el ciclo de histéresis es proporcional al área, encerrada por la curva.

Si  $H_m$  retorna a cero y se repite el ciclo con valores menores que para la saturación, se obtiene una curva de histéresis con menor área. Un cuerpo ferromagnético posee un momento magnético espontáneo incluso en ausencia de campo magnético. El momento magnético espontáneo sugiere que los espines electrónicos y los momentos magnéticos están dispuestos de una manera regular. El orden no es necesariamente simple; todas las disposiciones representadas en la siguiente figura, excepto el Antiferromagnético simple tienen un momento magnético espontáneo llamado generalmente momento de saturación.

**Figura 19. Direcciones magnéticas de diferentes materiales.**

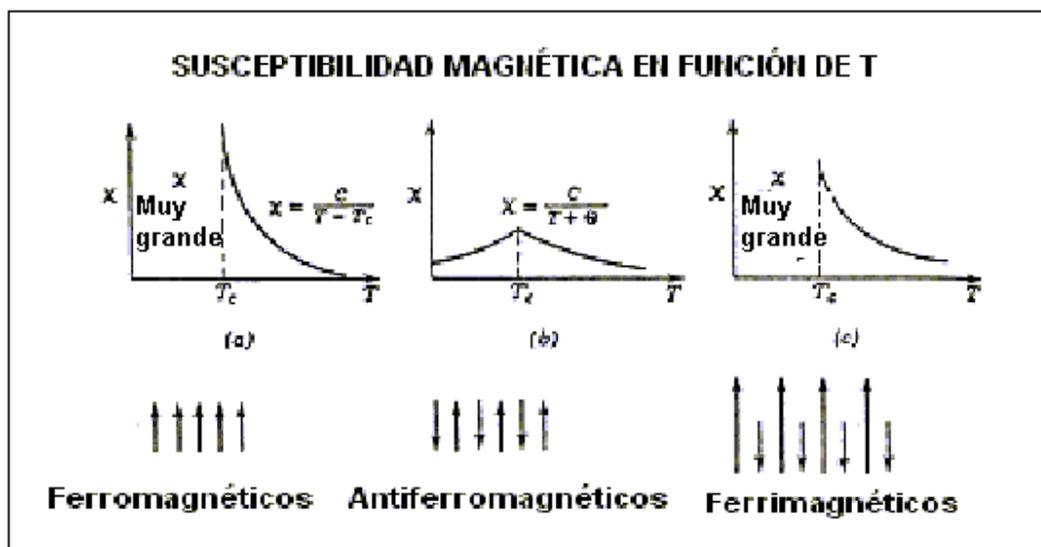


### 3.2.4. ANTIFERROMAGNÉTICOS.

En algunos casos, la energía de intercambio tiene el efecto opuesto al ferromagnetismo, los giros se alinean en forma opuesta en vez de la misma dirección. Este fenómeno se conoce con el nombre de *antiferromagnetismo*. En este caso la susceptibilidad es positiva y aumenta a medida que aumenta la temperatura ya que la energía térmica destruye las disposiciones antiparalelas de los momentos y les permite alinearse con el campo. La constante de Curie-Weiss de este tipo de materiales por encima de la temperatura de Néel es negativa. La susceptibilidad por debajo de la temperatura de Néel es anisótropa, existe una dirección particular en el cristal a lo largo de la cual se alinean los espines electrónicos. La susceptibilidad medida paralelamente a este eje es menor que la medida en el eje perpendicular.

Es posible mencionar a otro grupo de materiales, un grupo de óxidos complejos denominados espineles, que poseen la composición  $X\text{OFe}_2\text{O}_3$  (donde X es un material), exhiben interacciones ferromagnéticas y sin embargo, poseen giros antiparalelos orientados al contrario. Aunque los vecinos más próximos poseen giros opuestos en un material ferrimagnético como este, un grupo de los momentos de giro es mayor que el otro como está indicado. En consecuencia se produce un momento neto. La magnetización de los espineles ferrimagnéticos, conocidos como ferritas, es lo suficientemente grande para ser útil comercialmente, aunque el valor de saturación no es tan grande como el caso ferromagnético. Las estructuras de los materiales ferrimagnéticos son similares a los ferromagnéticos.

Figura 20. Diagramas de temperaturas de diferentes materiales magnéticos



## 4. CICLOS DE LA REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA.

Los refrigeradores magnéticos funcionan a raíz del cambio de temperatura que experimentan los materiales ferromagnéticos / paramagnéticos al magnetizarse y desmagnetizarse para enfriar un ambiente.

El ciclo de trabajo de un refrigerador magnético es análogo a un ciclo de gas, pero en vez de comprimirlo y expandirlo, magnetiza y desmagnetiza el material Ferromagnético / paramagnético con el que se trabaje. Se trabaja a la temperatura Curie del material, por lo tanto, el material en unas partes del ciclo será paramagnético y en otras ferromagnético

Este ciclo se compone de cuatro estados, los cuales son:

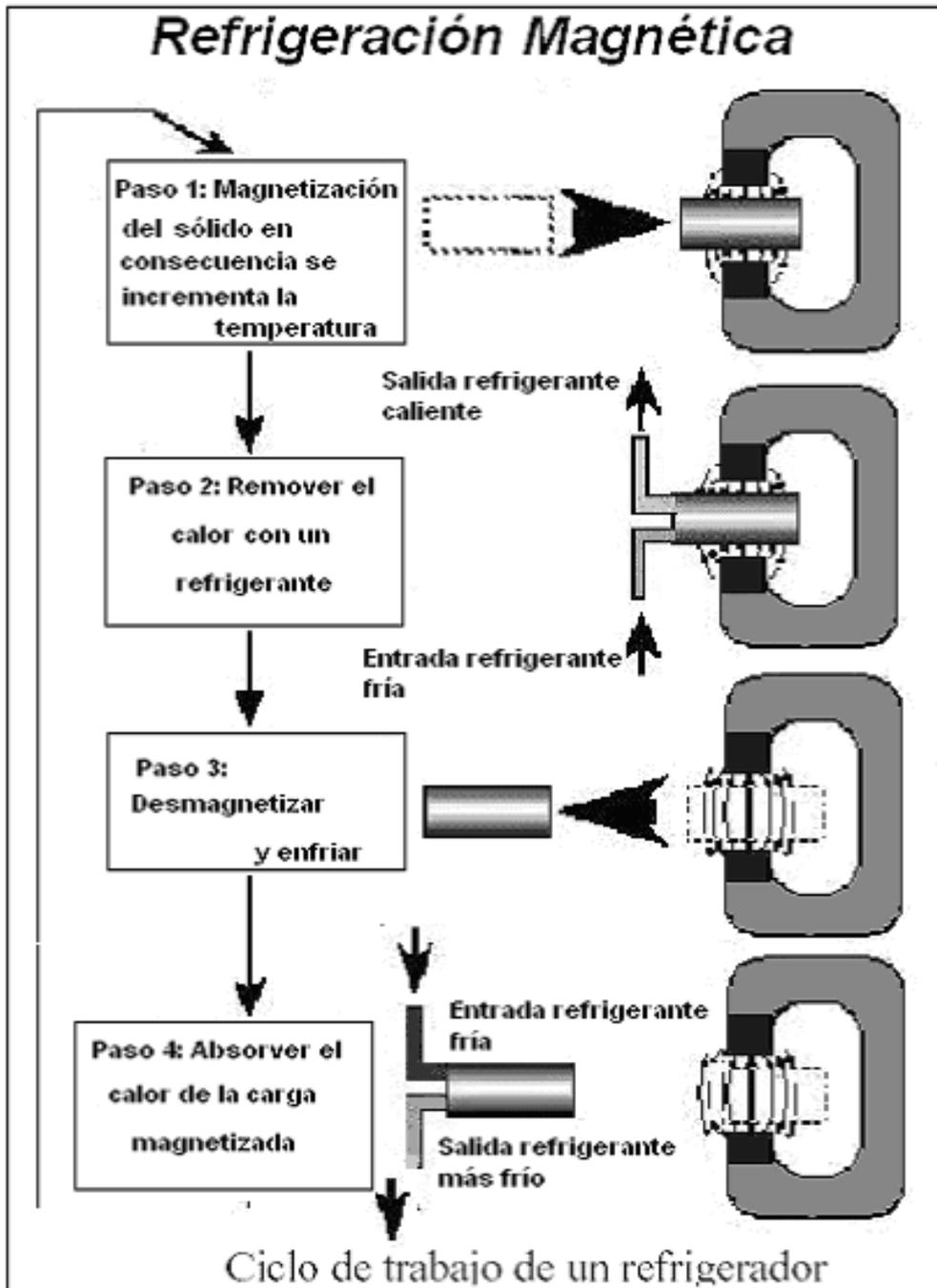
- a) La introducción del material ferromagnético / paramagnético en el campo electromagnético intenso, los momentos bipolares atómicos se alinean a favor del campo, disminuyendo la entropía del sistema y por tanto aumentando la temperatura de la aleación, puesto que es un proceso adiabático. Este paso es análogo al de la compresión del gas que se produce en los refrigeradores convencionales.
- b) Sin sacar la aleación del campo electromagnético se enfría hasta temperatura ambiente mediante el contacto con algún líquido que ponga

en contacto el material con el exterior, en los refrigeradores magnéticos se utiliza agua.

- c) Al sacar el material del campo electromagnético, los momentos magnéticos se orientarán al azar debido a la agitación térmica de los átomos. La entropía del sistema aumenta, sin embargo, si el proceso se hace adiabáticamente, la temperatura de la aleación disminuirá. Este proceso es análogo a la expansión del gas que se produce en los refrigeradores convencionales.
  
- d) Una vez enfriado el material se pone en contacto con el medio a enfriar, normalmente mediante un líquido que atraviesa el material ferromagnético. El último paso, el d, es clave en los refrigeradores magnéticos, pues de él depende en gran medida el rendimiento de la máquina. Se busca un intercambio de valor máximo y rápido entre el material magnetizable y la cámara a refrigerar. Esto se consigue cambiando la estructura del material magnético, convirtiéndolo en un radiador.



Figura 21. Ciclos de la refrigeración magnética



#### **4.1. Efecto magnetocalórico**

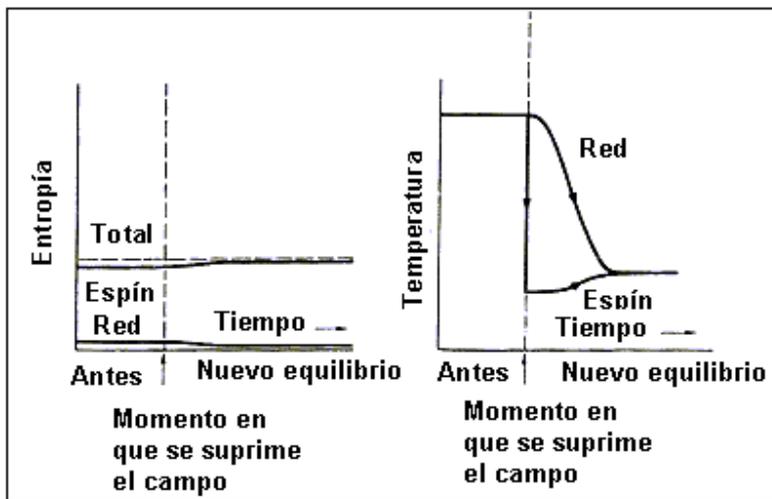
El fenómeno que sirve para hacer refrigeradores magnéticos o si se quiere obtener temperaturas muy bajas, es el denominado efecto magnetocalórico o desimanación isentrópica o adiabática. Es un resultado de la magnetización y desmagnetización adiabática de los materiales magnéticos. Se funda en el hecho de que, a temperatura constante, la entropía de un sistema de momentos magnéticos disminuye cuando se aplica un campo magnético.

La entropía es una medida del desorden de un sistema; cuanto mayor es el desorden, más elevado es el valor de la entropía. En presencia de un campo magnético se magnetiza un material, se orientan los momentos bipolares magnéticos en la dirección del campo magnético, ordenándose la materia, es decir, disminuyendo su entropía, y por lo tanto, un mayor número de momentos se ordenan. Esto produce que, si la magnetización es adiabática, la temperatura del sistema suba. Esto es el fundamento del efecto magnetocalórico.

Si se puede suprimir el campo magnético sin que cambie la entropía del sistema de los espines, el orden de los sistemas de espín corresponde a una temperatura inferior a aquella que corresponde al mismo grado de orden en presencia del campo. Cuando se desimana la muestra a entropía constante, la entropía comunicada al sistema de espines sólo puede proceder al sistema de vibraciones de la red como lo podemos observar en la siguiente gráfica.

A las temperaturas que nos interesan, la entropía debida a las vibraciones de la red es normalmente despreciable; así, la entropía del sistema de momentos permanece esencialmente constante durante la desimancación adiabática de la muestra. El enfriamiento magnético es una operación no cíclica.

**Figura 22. Comportamiento de entropía y temperatura en ausencia del campo magnético.**



Se calculará primero una expresión de la entropía debida a los espines para un sistema de  $N$  iones, de espín  $S$  cada uno, a una temperatura lo suficientemente elevada como para que el sistema de los espines esté totalmente desordenado. Esto quiere decir que, se eligió una temperatura  $T$ , muy superior a cierta temperatura que caracteriza la energía de las interacciones que tiende a dar una orientación preferencial a los espines. La definición de la entropía  $\sigma$  de un sistema formado por  $G$  estados accesibles, es  $\sigma = k_B \ln G$ .

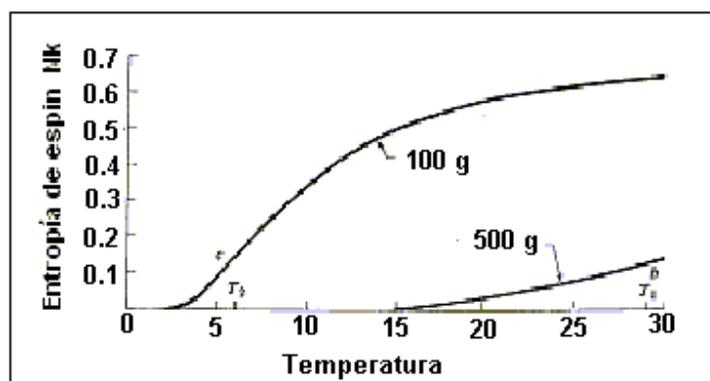
A una temperatura lo suficientemente elevada como para los  $2S + 1$ , estados de cada ion estén aproximadamente con la misma población,  $G$  es el número de maneras de disponer  $N$  espines en el estado  $2S + 1$ . Así  $G = (2S + 1)^N$ , de donde la entropía de espín  $\sigma_S$  es:

$$\sigma_S = k_B \ln(2S + 1)^N = Nk_B \ln(2S + 1)$$

Esta entropía de espín es la que se reduce por un campo magnético. El campo da por resultado separar las energías de los  $2S + 1$  estados, ganando población los niveles más bajos.

La figura 23 muestra las etapas sucesivas de enfriamiento. El campo se aplica a la temperatura  $T_1$  con la muestra en buen equilibrio térmico a su alrededor, lo que da la isoterma  $ab$ . Se aísla inmediatamente la muestra ( $\Delta\sigma = 0$ ) y se corta el campo; la muestra recorre la isentrópica  $bc$  alcanzando la temperatura  $T_2$ . El contacto térmico  $T_1$  se realiza mediante helio gaseoso, rompiéndose este contacto térmico evacuando el gas con una bomba.

**Figura 23. Etapas sucesivas de enfriamiento.**



#### 4.1.1. Materiales magnetocalóricos

Los treinta elementos denominados tierras raras constituyen la serie de los [lantánidos](#) y [actínidos](#). Uno de los lantánidos ([Prometio](#)) y casi todos los actínidos se denominan transuránicos, ya que no existen de forma natural, son sintéticos. Todos estos [metales](#) pertenecen al [grupo 3](#) de la [Tabla Periódica](#) y a los períodos 6 y 7. Todos tienen 3 electrones en su capa más externa (2 electrones s de la última capa y 1 o ninguno d de la penúltima, pasando, en este último caso, el electrón a orbitales f de la antepenúltima) y completan los [orbitales](#) f de la antepenúltima capa: 4f (lantánidos) y 5f (actínidos). **Grupo 3:**

##### 4.1.1.1. Lantánidos

[Lantano](#), [cerio](#), [praseodimio](#), [neodimio](#), [prometio](#), [samario](#), [europio](#), [gadolinio](#), [terbio](#), [disprosio](#), [holmio](#), [erbio](#), [tulio](#), [iterbio](#), [lutecio](#). Son elementos cuya proporción en la corteza terrestre es del orden del 0,02% en peso (el prometio es artificial). Debido a que la mayoría de las propiedades son parecidas y se encuentran en los mismos minerales son difíciles de separar. Son elementos del periodo 6 que llenan [orbitales](#) 4f teniendo las capas 5 y 6 incompletas. Como se trata de una capa interna las diferencias de unos a otros son mínimas, su separación sólo se ha logrado con el desarrollo de las técnicas de intercambio iónico, utilizando la propiedad que tienen de formar complejos aniónicos. Los metales se obtienen metalúrgicamente con [sodio](#), [calcio](#), [magnesio](#) o lantano en atmósfera inerte a partir de los fluidos o de otros compuestos.

La electrólisis de una mezcla fundida de cloruros de lantánidos anhídros conduce a la aleación [\*mischmetal\*](#). Son metales de brillo argentífero que se oxidan rápidamente al aire y son bastante reactivos. El estado de oxidación que adoptan todos en sus combinaciones es +3; además, en el caso de samario, europio, tulio e iterbio pueden adoptar +2, y en el caso de cerio, praseodimio, neodimio, terbio y disprosio +4. Se disuelven en agua y en ácidos con desprendimiento de [hidrógeno](#); reaccionan fácilmente con hidrógeno, (formando fases sólidas negras en las que por cada átomo de lantánido hay 2-3 de hidrógeno), [cloro](#) (formando el triclorigenuro), [oxígeno](#) (formando el trióxido) y [nitrógeno](#) (formando mononitruro con estructura cristalina tipo cloruro de sodio). La basicidad de los hidróxidos disminuye al aumentar el número atómico. Se utilizan como catalizadores en el craqueo del petróleo, como material luminoso en los televisores en color, lámparas de mercurio, etc.

#### 4.1.1.2. Actínidos

[Actinio](#), [torio](#), [protactinio](#), [uranio](#), [neptunio](#), [plutonio](#), [americio](#), [curio](#), [berkelio](#), [californio](#), [einsteinio](#), [fermio](#), [mendelevio](#), [nobelio](#), [lawrencio](#). Hasta 1940 sólo se conocían torio, protactinio y uranio que se situaban en los grupos 4, 5 y 6 del Sistema Periódico. Al sintetizarse en 1944 el neptunio y el plutonio se comprendió que eran miembros de un grupo análogo al de los lantánidos. Son elementos del periodo 7 que llenan [orbitales](#) 5f teniendo las capas 6 y 7 incompletas, por lo que sus propiedades químicas son muy parecidas entre sí y a las de los lantánidos, salvo que presentan mayor número de estados de oxidación, pues los electrones 5f están más alejados del núcleo.

Son raros, excepto torio y uranio. Sólo se encuentran en la naturaleza actinio, torio, protactinio, uranio, neptunio, plutonio y americio en los minerales de uranio como miembros de las series de desintegración. El torio, además, se encuentra junto a los lantánidos en las arenas monacíticas. Son metales blanco plateados, reactivos que se oxidan rápidamente en contacto con el aire. Reaccionan con el agua y los ácidos desprendiendo hidrógeno. También lo hacen fácilmente con el [hidrógeno](#), [cloro](#), [oxígeno](#) y [nitrógeno](#) presentado diferentes estados de oxidación, aunque +3 es común a todos ellos. La basicidad de los trihidróxidos disminuye al aumentar el número atómico. Todos son radiactivos, aunque los primeros miembros del grupo tienen períodos de semidesintegración bastante grandes.

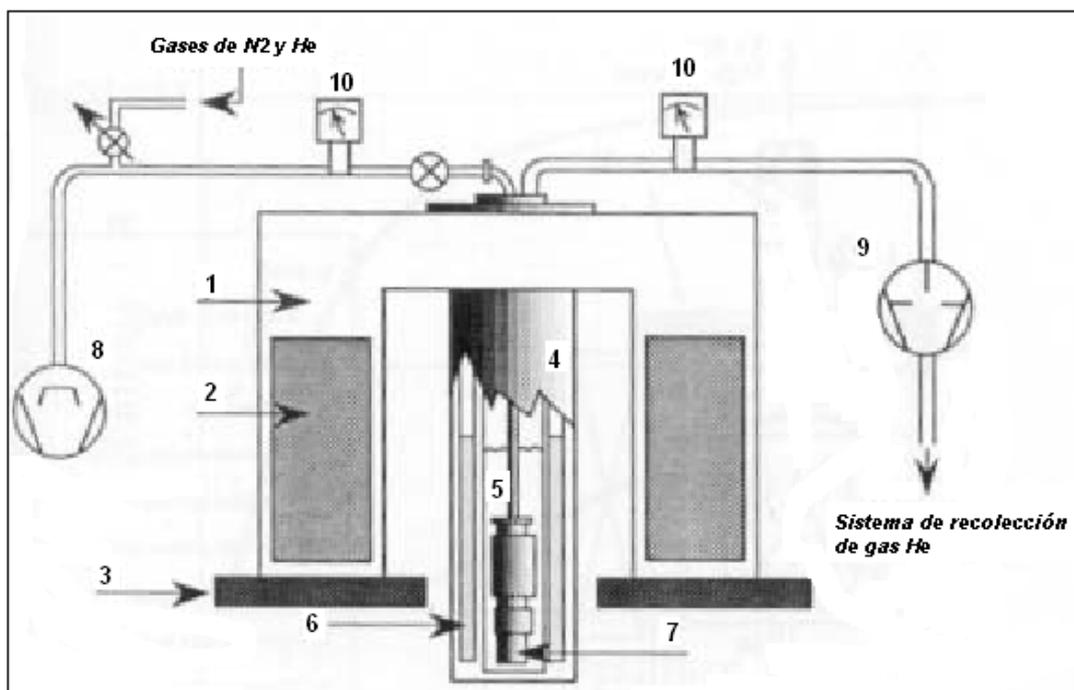
Figura 24. Tabla periódica de los elementos

**TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS**

1 H 1.008																	2 He 4.003												
3 Li 6.941	4 Be 9.012															9 F 19.00	10 Ne 20.18												
11 Na 22.99	12 Mg 24.31															17 Cl 35.45	18 Ar 39.95												
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.70	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 39.95												
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3												
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	73 La 138.9	74 Ce 140.1	75 Pr 140.9	76 Nd 144.2	77 Pm (145)	78 Sm 150.4	79 Eu 152.0	80 Gd 157.3	81 Tb 158.9	82 Dy 162.5	83 Ho 164.9	84 Er 167.3	85 Tm 168.9	86 Yb 173.0	87 Fr (223)	88 Ra (226)												
<b>Elementos de tierras raras</b>																													
89 Ac (227)	90 Th 232.0	91 Pa (231)	92 U 238.0	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (293)	117 Ts (294)	118 Og (294)

#### 4.1.2. Sistema para la obtención de bajas temperaturas

Figura 25. Sistema para la obtención de bajas temperaturas



A campo magnético cero, se enfría la muestra hasta la temperatura de He líquido a baja presión, para ello se enfría por etapas. A continuación explicaremos el modelo de la figura que encontramos arriba y sus partes para poder hacer funcionar el sistema:

1. Arena.
2. Se colocan unos amortiguadores, entre los dos anteriores y esta parte del sistema evitamos cualquier perturbación en la muestras ya que a estas temperaturas cualquier pequeña vibración haría calentar la muestra.
3. Es la carcaza que alberga el sistema.
4. Es un baño de He (helio) líquido.
5. Es un baño de N<sub>2</sub> (nitrógeno) líquido.
6. Se coloca en sal.
7. Bomba de expansión del gas.
8. Bomba de compresión del gas.
9. Son medidores para regular el caudal.

Se aplica un campo magnético intenso, al estar en contacto térmico con el He líquido la sal se mantiene a aproximadamente 1,2 °K. Se realiza entonces alto vacío y se aísla la muestra del resto del sistema. Se anula entonces el campo magnético externo, por lo que la sal se desimana adiabáticamente y su temperatura baja aun más.

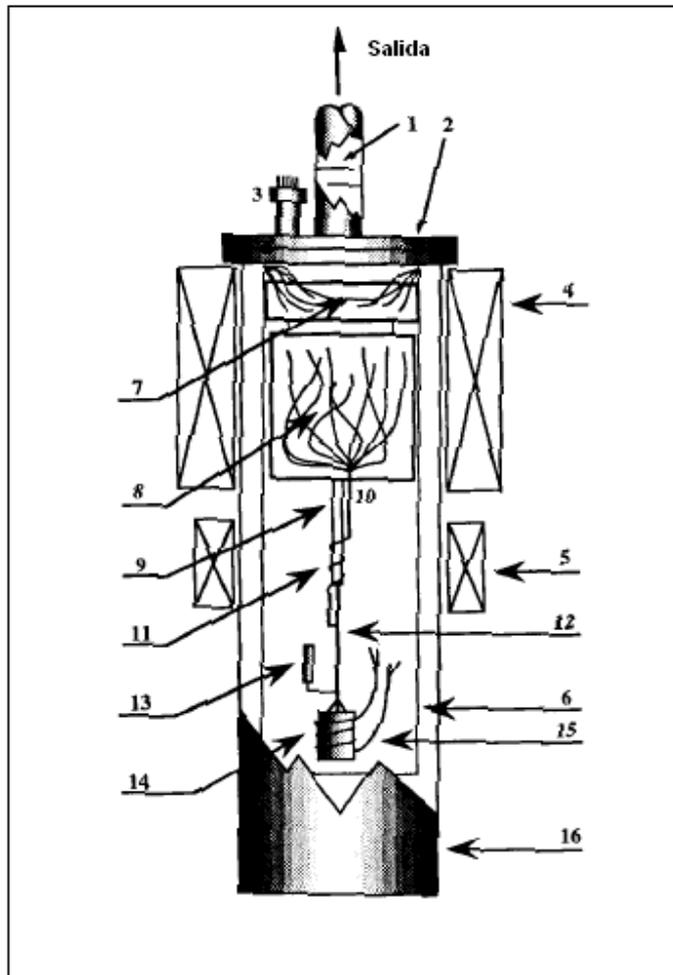
#### 4.1.3. Sistema para la medida de calor específico a baja temperatura

A continuación se mostrará una figura 25 la cual demuestra un sistema que nos ayuda para tener un método estable de temperaturas bajas.

**Tabla 5. Descripción de partes del sistema para medida de calor específico**

No	Descripción	No	Descripción
1	Escudo de radiación	9	Rodillo de aislante térmico
2	Anillo sellador	10	Brocha Cooper
3	Boquilla de alimentación	11	Alambre delgado ( <i>swicht</i> térmico)
4	Núcleo superconductor	12	Soporte mecánico
5	<i>Swicht</i> térmico de núcleo	13	Termómetro de resistencia de Ge
6	Núcleo metálico de baja temperatura	14	Sujetador de muestra
7	Recipiente protector de la sal	15	Precepto
8	Recipiente de sal enfriada	16	Carcaza de la aspiradora de alta succión.

**Figura 26. Sistema de medida de calor específico**



#### **4.1.4. Temperatura magnética**

A continuación se presenta una tabla de termómetros que muestra los rangos que son efectivos para medir temperatura que son muy bajas para hacer mediciones.

**Tabla 6. Rangos de termómetros**

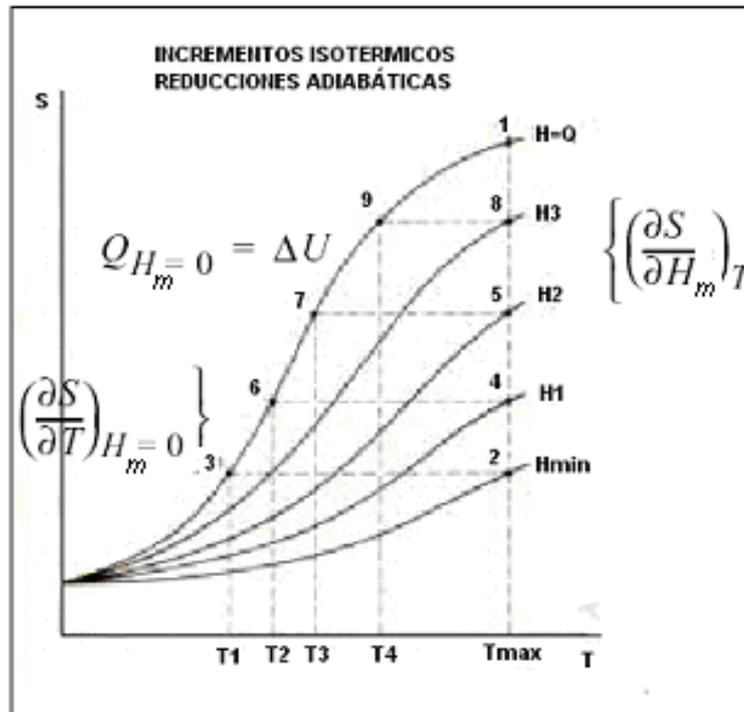
<b>Termómetros</b>	<b>Rango de aplicabilidad a bajas temperaturas</b>
PLATINO	13 °K – 20 °K
NITRÓGENO	1 °K – 13 °K
HELIO	Hasta 0.2 °K

La presión de equilibrio de 1 bar del helio es la última sustancia que se condensa, en aplicaciones de la refrigeración magnética de tipo militar o superconductividad utiliza temperaturas menores de 0.2 °K. La temperatura magnética viene definida por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{C}{X}$$

Esta ecuación se usa incluso por debajo de donde se cumple la ley de Curie, por lo que hay que buscar su relación con la temperatura °K verdaderas. A continuación se relacionará con la escala Kelvin. En la cual se puede ver en la figura 27.

**Figura 27. Incrementos isotérmicos y reducciones adiabáticas**



Se puede observar el comportamiento de la figura anterior y sus incrementos isotérmicos del campo magnético y reducciones adiabáticas del campo magnético en un diagrama T, S. La relación con la escala Kelvin es la siguiente:

- a. Se mide la susceptibilidad (que es ahora la variable termométrica) en los puntos 3, 5, 7, etc.

- b. Se calculan los incrementos de entropía en las imanaciones isothermas a distintos campos, es decir  $S_4 - S_2$ ,  $S_6 - S_2$ ,  $S_8 - S_2$ , pero estos cambios de entropía son iguales a  $S_5 - S_3$ ,  $S_7 - S_3$ ,  $S_9 - S_3$ , etc.
- c. A  $H_m = 0$  se mide el calor absorbido en los procesos 3 a 5, 3 a 7, de 3 a 9.
- d. Pero la temperatura verdadera en grados kelvin viene dada por la pendiente de la curva U frente a S, ya que:

$$Tds = du - \mu_0 H_m dM \quad \text{Y} \quad T = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_{H_m=0}$$

Por lo que con la gráfica  $\Delta U$  frente  $\Delta S$  ya se tiene la relación entre la coordenada del punto, y la pendiente de la curva en ese punto.

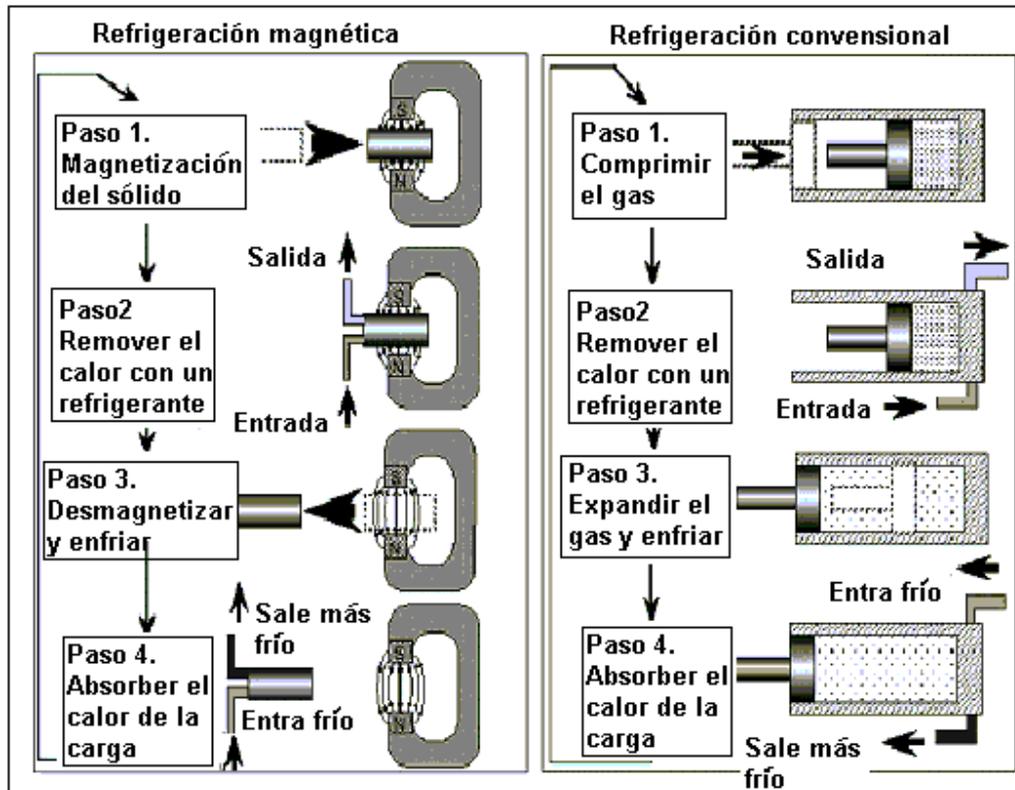
#### **4.1.5. Comparación del ciclo convencional al magnético**

La teoría molecular de los estados fluidos dice que cuando un objeto es sometido a cambios en la temperatura, la velocidad aleatoria de sus moléculas también cambia. Entonces se puede observar el comportamiento de las moléculas de gas cuando están sometidas a una compresión isotérmica y una expansión adiabática. Si la compresión es efectuada sin un enfriamiento externo, la temperatura crece causando que incremente la velocidad molecular.

Cuando un material paramagnético es expuesto a un campo magnético, la temperatura del material se eleva. La energía térmica que es generada es llamada calor de magnetización. Si la magnetización ocurre a una temperatura constante y el calor de la magnetización es removido por medios externos en analogía de la compresión isotérmica de un gas, se puede demostrar que la entropía decrece.

Cuando se remueve el campo magnético y el material paramagnético es altamente aislado para prevenir el aumento o pérdida de calor lo se puede comparar con la expansión adiabática de un gas que es demostrable que la entropía se encuentra en estado estable. También comparando con la separación molecular y la disminución de la velocidad durante la expansión del gas, es posible observar que en el material paramagnético hay cierta desalineación de los dipolos magnéticos, desarrollando una reducción de la temperatura. Y es durante este proceso tardío que la desmagnetización adiabática ocurre como el resultado del trabajo realizado contra el campo magnético cuando este se quita.

Figura 28. Comparación refrigeración magnética y convencional



#### 4.1.6. Regeneradores

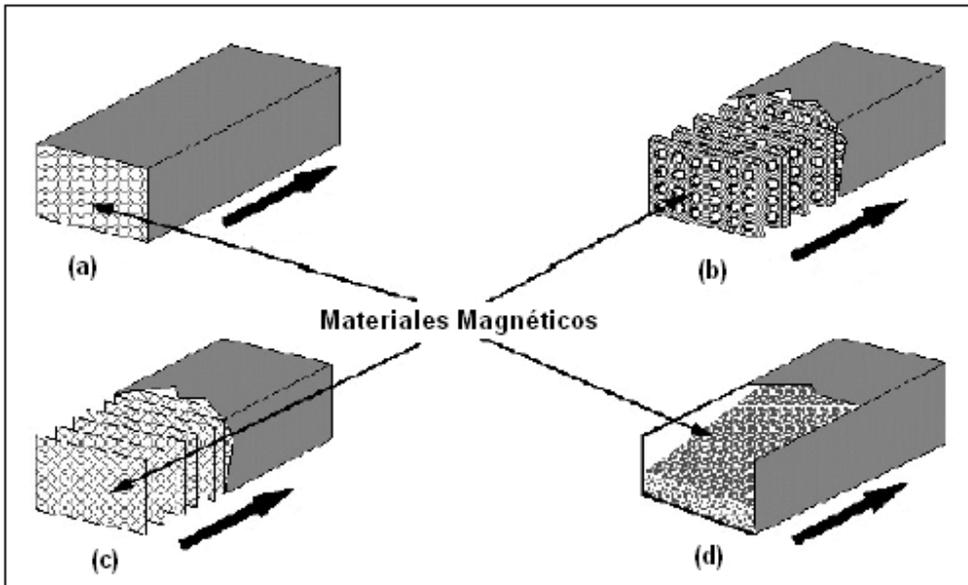
Son geometrías que permiten un cambio óptimo de calor entre el material magnético y el sistema con el que se quiere drenar o tomar el calor. Los regeneradores son intercambiadores en donde un fluido caliente fluye a través del mismo espacio seguido de uno frío en forma alternada, con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes.

La superficie, que alternativamente recibe y luego libera la energía térmica, es muy importante en este dispositivo. Las propiedades del material superficial, junto con las propiedades de flujo y del fluido de las corrientes fluidas, y con la geometría del sistema, son cantidades que deben conocer para analizar o diseñar los regeneradores. En los diversos tipos de intercambiadores que hay actualmente, los fluidos frío y caliente están separados por una pared sólida, en tanto que un regenerador es un intercambiador en el cual se aplica un tipo de flujo periódico. Es decir, el mismo espacio es ocupado alternativamente por los gases calientes y fríos entre los cuales se intercambia el calor.

En general, los regeneradores se emplean para recalentar el aire de las plantas de fuerza de vapor, de los hornos de hogar abierto, de los hornos de fundición o de los altos hornos y además en muchas otras aplicaciones que incluyen la producción de oxígeno y la separación de gases a muy bajas temperaturas. Para los intercambiadores estacionarios convencionales basta con definir las temperaturas de entrada y salida, las tasas de flujo, los coeficientes de transferencia de calor de los dos fluidos y las áreas superficiales de los dos lados del intercambiador. Pero para los intercambiadores rotatorios es necesario relacionar la capacidad térmica del rotor con la de las corrientes de los fluidos, las tasas de flujo y la velocidad de rotación.

A continuación se presenta una figura que enseña los regeneradores típicos: (a) Es de placas perforadas, (b) Ventanas de alambre, (c) son placas de partículas, (d) son materiales magnéticos en forma granulada.

**Figura 29. Regeneradores típicos**



#### **4.1.6.1. Eficiencia de un intercambiador**

La eficiencia de transferencia de calor se define como la razón de la transferencia de calor lograda en un intercambiador de calor a la máxima transferencia posible, si se dispusiera de área infinita de transferencia de calor. La mayor razón de capacidad se le designa mediante  $C$  y a la menor capacidad mediante  $c$ . En el caso del contra flujo, es aparente que conforme se aumenta el área del intercambiador de calor, la temperatura de salida del fluido mismo se aproxima a la temperatura de entrada del fluido máximo en el límite conforme el área se aproxima al infinito. En el caso del flujo paralelo, un área infinita sólo significa que la temperatura de ambos fluidos sería lograda si se permitiera que ambos se mezclaran libremente en un intercambiador de tipo abierto. Para dichos cálculos se encuentran expresiones aritméticas que expresan la transferencia de calor lograda por diferentes tipos de intercambiadores de calor.

#### 4.1.6.2. Clasificación por la distribución de flujo

Se tiene cuatro tipos de configuraciones más comunes en la trayectoria del flujo.

- En la ***distribución de flujo en paralelo***, los fluidos caliente y frío, entran por el mismo extremo del intercambiador, fluyen a través de él en la misma dirección y salen por el otro extremo.
- En la ***distribución en contracorriente***, los fluidos caliente y frío entran por los extremos opuestos del intercambiador y fluyen en direcciones opuestas.
- En la ***distribución en flujo cruzado de un sólo paso***, un fluido se desplaza dentro del intercambiador perpendicularmente a la trayectoria del otro fluido.
- En la ***distribución en flujo cruzado de paso múltiple***, un fluido se desplaza transversalmente en forma alternativa con respecto a la otra corriente de fluido.

#### 4.2. Tipos de refrigeradores magnéticos

Los refrigeradores magnéticos se pueden clasificar en función del rango de temperaturas en los que trabajen o en función del mecanismo que se utilizan para funcionar.

#### 4.2.1. Clasificación en función de la temperatura de trabajo

Su función inicial fue experimental bajo el mando del físico Petrus Josephus Debye aproximadamente en el año 1930. La investigación incluía su futuro uso en la exploración del espacio, así como en superconductores. De ahí que el rango de temperaturas que se maneja sea tan bajo.

1. **De 0.1 a 1.5 °K:** estos refrigeradores se utilizan en satélites para enfriar los aparatos de medida y permitir que su temperatura sea estable.
2. **De 1.5 a 4.2 °K:** la principal aplicación de los refrigeradores magnéticos a estas temperaturas es la obtención de helio fluido. El helio a 1.8 °K conduce mucho mejor la corriente eléctrica, llegando a tener propiedades superconductoras.
3. **De 4.2 a 20 °K:** este tipo de refrigeradores se ha construido como primera etapa de un refrigerador de dos etapas que trabaje desde 15 – 20 °K.
4. **De 20 a 77 °K:** estos refrigeradores son muy importantes, debido a su utilidad para hacer líquido el hidrógeno. Que actualmente se necesita enfriar con nitrógeno hasta 77 °K para poder hacerlo líquido. También este tipo de refrigeradores está tomando importancia ahora con el descubrimiento de materiales superconductores a este rango de temperatura.

Utilizando nuevos materiales como el Gadolinio (elementos de las tierras raras) se puede hacer sistemas de aire acondicionado que salten estos rangos de temperatura tan bajos y usarlos para diferentes usos de neveras domesticas, industriales o para beneficio en el enfriamiento de los automóviles de una manera óptima.

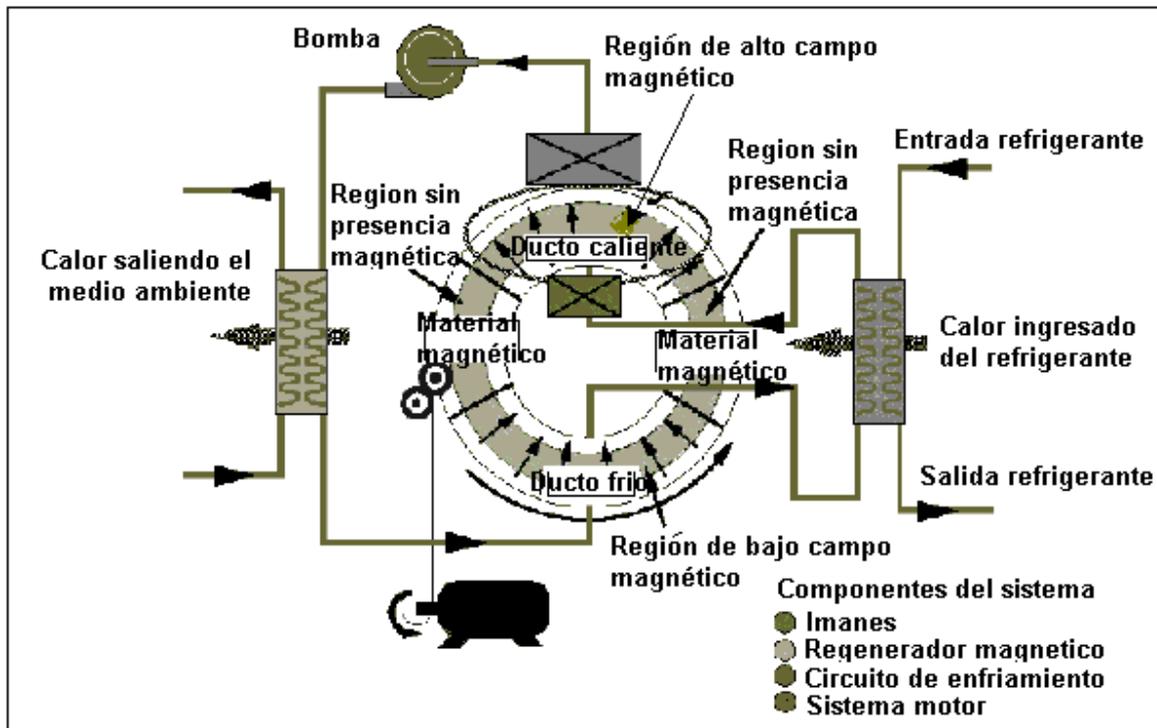
#### **4.2.2. Según su mecanismo**

Actualmente se encuentran tres tipos de refrigeradores magnéticos: rotativos, de pistón, de pulsos de corriente, o con Ferrofluidos.

##### **4.2.2.1. Rotativos**

En este tipo de sistema el material magnético que se magnetiza y desmagnetiza tiene forma circular y va girando a una velocidad determinada. En su alrededor hay una zona donde hay un campo magnético intenso, en la otra parte se pone en contacto con el medio ambiente, otra en la que se elimina el campo magnético y en la última que se pone en contacto con el material a enfriar. Este sistema es muy funcional para métodos prácticos, debido a su simplicidad y fácil colocación en sistemas automovilísticos. A continuación se presenta una figura la cual enseña un modelo tentativo de este sistema, muestra partes externas como la bomba de circulación el motor de manejo que pueden ser reemplazados por los del automóvil que ya están presentes y se le pueden hacer una adaptación.

Figura 30. Modelo rotativo



#### 4.2.2.2. Pistón

En este sistema el material magnético suele estar en forma de arena o de pequeñas bolitas. Un pistón se encarga de hacer la acción de meter y sacar este material que por lo regular es una sal paramagnética del campo magnético. El material se mete sin magnetizar y se saca magnetizado y a temperatura ambiente.



#### 4.2.2.4. Ferrofluidos

Un ferrofluido es un líquido que tiene propiedades magnéticas. Se suele crear partículas microscópicas de hierro recubiertas de alguna sustancia cargada eléctricamente negativa. Este recubrimiento es esencial para que las limaduras no se junten entre ellas, y atraigan a las partículas del medio en el que están suspendidas.

Los ferrofluidos presentan las mismas propiedades magnéticas que los materiales con los que están hechos. Esto los hace ideales para los refrigeradores magnéticos, pues se hace que un ferrofluido sea el líquido que sirve para intercambiar calor con el material a enfriar, así se evitará el uso de piezas mecánicas, tales como el pistón o el sistema rotativo de los refrigeradores anteriores.

**Figura 32. Muestra de ferrofluido atrayéndose**



## CONCLUSIONES

1. Como ya se sabe, el aire es una mezcla de gases que se encuentran en el ambiente y tiene características especiales, como la humedad, las cuales deben de ser tomadas en cuenta al momento en que se quiera acondicionar un espacio a cierta temperatura.
2. Existen coincidencias entre el sistema de refrigeración magnética y el sistema de refrigeración convencional de compresión de gas. Ambos consisten en 4 etapas definidas, las cuales dan como resultado el acondicionamiento de espacios a temperaturas menores a las anteriores de haber empezado a funcionar el sistema de refrigeración.
3. Existen nuevos métodos de refrigeración que están en proceso de investigación actualmente. Todos ellos con el propósito de hacer un sistema de aire acondicionado para la industria automotriz, que sea más eficiente, eliminando por completo el uso de CFC, que son los causantes del calentamiento global por medio de la destrucción de la capa de Ozono.

4. Los materiales que presentan propiedades ferromagnéticas permiten el desarrollo de un nuevo tipo de refrigeradores basados en el efecto magnetocalórico de estos materiales. Gracias a la utilización de los elementos de las tierras raras, se hace posible un refrigerador magnético que funciona en el rango de las temperaturas utilizadas en los hogares y la industria.

## RECOMENDACIONES

1. Este tipo de refrigeradores magnéticos es mucho más ecológico y fiable que los convencionales, pues no contienen gases perjudiciales como los CFC que dañan la atmósfera. Tienen un rendimiento mucho mayor y menos partes móviles, ahorrando espacio de implementación en los automóviles, haciéndolos más eficientes.
2. Investigando esta nueva tecnología se pueden encontrar modificaciones para elevar aun más su eficiencia, creando un refrigerador magnético que funciona con imanes permanentes. Esto ahorra la energía que se gastaba en producir el campo magnético requerido para funcionar. Por lo tanto derivará en un aparato más silencioso y cómodo en la implementación en la industria.
3. Explotando esta tecnología se puede abrir paso a nuevas empresas que desarrollen más este concepto para obtener sistemas de refrigeración que sean limpios y seguros a la hora de producirlos en serie. De esta manera se logrará la reducción de los costos para hacerlos más rentable.
4. Esta tecnología también debe ser compartida a todo nivel, no necesariamente exclusiva para automóviles. También para refrigeradores domésticos y cuartos de refrigeración de productos orgánicos.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunus. **Termodinámica**. 4ta edición. México: Editorial McGraw-Hill, 2003.
2. GUNTHER, Raymond C. **Refrigeration, air conditioning and cold storag**. 2da edición. New York: Editorial Chilton book company, 1969.
3. KITTEL, Charles. **Introducción a la física del estado sólido**. 3ª edición. Barcelona: Editorial Reverte, 1993.
4. KRAUS, John D. Y Daniel A. Fleisch. **Electromagnetismo con aplicaciones**. México: Editorial McGraw- Hill, 1999. Traducción Dra. Ana Elizabeth García Hernandez.
5. REITZ, Milford, Christy. **Fundamentos de la teoría Electromagnética**. 3ª edición. Addison – Wesley iberoamericana, 1986.
6. SCHWETZER, Gerald y A. Ebeling. **Curso completo de aire acondicionado**. (Centro regional para ayuda técnica, volúmenes 1 y 2). Argentina: Editorial Glem S.A.
7. VAN WYLEN, Gordon, Richard E. Sonntag y Claus Borgnakke. **Fundamentos de la Termodinámica**. 2ª edición. México: Editorial Limusa Wiley, 1999.
8. ZEMANSKY, Mark W. **Heat and thermodynamics**. 5ta edición. New York McGraw- Hill, 2003.