



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

**EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CICLO
DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

EDUARDO BERNAL VARGAS

**DR. GABRIEL ASCANIO GASCA - CCADET
DR. LEOPOLDO GONZÁLEZ GONZÁLEZ - FI. DIMEI**

CIUDAD UNIVERSITARIA 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

NOMENCLATURA

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	2
1.1.1 PREPARACION DE ALIMENTOS.....	3
1.1.2 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE ALIMENTOS	5
1.1.3 REFRIGERACIÓN EN INDUSTRIAS QUÍMICAS Y PROCESOS.....	6
INDUSTRIALES	6
1.1.4 USOS ESPECIALES DE LA REFRIGERACION	8
1.1.5 AIRE ACONDICIONADO PARA LA INDUSTRIA Y EL CONFORT.....	10
1.1.6 REFRIGERANTES	14
1.1.7 CICLO TEORICO DE REFRIGERACIÓN.....	22
1.1.8 CICLO REAL DE REFRIGERACION.....	27
1.2 EQUIPOS DIDACTICOS COMERCIALES	28
1.2.1 BOMBA MECANICA DE CALOR	28
1.2.3 UNIDAD DE DEMOSTRACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	32
1.2.4 CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN SENCILLO.....	33
1.2.5 CAMBIOS DE ESTADO EN EL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	34
1.2.6 INSTALACIÓN FRIGORÍFICA DE COMPRESIÓN	35
1.3 OBJETIVOS	37
1.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	38

2. METODOLOGIA.....	40
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE REFRIGERACIÓN.....	40
2.2 CARACTERIZACIÓN.....	48
2.2.1 CARACTERIZACIÓN SENSOR DE FLUJO.....	48
2.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN.....	50
2.2.3 CARACTERIZACIÓN SENSOR DE TEMPERATURA.....	52
3. RESULTADOS.....	54
3.1 SENSOR DE FLUJO.....	54
3.2 SENSOR DE PRESIÓN.....	59
3.3 SENSOR DE TEMPERATURA.....	63
4. CONCLUSIONES.....	76
5. REFERENCIAS.....	77
REFERENCIAS ELECTRONICAS.....	78

RESUMEN

Se presenta el diseño y desarrollo de un equipo didáctico de refrigeración por compresión de vapor que permite visualizar de forma más clara los cambios físicos que sufre el refrigerante a su paso por cada una de las partes básicas que componen al sistema.

Con la unidad didáctica de refrigeración se pretende que el estudiante:

1. Analice el comportamiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapor con tubo capilar y válvula termostática, como dispositivos de control de flujo.
2. Analice el comportamiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapor en función de la carga térmica.
3. Obtenga el diagrama presión-entalpía del sistema bajo diferentes condiciones termodinámicas.

Con la unidad didáctica se pretende que el alumno asocie un sistema de refrigeración para la conservación de alimentos y el acondicionamiento de aire, además visualice que este ciclo termodinámico tiene muchas otras aplicaciones tanto en la industria y como en la investigación.

ABSTRACT

This work presents the design and development of a didactic equipment of refrigeration by means of vapor compression that allows visualizing, in a clearer way, the physical changes that the refrigerating agent suffers when flowing through each one of the system basic components.

With the didactic unit of refrigeration it is expected that the student:

1. Analyze the behavior of a refrigeration system by means of vapor compression with capillary tube and thermostatic valve as flow control devices.
2. Analyze the behavior of a refrigeration system by means of vapor compression as a function of the thermal load.
3. Obtain the diagram pressure-enthalpy diagram of the system under different thermodynamic conditions.

With the didactic unit it is sought that the student associates a refrigeration system food conservation and air conditioning and also visualizes that this thermodynamic cycle has many other applications in the industry and research.

NOMENCLATURA

COP	Coeficiente de rendimiento
h	entalpía
\dot{m}	Gasto en masa o flujo másico
T	Temperatura
t	Tiempo
V	Volumen
P	Presión
Q_e	Capacidad de refrigeración
Q_c	Calor total eliminado del condensador
Q_w	Energía equivalente al trabajo del compresor
\dot{Q}	Caudal
q_e	Efecto refrigerante
q_w	Trabajo (calor) de compresión
W	Trabajo mecánico
J	Equivalente mecánico de calor
r	Coeficiente de correlación
$\sum_1^n x_i$	La suma $x_1 + x_2 + \dots + x_n$

1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza tradicional de las ciencias y la tecnología se basa esencialmente en un conocimiento o una experiencia lógico-matemática del alumno y muy poco en su experiencia práctica. No debemos olvidar que es importante centrar el aprendizaje de los alumnos en la experimentación y en la interpretación de los resultados. El actual proceso de enseñanza-aprendizaje está basado en un modelo centrado de la enseñanza, donde el profesor es el actor principal y el alumno, en un elevado número de casos, es un receptor pasivo (Carrio, 2007).

Las nuevas tecnologías pueden ser auxiliares para el desarrollo de las clases, desde el punto de vista de la didáctica, la tecnología puede proporcionarnos artefactos técnicamente transparentes, es decir productos de forma sencilla y funcionamiento evidente, ya sean eléctricos, electrónicos y mecánicos, en los que la relación entre la acción y el efecto sea inmediata, de esa manera el estudio, análisis y diseño será más eficiente.

Con ayuda de la tecnología se han diseñado equipos didácticos en diferentes disciplinas a todos los niveles educativos para el mejor aprendizaje de las ciencias, de esta manera se pretende diseñar un equipo a nivel licenciatura para el estudio del ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor (Baigorri, 1997).

El ciclo de refrigeración es un ciclo termodinámico en el cual se llevan a cabo efectos físicos y de transferencia de calor. Cabe mencionar que las aplicaciones de la refrigeración no solo son la elaboración de hielo o el confort en lugares cerrados. La refrigeración tiene aplicaciones muy importantes en la industria y la investigación tales como separación y condensación de gases, almacenamiento en estado líquido a baja presión, disipación del calor de reacción, control de fermentación, tratamiento frío de metales por mencionar algunos.

Este trabajo describe el proceso de diseño y fabricación de un equipo didáctico de refrigeración por compresión de vapor que sirva como herramienta al profesor del

laboratorio para que el alumno pueda visualizar con mayor facilidad esta disciplina.

Cabe mencionar que este equipo será utilizado en el Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

1.1 ANTECEDENTES

La refrigeración se puede definir como cualquier proceso de eliminación de calor, o también como la rama de la ciencia que trata de los procesos de producción y mantenimiento de la temperatura en un espacio o material a temperatura inferior con respecto a los alrededores correspondientes.

La refrigeración moderna tiene muchas aplicaciones, la principal y más importante es la conservación de alimentos. La mayor parte de los alimentos expuestos a la temperatura ambiental tienden a descomponerse, lo cual es debido al rápido crecimiento de bacterias.

La temperatura normal de operación para que esto no ocurra es 4.4 °C aproximadamente (Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 1979), en la cual la bacteria crece muy lentamente y los alimentos, a esta temperatura, se conservan más tiempo en buen estado.

Otros de los usos de la refrigeración es el aire acondicionado y en varias empresas de manufactura la refrigeración es empleada para la elaboración de sus productos. Al paso del tiempo la refrigeración ha sufrido una sorprendente transformación ya que se pueden almacenar grandes cantidades de alimentos, mantener una temperatura agradable en grandes auditorios, producir bajas temperaturas para la conservación de muestras biológicas.

En otro tiempo, el único uso que se le daba a la refrigeración era la elaboración de hielo. En la actualidad las aplicaciones que tiene la refrigeración las podemos clasificar en cuatro grupos: Producción y distribución de alimentos, uso en

procesos industriales e industrias químicas, aplicaciones especiales de la refrigeración y aire acondicionado para la industria y el confort. (Stoecker, 1970).

1.1.1 PREPARACION DE ALIMENTOS

Las fases principales de la industria de los alimentos son la preparación, el almacenamiento y la distribución. Mientras que muchos alimentos, tales como ciertas frutas y vegetales, pueden almacenarse y distribuirse en su estado natural, otros requieren una preparación, siendo la refrigeración uno de los factores principales en esta etapa.

Productos lácteos.- Los principales productos lácteos son la leche, el helado y la mantequilla. En las granjas, la leche pasa sin demoras desde que es ordeñada hasta un tanque refrigerador, que enfría a 10 °C ó 15 °C (Stoecker, 1970). Un camión tanque la transporta a las lecherías donde, después de la pasteurización, se enfría a 2 ó 3 °C en un intercambiador de calor.

Para preservar la calidad de la leche se utiliza la refrigeración en numerosas etapas posteriores durante su distribución.

En la elaboración de helados, los ingredientes son primeramente pasteurizados y mezclados, a continuación, el equipo de refrigeración enfría la mezcla a 3 °C ó 4 °C, después de lo cual entra en el congelador.

El congelador hace descender la temperatura a -7 °C ó -4 °C y en tales condiciones la mezcla se endurece, pero permanece lo suficientemente fluida para que pueda verterse en recipientes, los cuales se transportan a la planta de endurecimiento, donde se mantienen a temperaturas comprendidas entre - 20 °C y - 30 °C. Desde aquí, antes de su utilización, los helados deben almacenarse a una temperatura por debajo de la de congelación. Otros postres helados necesitan también durante su preparación ser refrigerados a bajas temperaturas. Tanto en la fabricación como en el almacenamiento de la mantequilla y del queso, la refrigeración aumenta la vida y conserva la calidad de los productos.

Envasado de la carne.- Primeramente en las operaciones de envasado, la refrigeración de la carne se emplea y se continúa hasta que ya va a prepararse para su consumo, con el sencillo y esencial fin de conservarla, para largos periodos de almacenamiento, la carne permanece en cámaras mantenidas a temperaturas entre 0 °C y 1 °C, y puede también conservarse en recipientes de tamaño apropiado para el consumo y congelarse. Después de la congelación se mantiene entre -18 °C y -23 °C.

Conservación de pescado.- Se ha venido prestando atención desde hace mucho tiempo a la necesidad de conservar el pescado desde que se captura hasta que el barco vuelve al puerto. La conservación en hielo viene practicándose desde 1938 y actualmente se buscan métodos más eficaces de refrigeración mecánica para conservar el pescado. La congelación dentro del barco en el mar es preferible a la conservación en hielo en espera de que el barco llegue a puerto para después congelarlo. Está en estudio la congelación del pescado por inmersión en salmuera a - 15 °C.

En lo que se refiere a las bebidas, la refrigeración es esencial en la producción de estas, tales como el jugo de frutos concentrados, cerveza y vino. Por otra parte, el gusto de muchas bebidas se mejora sirviéndolas frías.

Los jugos concentrados son populares por su buena calidad y razonable precio, es menos costoso concentrar un jugo y transportarlo congelado que transportar el fruto crudo. El jugo de naranja es el más popular de los jugos concentrados. Para conservar el gusto del jugo se hace hervir su agua a una temperatura baja, lo cual requiere que el proceso se realice a presión por debajo de la atmosférica. Se necesita refrigeración para congelar los jugos a la salida del concentrador, y para mantener una temperatura de -18°C durante el transporte y almacenamiento.

En la industria cervecera, la refrigeración controla la reacción de fermentación y preserva algunos de los productos intermedios y finales. Para producir una cerveza que pueda conservarse, debe realizarse la fermentación a temperatura

entre 7 °C y 13 °C, y la refrigeración mantiene esta temperatura a pesar del calor desprendido por la reacción.

El vino también es resultado de un proceso de fermentación, y para mejorar la calidad del vino, la reacción debe realizarse a temperaturas por debajo de 25 °C. Otro uso de la refrigeración en las fábricas de vino es para apresurar la congelación del crémor tártaro con el fin de que pueda separarse más fácilmente.

1.1.2 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE ALIMENTOS

Una enorme capacidad de refrigeración se utiliza en todo el país para conservar los alimentos. El almacenamiento de alimentos fríos puede hacerse a temperaturas ligeramente por encima de 0 °C, o más bajas, como es el caso de los alimentos congelados.

Muchas carnes y vegetales pueden congelarse para que conserven un gusto que casi mejora el de los productos frescos. Para la preparación y manipulación de los alimentos congelados se hace un gran uso de la refrigeración, el alimento, después de clasificado y preparado es congelado a temperaturas frecuentemente de -30 °C. La supercongelación o descenso brusco de la temperatura en el intervalo de congelación, mantiene los cristales del hielo muy pequeños e invisibles. Un congelador, congela los paquetes de alimentos, mientras que grandes almacenes refrigerados conservan los alimentos congelados a temperaturas entre -18 °C y - 23 °C, hasta que se transportan, en vagones o camiones refrigerados a las tiendas donde los alimentos esperan la venta en escaparates refrigerados.

Almacenamiento en frío.- Algunos alimentos no se prestan a ser congelados, pero su vida aumenta cuando se almacenan fríos a temperaturas ligeramente por encima de los 0°C. Muchas frutas, tales como manzanas, peras, uvas y frutos cítricos, pueden almacenarse durante meses manteniéndolos a temperaturas convenientes.

El punto final del almacenamiento de la mayoría de los alimentos es el frigorífico congelador o casero. Las ventas de frigoríficos caseros han alcanzado ya la saturación; el número de los congeladores domésticos continuará aumentando de la misma manera que el consumo de alimentos congelados, en el proyecto de congeladores domésticos, la tendencia es hacia compartimientos cada vez mayores para alimentos congelados.

1.1.3 REFRIGERACIÓN EN INDUSTRIAS QUÍMICAS Y PROCESOS INDUSTRIALES

La refrigeración se aplica en gran escala en la industria química y en los procesos industriales. Las principales aplicaciones de la refrigeración en este tipo de industrias son: (1) Separación de gases; (2) condensación de gases; (3) de secado del aire; (4) precipitación de un soluto desde una solución; (5) almacenamiento a baja presión en estado líquido; (6) proceso de enfriamiento; (7) disipación del calor de reacción; (8) recuperación de disolventes; (9) control de fermentación; y (10) enfriamiento para la conservación.

Separación de gases.- Pueden separarse los componentes del aire por enfriamiento hasta la licuefacción y posteriormente destilación fraccionada. En las plantas petroquímicas se usan bajas temperaturas para separar gases; pueden necesitarse temperaturas por debajo de los $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Condensación de gases.- Las plantas de amoníaco sintético, por ejemplo, condensan el gas amoníaco a temperaturas entre $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, antes del almacenamiento y transporte.

Secado del aire.- La refrigeración es uno de los medios de extracción de la humedad del aire. Se necesita aire seco en la producción de oxígeno de alta pureza y en la preparación de productos farmacéuticos.

Precipitación de un soluto.- Un ejemplo de este proceso es el desencerado del petróleo en la industria petrolera. La cera precipita alrededor de $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$, y puede entonces separarse por filtrado.

Almacenamiento en estado líquido a baja presión.- El almacenamiento de una sustancia en estado líquido en vez de gaseoso permite muchas veces almacenar más sustancias en un volumen dado. Un gas natural, por ejemplo, puede enfriarse a $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ y almacenarse en estado líquido a una presión de 1.7 kg / cm^2 . El calor que atraviesa las paredes del recipiente hace hervir al líquido, generándose un poco de gas, que a continuación se comprime, se enfría, y se expande hasta la baja presión y baja temperatura del líquido.

Procesos de enfriamiento.- Una gran variedad de procesos están comprendidos en esta categoría, un ejemplo es el enfriamiento de la cera a $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ para endurecerla sobre papel.

Disipación del calor de reacción.- Muchas reacciones químicas, aún siendo exotérmicas deben realizarse a temperaturas más bajas que la del ambiente. En este caso, la refrigeración debe absorber el calor, como sucede en la reacción de rayón viscoso, acetato de celulosa y caucho sintético.

Recuperación de disolventes.- Numerosos disolventes, tales como la acetona en la fabricación de película, el tetracloruro de carbono en la producción textil y el disulfuro de carbono en la producción de caucho, pueden recuperarse por refrigeración.

Control de fermentación.- El calor generado durante la fermentación debe disiparse para que la temperatura de los cuerpos que reaccionan no se salga de control. Por ejemplo, la refrigeración mantiene la temperatura entre $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es la requerida en la formación del alcohol y de la penicilina.

Enfriamiento para la conservación.- Del mismo modo que los alimentos necesitan bajas temperaturas para aumentar su duración, muchos productos no

alimenticios, tales como el caucho natural, ciertas drogas y explosivos, tienen una mayor duración cuando se almacenan a temperaturas entre 5 °C y 15 °C.

1.1.4 USOS ESPECIALES DE LA REFRIGERACION

La refrigeración tiene otras muchas aplicaciones, y cada año aparecen otras nuevas algunas de las aplicaciones especiales de la refrigeración que se mencionaran no han adquirido importancia hasta los últimos años.

Tratamiento frío de metales.- Una aplicación de la refrigeración que se extiende rápidamente es el tratamiento frío de los metales. El tratamiento frío a -100 °C, ayuda a estabilizar las dimensiones de las piezas y medidores de precisión. Si un acero cementado se somete durante 30 minutos a una temperatura de - 87 °C, aumentará su dureza y la resistencia al desgaste. La vida del filo cortante de las herramientas aumenta refrigerándolas a -100 °C durante 15 minutos. La refrigeración también mejora la ductilidad para las embuticiones profundas, la fuerza magnética y la estabilidad de los imanes se mejoran por un tratamiento a baja temperatura de -84 °C durante ocho horas aproximadamente. En la tecnología de la fundición pueden usarse modelos de mercurio congelado para producir piezas de pequeñas tolerancias y de finos acabados superficiales. Los modelos de mercurio congelados se fabrican vertiendo mercurio líquido en matrices donde el mercurio se solidifica al enfriarse a -73 °C, la pieza de mercurio sólido sirve después de modelo para hacer el molde.

Medicina.- La fabricación de drogas y productos farmacéuticos necesita el uso de la refrigeración para algunas operaciones. Una técnica poco común consiste en usar la refrigeración local como anestesia quirúrgica. La ventaja de esta técnica consiste en que, no sólo los nervios, sino todo el protoplasma se anestesia, consiguiéndose así una cirugía sin conmociones. El plasma sanguíneo y los antibióticos se obtienen usando un método llamado congelación seca. La congelación seca es la separación del agua por sublimación a baja temperatura y baja presión, lo que es menos peligroso para los tejidos que la separación del agua a altas temperaturas.

Pistas de patinaje.- Los patinadores, jugadores de *hockey* y esquiadores no pueden esperar a que el tiempo atmosférico sea lo suficiente frío para que se hiele el agua de sus pistas, por ese motivo, se colocan tuberías que llevan una salmuera fría, dentro de la pista de arena, sobre la que después se vierte agua, que se solidifica.

Construcción.- En la industria de la construcción se utilizan equipos de refrigeración que enfrían el hormigón para evitar su agrietamiento, y se congela a veces el terreno para facilitar las excavaciones. Cuando se vierte una gran masa de hormigón, puede ser necesario enfriarlo. En la reacción química que tiene lugar durante el endurecimiento, se desprende calor, que si no es extraído, hace dilatar al hormigón, originando tensiones en su interior. El hormigón puede refrigerarse bien enfriado en arena, grava, agua y cemento antes de la mezcla o bien introduciendo en él tuberías de refrigeración.

Un problema que siempre ha tenido la industria de la construcción es el de los derrumbamientos de terreno húmedo al hacer un pozo. Una solución consiste en colocar tuberías verticalmente en un anillo circular que rodea al pozo y bombear una salmuera a través de las tuberías, enfriando de esta manera el anillo de tierra, el pozo puede entonces cavarse dentro del anillo de tierra congelado.

Purificación del agua del mar.- Actualmente es un problema nacional el conseguir un suministro suficiente de agua potable, y el problema se agudizará aún más en el futuro. Se ha pensado en transformar el agua del mar en agua potable, y uno de los medios de lograrlo consiste en hacer uso de la refrigeración. En esencia, el proceso consiste en fabricar hielo, que está relativamente libre de sal, a partir del agua del mar, separarlo de la salmuera que queda y fundirlo después para convertirlo en agua potable (Stoecker, 1970).

1.1.5 AIRE ACONDICIONADO PARA LA INDUSTRIA Y EL CONFORT

El aire acondicionado es un proceso de tratamiento de aire ambiente que permite regular en un local cerrado la temperatura de ese espacio, la humedad, la limpieza y el movimiento del aire.

Al principio las instalaciones de aire acondicionado se destinaban más bien a la mejora de procesos y materiales que al confort de la gente. Por esta razón, el crecimiento del aire acondicionado en la industria ha sido constante, pero no tan espectacular como el aire acondicionado para el confort.

Aire Acondicionado Industrial.- Donde se utiliza con mayor frecuencia es en laboratorios, imprentas, talleres de mecánica de precisión y en la fabricación de productos textiles, acero, productos farmacéuticos y productos fotográficos.

Laboratorios. El objetivo del acondicionamiento del aire varía de un laboratorio a otro. En unos puede ser para proporcionar confort al personal que labora dentro del laboratorio mientras que en otros la temperatura pueda mantenerse a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para estudiar el comportamiento de un equipo a bajas temperaturas además de ayudar a los médicos y biólogos a estudiar los efectos de la temperatura y humedad sobre los seres vivos.

Imprentas. El control de la humedad es una de las razones primordiales para la utilización del aire acondicionado. Cuando se imprime un multicolor, el papel pasa a través de la prensa una vez para cada color, si la humedad no es constante, el papel se encoje o se estira, lo que origina una mala impresión de los colores. Otro problema que enfrenta esta industria si no se tiene controlada la humedad es la electricidad estática, los rizos u ondulaciones del papel y el mal secado de la tinta.

Mecánica de precisión. El aire acondicionado realiza tres servicios en la fabricación de piezas mecánicas de precisión: conserva la temperatura uniforme, con lo que el metal no se dilata ni se contrae; mantiene una humedad tal que no hay peligro de oxidación de los metales; y filtra el aire para reducir al mínimo el polvo.

Fabricas textiles. Lo mismo que en el papel, los tejidos son sensibles a los cambios de humedad y en menor escala a los cambios de temperatura. Los hilados en las plantas textiles modernas se mueven a enormes velocidades y los cambios en la flexibilidad y resistencia de la tela o la generación de electricidad estática deben evitarse.

Plantas siderúrgicas. Desechado el aire antes de que entre al horno alto, se mejora la calidad del acero y se reduce la cantidad de coque necesario por tonelada de acero.

Productos farmacéuticos. Las fábricas de productos farmacéuticos necesitan el aire acondicionado para eliminar las bacterias aéreas y el polvo, además de conservar los productos. Las cápsulas de gelatina, por ejemplo, necesitan de un aire muy seco. Los productos glandulares pierden su efectividad si la temperatura aumenta demasiado. Las píldoras y tabletas requieren unas condiciones de aire precisas para mantener su calidad.

Productos fotográficos. Esta industria hace gran uso de la refrigeración, los materiales fotográficos recién se deterioran rápidamente si se exponen a altas temperaturas y humedades y otros materiales que se usan en el revestimiento de las películas necesitan un cuidadoso control de la temperatura. La película elaborada debe almacenarse en lugares de baja humedad.

Aire Acondicionado para el Confort. La diversidad de climas existentes durante el año demanda el acondicionamiento del clima en los lugares de permanencia de las personas, para mejorar su calidad de vida.

El objetivo de un sistema de aire acondicionado es proporcionar un ambiente confortable. Esto se consigue mediante el control simultáneo de la humedad, la temperatura, la limpieza y distribución del aire. Algunos de los equipos de aire acondicionado más utilizados para el confort tanto en los hogares, comercios, auditorios, centros comerciales, hoteles y transporte se describen a continuación.

Aire acondicionado de ventana.- Este equipo consiste en una unidad cuadrada la cual contiene todas las partes funcionales del sistema. El equipo debe colocarse en el espacio de una ventana o muro exterior de tal forma que la mitad del equipo quede en el interior y la otra en el exterior.

Estos equipos tienen un bajo costo de instalación y fácil mantenimiento, la desventaja de estos equipos es el consumo elevado de energía eléctrica, además de ser generalmente muy ruidosos.

Consolas de pared o techo.- También llamados Split, estos equipos de aire acondicionado son los más populares en la actualidad en los hogares y pequeños comercios, ya que presentan muchas ventajas frente a los equipos de ventana, son relativamente económicos. La unidad que contiene al compresor se encuentra instalada en el exterior y se comunica con la unidad interior que contiene al evaporador, colocada en la pared o techo mediante conexión con tubo de cobre.

La variedad de potencia en estos equipos es muy amplia esto permite mantener una temperatura de confort en espacios mucho más grandes con una sola consola, los niveles de ruido son muy bajos además de ser muy estéticos sobre todo los de última generación, el mantenimiento es sencillo, la desventaja es el costo mayor en la instalación ya que se complica en determinados sitios como en paredes prefabricadas.

Aire acondicionado portátil.- Se incorpora todo el sistema en una caja acoplada con ruedas de tal forma que se puede transportar fácilmente de un lugar a otro, este tipo de equipos no requiere instalación, emite poco ruido, suelen ser bastante caros si tenemos en cuenta la relación calidad-precio ya que no son muy potentes.

Aire acondicionado de conductos.- La idea es la misma que en los de tipo Split pero la instalación es mucho mayor. Su costo es muy elevado pero ofrece un alto nivel de confort, la ventaja que ofrecen estos equipos es el valor que agregan a la vivienda que cuenta con ellos, el mantenimiento es sencillo, la desventaja en estos equipos es la instalación ya que se deben utilizar ductos, plafones y techos rasos.

Aire acondicionado para automóvil.- El automóvil ha sufrido una evolución continua desde que se inventó a finales del siglo pasado. Se han agregado numerosas características de comodidad, como los sistemas de aire acondicionado. El sistema de aire acondicionado se está convirtiendo en uno de los sistemas más durables de un automóvil y también se está haciendo más complejo. Este sistema está diseñado para brindar comodidad al conductor, el sistema debe de mantener dentro del vehículo la temperatura y humedad en el rango que sea cómodo (confort).

La desventaja de este sistema de aire acondicionado radica en el consumo de combustible del vehículo cuando está en operación, sobre todo cuando la temperatura en el exterior es muy elevada y en el interior se requiere una temperatura de confort para el conductor.

1.1.6 REFRIGERANTES

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

En la práctica no existe el refrigerante ideal y los refrigerantes comerciales deben acercarse en cuanto a sus propiedades, para satisfacer las condiciones y necesidades para su aplicación a que han sido fabricados. Los refrigerantes seleccionados deben llevar los siguientes requisitos:

1. No debe ser tóxico.
2. No debe ser corrosivo.
3. No debe ser explosivo.
4. No debe ser inflamable.
5. Fácil de detectar fugas.
6. Operarse a baja presión.
7. Debe ser un gas estable.
8. Debe tener un calor latente alto por libra para producir un buen efecto de enfriamiento por libra de vapor.
9. Debe tener un bajo volumen de vapor por libra. Esto reducirá el desplazamiento del compresor
10. La diferencia de presión, entre la presión de evaporación y la presión de condensación, deberá ser tan pequeña como sea posible para incrementar la eficiencia del bombeo.

El agua fue el primer refrigerante, con una larga historia de uso, continuando hasta nuestra época. Con el paso del tiempo, se han hecho mejoras en cuanto a su manejo y almacenamiento, pero aún se utiliza el hielo natural por todo el mundo. El uso histórico y fundamental del hielo, ha sido reconocido en una unidad

de refrigeración: la tonelada de refrigeración, la cual se define como la cantidad de calor que se requiere para fundir dos mil libras de hielo en 24 horas.

En refrigeración se dio un gran paso adelante, allá por el año 1600, cuando se descubrió que una mezcla de hielo con sal, producía temperaturas más bajas que el hielo solo. En cierta manera, ésta fue la primera mejora sobre la naturaleza en el campo de la refrigeración.

Hacia finales del siglo XVIII, la inventiva del hombre se había dirigido hacia la producción de frío en el momento y tiempo que se deseara. Se desarrollaron máquinas para disminuir la presión del vapor del agua y acelerar su evaporación. También recibió considerable atención el arte de producir frío por la liberación de aire comprimido.

Durante la primera parte del siglo XIX, se desarrollaron máquinas para la compresión de vapor y se probaron muchos fluidos como refrigerantes, entre los que sobresalieron el amoníaco, bióxido de carbono, bióxido de azufre, cloruro de metilo y en cierta medida, algunos hidrocarburos. A finales del siglo, la refrigeración mecánica estaba firmemente establecida.

Por muchos años (desde 1876), al amoníaco se le han encontrado excelentes propiedades como refrigerante, y desde entonces, ha sido el refrigerante más utilizado comúnmente. Aún en la actualidad, ha demostrado ser satisfactorio, sobre todo en refrigeración industrial en grandes plantas.

En las décadas siguientes, la atención fue orientada hacia el mejoramiento del diseño mecánico y la operación de los equipos, a principios del siglo XX, se desarrollaron las unidades domésticas y los refrigerantes en uso en ese tiempo, padecían de una o más propiedades riesgosas. Algunos eran tóxicos, otros inflamables, y otros más operaban a muy altas presiones; por lo que para estos equipos más pequeños, los ingenieros se enfocaron al refrigerante de más baja presión de operación: el bióxido de azufre. Este refrigerante tiene algunas fallas serias, como la formación de ácido sulfuroso cuando se combina con el agua; es

muy corrosivo y ataca las partes del sistema. Adicional a esto, cuando se fuga aún en pequeñísimas cantidades, causa tos violenta y ahogamiento.

Estas cualidades indeseables, obligaron a los fabricantes a hacer las unidades menos propensas a fugas, logrando reducir los requerimientos de servicio hasta un punto, donde las desventajas del refrigerante no eran tan grandes. Literalmente, se construyeron millones de esas unidades que utilizaban bióxido de azufre, las cuales operaban satisfactoriamente.

En 1928, la industria de la refrigeración, creó un nuevo refrigerante seguro y estable, no tóxico, no corrosivo ni inflamable, y que tenía las características necesarias para usarse en equipos compactos. Sabían que las combinaciones de flúor eran muy estables, así que, se experimentó con algunos de los compuestos químicos comunes de carbono, cloro e hidrógeno, sustituyendo átomos de cloro e hidrógeno por átomos de flúor, y en poco tiempo, se logró sintetizar el diclorodifluorometano (CCl_2F_2). Se demostró que no era inflamable y que tenía una toxicidad inusualmente baja.

En 1929 se desarrolló un proceso comercial práctico para la fabricación del nuevo refrigerante. Con este desarrollo nació la industria de los refrigerantes halogenados, ninguno de los cuales existía antes. El primero de ellos fue el Freón 12 (Dupont), su composición química es CCl_2F_2 que durante muchos años fue el más utilizado en casi todos los equipos de refrigeración doméstica y aire acondicionado para vehículos. De allí siguieron el Freón 11 cuya composición química es CCl_3F (triclorofluorometano), y el Freón 22 (CHClF_2 - clorodifluorometano), cada uno con sus características especiales.

Con el fin de eliminar el complicado uso de nombres químicos de los refrigerantes se identifican por números después de la letra R, que significa "refrigerante"; los números que aparecen posteriormente están relacionados con la fórmula química del refrigerante, que indican el número de átomos de flúor, hidrógeno y carbono que contienen cada uno de ellos. El sistema de identificación ha sido estandarizado por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). Es necesario estar familiarizado con los números, así

como con los nombres de los refrigerantes. En la Tabla A-1, aparecen los refrigerantes más comunes, así como las aplicaciones de cada uno de ellos.

Nº Refrigerante	Nombre	Composición química	Aplicaciones
		COMPUESTOS INORGÁNICOS	
R717	Amoniaco	NH ₃	Refrigeración industrial
R718	Agua	H ₂ O	Refrigeración industrial
R744	Dióxido de carbono	CO ₂	Refrigeración industrial
Hidrocarburos		COMPUESTOS ORGÁNICOS	
R170	Etano	CH ₃ CH ₃	Refrigeración industrial. Sistemas en cascada.
R290	Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃	Mesclas, enfriadores industriales, A/A pequeños.
R600_a	Isobutano	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	Refrigeración doméstica. Inflamable.
Clorofluorocarbonos (CFC)		Hidrocarburos Halogenados	
R11	Triclorofluorometano	CCl ₃ F	Chillers de baja presión espumado.
R12	Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂	Refr. Doméstica, A/A vehículos.
R115	Cloropentafluoroetano	C ₂ F ₅ CL	Baja temperatura. Efecto invernadero alto.
Hidroclorofluorocarbonos(HCFC)			
R22	Clorodifluorometano	CHClF ₂	A/A, bombas de calor, refrigeración comercial e industrial.
R141b	1,1dicloro-1-fluoroetano	CH ₃ CCl ₂ F	Espumado, solvente.
R142b	1-cloro-1,1difluoroetano	CH ₃ CClF ₂	Alta temperatura. Inflamable.
Hidrofluorocarbonos (HFC)			
R32	Difluorometano	CH ₂ F ₂	Baja temperatura, inflamable.
R125	Pentanfluoroetano	CHF ₂ CF ₃	Efecto invernadero alto, baja y media temperatura.
Mezclas Azeotrópicas			
R502	HCFC+CFC	R22/R115	Refrigeración comercial baja temperatura, refrigerante de equipos móviles
R507	HFC+HFC	R125/R134 _a	Reemplaza al R502, gabinetes de supermercados, temperaturas baja y media.

Tabla A-1. Clasificación de los principales refrigerantes.

Sin embargo, el desarrollo de los refrigerantes Freón no tuvo una recepción entusiasta. Las comisiones de seguridad eran prudentes en sus sanciones; los técnicos de servicio estaban inconformes respecto a las fugas, porque no los podían detectar con el olfato; los contratistas los rechazaban porque costaban más que el bióxido de azufre, y algunos de los fabricantes líderes, se rehusaban a diseñar el equipo de refrigeración que se ajustara a las propiedades termodinámicas de estos refrigerantes.

Gradualmente, surgieron diseños que usaban pequeñas cantidades de estos refrigerantes costosos. Se diseñaron compresores, evaporadores, condensadores e intercambiadores de calor; se construyeron unidades paquete con un mínimo de uniones, y cada unión estaba cuidadosamente diseñada y fabricada para eliminar fugas. Se utilizaron nuevos materiales que no podían ser utilizados con seguridad con los antiguos refrigerantes, los técnicos se volvieron expertos en la detección de fugas, y el Freón arribó como un refrigerante aceptado. El resultado fue que los freones eran virtualmente la base de todas las unidades pequeñas, y eran usados también en trabajos grandes de aire acondicionado.

Para la década de los setenta, ya había sospechas de que estos compuestos afectaban la capa de ozono de la atmósfera, pero no se podía demostrar, y tal aseveración no era aceptado por los fabricantes. Al principio de los ochenta, estudios hechos por científicos de la NASA por medio de satélites, descubrieron un “adelgazamiento” de la capa de ozono en la Antártida, y estudios posteriores, comprobaron que el deterioro del ozono estratosférico era debido a la emisión de compuestos halogenados, principalmente los que contienen bromo y cloro.

Después de varios años de negociaciones, se llevó a cabo un acuerdo internacional en 1989 en la ciudad de Montreal, Canadá, por lo que se le conoce como el Protocolo de Montreal. Este protocolo es un esfuerzo unido de gobiernos, científicos, industrias y grupos ecologistas coordinados por la UNEP (Programa Ambiental de las Naciones Unidas). Este acuerdo consistió en regular la producción y uso de los clorofluorocarbonos (CFC) de manera gradual, hasta su total desfasamiento antes del año 2000, partiendo de la base de los niveles de producción mundial que había en 1986.

Mientras tanto, los fabricantes de refrigerantes trabajaban en la búsqueda de productos nuevos para substituir los que iban a desaparecer. Rápidamente desarrollaron compuestos para substituir al R-11 y al R-12, que tienen propiedades termodinámicas muy similares, pero que no afectan la capa de ozono. Estos refrigerantes son el R-123 y el R-134a, respectivamente, que en la actualidad ya se están produciendo comercialmente, y algunos fabricantes de equipo original ya los están incluyendo en sus unidades. Dichos productos pueden utilizarse también en equipos usados que actualmente funcionan con R-11 o R-12, haciendo algunas modificaciones al compresor, tales como utilizar aceite sintético en lugar de aceite mineral y cambiar algunos sellos o empaques, por otros de diferente material. Actualmente, y después de que se comprobara que precisamente estos elementos eran algunos de los que contribuían al agotamiento de la capa de ozono, se vivió una segunda revolución en el mundo de los gases refrigerantes.

Así aparecieron los llamados refrigerantes ecológicos, junto con la llegada de autos modernos y también de los refrigeradores y congeladores importados, aparecieron en nuestro mercado gases refrigerantes como el R134a y el R404a.

El gas refrigerante 134a (tetrafluoroetano), que es el sustituto del refrigerante R-12, no daña la capa de ozono, además tiene una gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad, no es inflamable y tiene una excelente compatibilidad con la mayoría de los materiales. Este refrigerante no es miscible con los aceites tradicionales del R-12 (mineral y alquilbenceno); en cambio su miscibilidad con los aceites sintéticos es completa, es utilizado en refrigeración doméstica y comercial así como en aire acondicionado. En la Tabla A-2, se muestran las propiedades del refrigerante.

Tipo de Gas		R-134a
Nombre químico		1,1,1,2-Tetrafluoroetano
Fórmula química		CF ₃ -CH ₂ F
Número CAS		811-97-2
Masa molecular	kg/kmol	102,0
Temperatura de ebullición a 1.013 bar	°C	-26,3
Punto de fusión a 1.013 bar	°C	-101
Temperatura crítica	°C	101,1
Presión crítica	bar	40,6
Densidad del líquido a -15 °C	g/cm ³	1,343
Densidad del líquido a 30 °C	g/cm ³	1,188
Calor latente de evaporación a -15 °C	kJ/kg	206,8
Calor específico del líquido saturado a 30 °C	kJ/kgK	1,440
Calor específico del vapor saturado a 30 °C	kJ/kgK	1,104
Relación de calor específico 1.013 bar a 30 °C (cp/cv)		1,115
inflamabilidad		No inflamable

Tabla A-2. Características termodinámicas del refrigerante 134a.

Todos los gases refrigerantes tienen tabuladas sus propiedades en función de la temperatura, presión y volumen. Además se han diseñado herramientas de ayuda para facilitar el entendimiento y cálculo del comportamiento de ellos durante los cambios de estado o en cualquier condición que se encuentren. Para ello es necesario conocer la presión o la temperatura si el gas está en cambio de fase, o conocer presión y temperatura si es un gas sobrecalentado.

El gráfico de Mollier (Figura 1), es una ayuda de gran valor tanto para calcular como para visualizar un proceso y/o analizar un problema en cualquier equipo que se esté diagnosticando. Aquí es importante destacar que de la comparación entre gráficos de distintos gases, permite apreciar las diferencias de presiones y temperaturas de operación que se lograrán en un mismo sistema si se efectúa una sustitución de refrigerante y las consecuencias en cuanto a seguridad, pérdida o ganancia de eficiencia y logro de la temperatura de trabajo deseada.

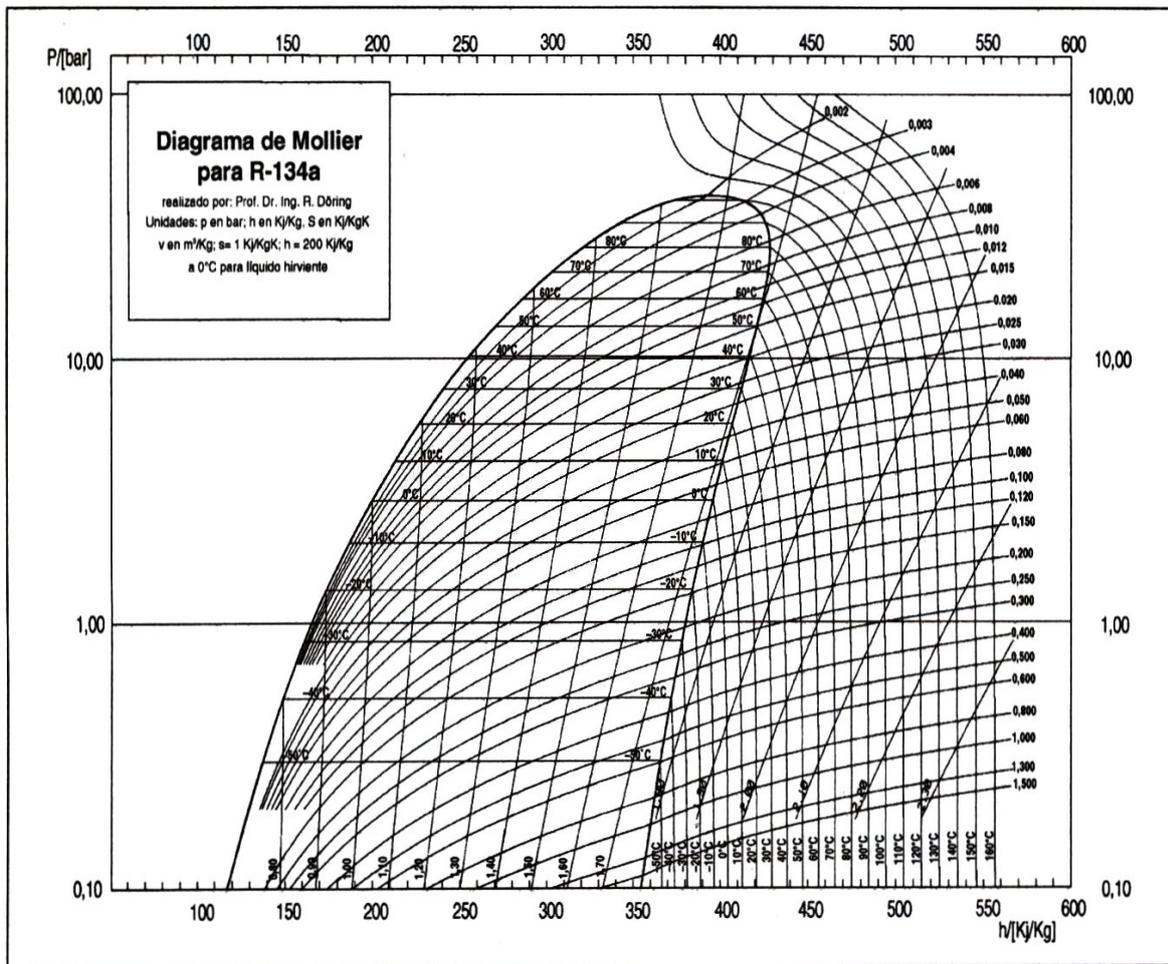


Figura 1. Diagrama de Mollier del refrigerante 134a.

1.1.7 CICLO TEORICO DE REFRIGERACION

Un ciclo de refrigeración saturado simple, es un ciclo teórico en el que se supone que el vapor refrigerante que sale del evaporador y entra al compresor, es vapor saturado a la temperatura y presión vaporizante y el líquido refrigerante que sale del condensador y llega al control del refrigerante es un líquido saturado a la temperatura y presión del condensante (Dossat, 1980).

A continuación se presenta el trazo de un ciclo saturado simple en un diagrama presión-entalpía (Figura 2).

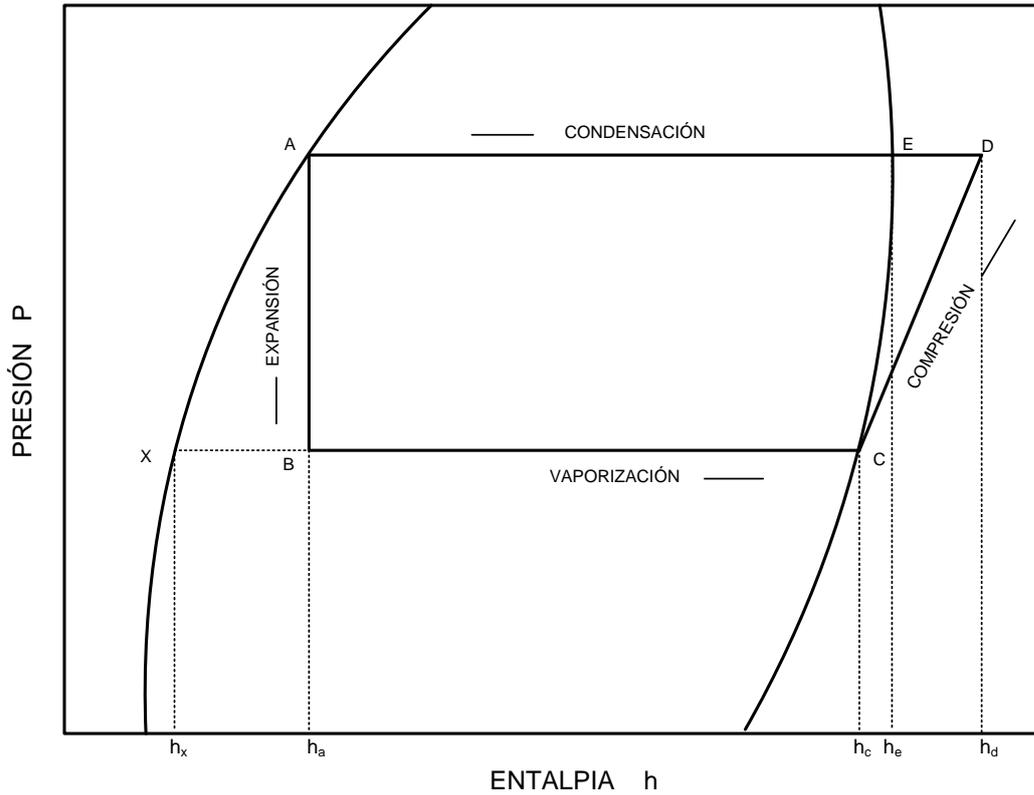


Figura 2. Diagrama teórico presión-entalpía.

Del diagrama pueden observarse que se presentan cuatro procesos:

- 1) Expansión
- 2) Evaporación
- 3) Compresión
- 4) Condensación

PROCESO DE EXPANSION

El proceso A – B es una expansión adiabática irreversible durante el cual el refrigerante pasa a través de una serie de puntos en ese estado, de tal forma no se tiene una distribución uniforme en cualquiera de sus propiedades. Entonces no puede dibujarse una trayectoria del proceso que principia en el estado A y termina en el punto B.

PROCESO DE VAPORIZACIÓN

El proceso B – C corresponde a la vaporización del refrigerante en el evaporador, debido a que la vaporización se efectúa a temperatura y presión constantes, el proceso B – C es tanto isotérmico como isobárico. En el punto C el refrigerante está en su totalidad vaporizado y es un vapor saturado a la temperatura y presión vaporizante. La cantidad de calor absorbida por el refrigerante en el evaporador (efecto refrigerante) es la diferencia de valor entre la entalpía del refrigerante de los puntos B y C como se muestra en la ecuación (1), por lo tanto h_a , h_b , h_c , h_d , h_e y h_x representan las entalpías del refrigerante en los puntos A, B, C, D, E y X, respectivamente; entonces

$$q_e = h_c - h_a \quad (1)$$

donde: $q_e = \text{efecto refrigerante}$.

La distancia X – C en el diagrama representa el calor latente total de vaporización, que está compuesto por el efecto refrigerante B – C y por la pérdida de efecto refrigerante X – B.

PROCESO DE COMPRESION

En el ciclo saturado simple, se supone que el refrigerante no cambia de condición mientras está fluyendo por la tubería de succión desde el evaporador hasta el compresor. El proceso C – D se efectúa en el compresor a medida que se incrementa la presión del vapor debido a la compresión desde la presión vaporizante hasta la condensante. Se supone que en el ciclo saturado simple, el proceso de compresión C – D es isoentrópico. Una compresión isoentrópica es un tipo especial de proceso adiabático que ocurre sin fricción, debido a que no presenta cambio de entropía en la compresión. El punto D puede localizarse en el diagrama P-h siguiendo la línea de entropía constante desde el punto C hasta la intersección con la línea de presión de condensación.

Durante el proceso de compresión C – D se efectúa un trabajo sobre el vapor refrigerante y se incrementa la energía (entalpía) del vapor en una cantidad que es exactamente igual al trabajo mecánico efectuado sobre el vapor, que a menudo se llama calor de compresión (ecuación 2).

$$q_w = h_d - h_c \quad (2)$$

donde: $q_w =$ trabajo (calor) de compresión por libra de refrigerante circulando

El trabajo mecánico efectuado sobre el vapor por el pistón durante la compresión puede calcularse a partir del calor de compresión, ecuación (3)

$$W = (q_w)(J) = J(h_d - h_c) \quad (3)$$

donde: $J =$ equivalente mecánico de calor

PROCESO DE CONDENSACION

Por lo general, tanto los procesos D – E como E – A se verifican en el condensador a medida que el gas caliente descargado del compresor es enfriado hasta la temperatura condensante y después condensado.

El proceso D – E toma lugar en la parte superior del condensador y en una parte de la longitud de la tubería del gas caliente. Esto representa el enfriamiento del vapor desde la temperatura de descarga hasta la temperatura condensante a medida que el vapor le deja su calor al medio condensante. El punto E se puede obtener del diagrama P-h siguiendo la línea de presión constante que pasa por el punto D hasta donde se intersecta con la curva de vapor saturado.

El proceso E – A es la condensación del vapor en el condensador realizado a presión constante.

El calor total cedido por el refrigerante en el condensador es la diferencia entre las entalpías del vapor sobrecalentado en el punto D y el líquido en el punto A, como se muestra en la ecuación (4)

$$q_c = h_d - h_a \quad (4)$$

donde: $q_c = \text{calor e eliminado en el condensador}$

En un ciclo saturado simple, la energía del refrigerante se incrementa en sólo dos puntos en el ciclo:

1) El calor absorbido por el espacio refrigerado a medida que se vaporiza el refrigerante en el evaporador (q_e).

2) La energía equivalente debido al trabajo mecánico en el compresor (q_w), ecuación (5).

$$q_c = q_e + q_w \quad (5)$$

La capacidad de refrigeración requerida ($Q_c = q_c \cdot \dot{m}$), es la velocidad a la cual se puede efectuar la eliminación de calor del espacio refrigerado, la cual está dada en BTU por hora o en términos de su equivalencia fusión-hielo, esto es, si un sistema de refrigeración que tenga capacidad de 1 tonelada, tiene una capacidad equivalente a la fusión de una tonelada de hielo en un periodo de 24 horas. Debido a que 1 tonelada de hielo absorbería 288,000 BTU ($200/\text{lb} \times 144 \text{ BTU/h}$) para derretirse, esto representa la capacidad de enfriamiento de 12,000 Btu/h o 200 Btu/min. En el sistema métrico, 1 tonelada de capacidad de enfriamiento son 3.517 kJ/s ó kW.

Obsérvese que la capacidad de refrigeración es una razón de transferencia de energía y como tal es una expresión de potencia.

La capacidad de un sistema de refrigeración mecánica, o sea la razón a la cual el sistema elimina calor del espacio refrigerado depende tanto de la masa del refrigerante que fluye por unidad de tiempo así como del efecto refrigerante por unidad de masa que circula, con la ecuación (6) se obtiene la capacidad de refrigeración.

$$Q_e = (\dot{m})(q_e) \quad (6)$$

donde: $Q_e =$ capacidad de refrigeración

$\dot{m} =$ flujo masico del refrigerante en circulación

$q_e =$ efecto refrigerante

El flujo másico (\dot{m}) de refrigerante que debe circular por minuto por tonelada de capacidad de refrigeración para ciertas condiciones dadas de operación se obtiene dividiendo el efecto refrigerante por libra a las condiciones dadas entre 200 Btu/min por ton.

Para obtener en el sistema la cantidad total de calor eliminado en el condensador (Q_c) por minuto y por tonelada se utiliza la siguiente ecuación (7)

$$Q_c = (\dot{m})(q_c) \quad (7)$$

donde: $Q_c =$ calor total e eliminado del condensador

$\dot{m} =$ flujo masico de refrigerante en circulación

$q_c =$ calor e eliminado en el condensador

Para determinar la energía equivalente al trabajo del compresor por minuto y por tonelada de capacidad de refrigeración (Q_w) se utiliza la siguiente ecuación (8)

$$Q_w = (\dot{m})(q_w) \quad (8)$$

donde: $Q_w =$ energía equivalente al trabajo del compresor

$\dot{m} =$ flujo masico de refrigerante en circulación

$q_w =$ trabajo (calor) de compresión por libra de refrigerante circulando

Entonces, el trabajo de compresión por minuto por tonelada en pies libra está dada por la ecuación (9)

$$W = (J)(Q_w) \quad (9)$$

donde: $W = \text{trabajo de compresión}$

$J = \text{equivalente mecánico de calor}$

$Q_w = \text{energía equivalente al trabajo del compresor}$

1.1.8 CICLO REAL DE REFRIGERACION

En un sistema de refrigeración mecánica existen dos presiones en el sistema de compresión: la de vaporización o baja presión y la de condensación o alta presión. La refrigeración actúa como un medio de transporte para remover el calor del evaporador. Un cambio de estado de líquido a vapor y viceversa permite al refrigerante absorber y descargar grandes cantidades de calor en forma eficiente. El ciclo de refrigeración opera de la siguiente forma: el refrigerante a alta presión que sale de la línea de descarga del compresor, pasa hacia el condensador. Conforme pasa a través del condensador, el refrigerante a alta presión es enfriado por algún medio externo (por ejemplo un ventilador) y conforme la temperatura del vapor del refrigerante alcanza la temperatura de saturación correspondiente a la alta presión en el condensador, el vapor se condensa y de ahí al dispositivo que separa el lado de alta presión del sistema de baja presión.

La reducción de presión en el refrigerante líquido provoca que éste hierva o se vaporice hasta que el refrigerante alcance la temperatura de saturación correspondiente a la de su presión. Conforme el refrigerante de baja temperatura pasa a través del evaporador, el calor fluye a través de las tuberías del evaporador hacia el refrigerante, haciendo que la acción de ebullición continúe hasta que el refrigerante se encuentre totalmente vaporizado.

La válvula de expansión o tubo capilar regulan el flujo del refrigerante a través del evaporador según se requiera para mantener una diferencia de temperatura determinada a cierto sobrecalentamiento deseado entre la temperatura de evaporación y el refrigerante que sale del evaporador.

El vapor refrigerante que sale del evaporador viaja a través de la línea de succión y de ahí a la entrada del compresor. El compresor toma el vapor a baja presión y lo comprime aumentando tanto su presión como su temperatura y repitiéndose nuevamente el ciclo.

1.2 EQUIPOS DIDACTICOS COMERCIALES

La gran mayoría de los equipos didácticos con los que cuentan los laboratorios en escuelas tanto a nivel técnico como licenciatura en México, son de manufactura extranjera y esto implica varias desventajas: Costo inicial elevado, el mantenimiento debe realizarlo personal especializado, capacitación previa para su manejo.

Por otro lado, estos equipos son poco funcionales ya que solo se pueden trabajar un número limitado de prácticas diseñadas por el fabricante y no ofrecen a los alumnos los medios necesarios que le permitan conocer e interpretar el funcionamiento de cada uno de los componentes básicos del ciclo de refrigeración, así como desarrollar habilidades para analizar posibles fallas y tomar las medidas preventivas y/o correctivas que se requieran.

A continuación se muestran algunos equipos utilizados en distintos laboratorios para el aprendizaje de la refrigeración.

1.2.1 BOMBA MECANICA DE CALOR

La bomba de calor es una máquina térmica capaz de transferir calor de un ambiente a otro según se requiera. Para lograr esta acción es necesario un aporte de trabajo, esto debido a que la segunda ley de la termodinámica menciona que el calor fluye de un cuerpo o espacio caliente a uno frío hasta que se igualan sus temperaturas y no al revés.

Este fenómeno de transferencia de energía se realiza por medio de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, cuya particularidad radica en una válvula

inversora de ciclo que forma parte del sistema, esta válvula invierte el sentido del flujo de refrigeración, transformando el condensador en evaporador y viceversa.

El principio de la bomba de calor se utiliza en sistemas de climatización así como en sistemas domésticos de aire acondicionado, dado el ciclo reversible que este sistema otorga, la bomba de calor brinda la posibilidad tanto de extraer como de ingresar energía calorífica al medio (enfriar o calentar).

La bomba de calor emplea un fluido refrigerante, el cual se encuentra en un principio en estado líquido a baja temperatura y baja presión, el aire pasa a través del evaporador donde el fluido refrigerante absorbe la temperatura ambiente y cambia de estado de líquido a vapor, el refrigerante pasa a través del compresor donde aumenta tanto la presión como la temperatura, en este punto el refrigerante se encuentra en un elevado estado de energía y circula por el condensador en donde cede toda la energía (calor) al medio donde se desea elevar la temperatura, el refrigerante en este punto cambia su estado de vapor a líquido y el refrigerante pasa a la válvula de expansión en donde se reduce la presión y aumenta la velocidad para ingresar al evaporador y repetir el ciclo.

Para el estudio de este ciclo termodinámico se han fabricado diversos equipos didácticos como el que se muestra en la figura 3. Este equipo es de procedencia inglesa construido por *P.A Hilton Ltd*. Ha sido diseñado para el estudio del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, además de mostrar el diagrama p-h, estima los efectos de presión del compresor y la eficiencia volumétrica.

Los componentes de la bomba de calor y su instrumentación están montados sobre un panel de plástico reforzado. El equipo está compuesto de un compresor hermético, un aislante de agua en espiral, tubo concéntrico, condensador refrigerado, un recipiente de líquido, una válvula de expansión termostática y el evaporador de aire caliente.

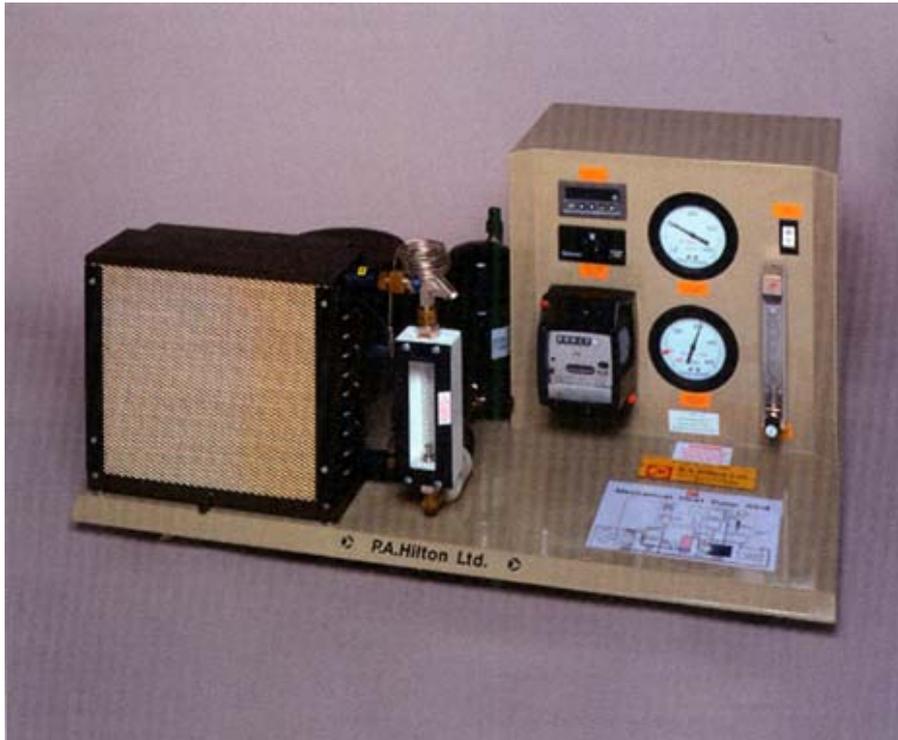


Figura 3. Equipo didáctico bomba de calor marca P.A Hilton.

Los componentes están claramente dispuestos en forma compacta pero de una manera similar a la utilizada por muchas bombas de calor domésticas aire-agua y todos son visibles desde la parte frontal de la unidad.

El ciclo de refrigeración funciona de la siguiente manera: El refrigerante en su estado de vapor pasa por el compresor aumentando la presión y la temperatura del refrigerante 134a, el cual entra al condensador en forma de vapor y es enfriado por agua, en este proceso el calor es absorbido por el agua y el refrigerante cambia de estado (vapor a líquido), el refrigerante posteriormente pasa a la válvula termostática donde reduce la presión para posteriormente pasar al evaporador, en el cual absorbe calor para cambiar de estado (líquido a vapor) y pasar nuevamente al compresor.

La temperatura a la cual el agua puede ser entregada en el condensador es de 50°C aproximadamente. El equipo cuenta con varios termómetros digitales colocados en diferentes puntos, además de poder medir la energía consumida por el compresor para poder realizar diferentes cálculos del sistema.

1.2.2 UNIDAD DE REFRIGERACIÓN DE LABORATORIO

Equipo de procedencia inglesa fabricado por *P.A Hilton Ltd*. Este equipo es un refrigerador por compresión de vapor de sobre mesa. La instrumentación del equipo permite evaluar parámetros como temperatura y presión, para poder calcular la eficiencia del sistema (Figura 4). El equipo cuenta con un *software* que permite el registro de parámetros necesarios para la obtención del diagrama presión-entalpía.



Figura 4. Unidad de refrigeración de laboratorio.

El equipo cuenta con un compresor recíprocante el cual es accionado con ayuda de un motor eléctrico mediante una banda, además cuenta con un dinamómetro que permite evaluar el par del motor del compresor. El gas refrigerante utilizado por el equipo es el 134a que a su paso por el compresor aumenta tanto su presión como su temperatura, el refrigerante pasa al condensador enfriado por agua, posteriormente pasa a través de una bobina en el interior del condensador, esto permite que el refrigerante se condense y pase al control de flujo (válvula de expansión termostática), este elemento controla la cantidad de refrigerante y reduce la presión que pasa al evaporador. En el evaporador el refrigerante absorbe el calor del espacio refrigerado y se evapora dando como resultado la disminución de la temperatura. Además cuenta con dos elementos de calefacción eléctrica ubicados sobre la tubería después de la válvula termostática de

expansión, con la finalidad de iniciar el proceso de evaporación del refrigerante antes de entrar al evaporador.

El equipo cuenta con un watt-metro digital para medir la potencia del motor, varios termómetros digitales para la lectura de temperaturas en diferentes puntos así como un tacómetro para medir la velocidad del compresor y medidores de presión en el condensador y evaporador.

De forma opcional el equipo cuenta con un programa computacional para que los parámetros físicos más relevantes puedan ser observados y registrados en una computadora para su posterior análisis

1.2.3 UNIDAD DE DEMOSTRACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Equipo de procedencia inglesa fabricado por *P.A Hilton Ltd*. El equipo opera con un compresor hermético, el cual trabaja con refrigerante R141b. El refrigerante a su paso por el compresor aumenta tanto la presión como su temperatura en donde es tomado posteriormente por el condensador, el cual consiste en una cámara cerrada de vidrio con pared gruesa en donde se encuentra inmersa una bobina de cobre (Figura 5).

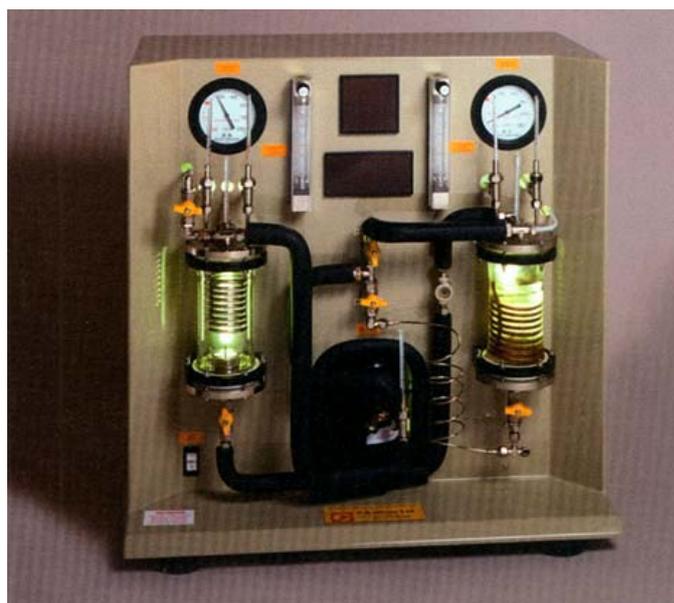


Figura 5. Unidad de demostración del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

El refrigerante se condensa en la superficie de la bobina y cae al fondo de la cámara. El calor emitido por el cambio de fase del refrigerante es transferido al agua que atraviesa el serpentín de refrigeración.

Posteriormente la válvula de expansión controla el flujo del refrigerante hacia el evaporador que al igual que el condensador es una cámara cerrada de vidrio donde se encuentra inmersa otra bobina de cobre, en el evaporador el refrigerante cambia de fase (líquido a vapor) y pasa al compresor.

La instrumentación contenida en el equipo permite la medición de la presión del condensador y evaporador además de las diferentes temperaturas en el sistema. El equipo cuenta de manera opcional con un indicador digital de temperatura, el cual permite la medición de las temperaturas de descarga del compresor y temperatura del líquido condensado con una resolución de 0.1 °C, estos parámetros permiten un diagrama del ciclo de refrigeración completo. Además cuenta de manera opcional un Wattmetro que permite medir la potencia consumida por el compresor con un rango de 0 a 1999 W y una resolución de 1 W.

1.2.4 CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN SENCILLO

Este equipo fue desarrollado por *Gunt HAMBURG*, empresa europea dedicada a comercializar equipos didácticos en diferentes áreas de la ingeniería. En este equipo el evaporador y el condensador están concebidos como serpentín, los cuales se encuentran sumergidos en un depósito lleno de agua. El agua simula el ambiente, la válvula de expansión termostática sirve de elemento de expansión.

El equipo cuenta con dos manómetros de Bourdon que indican la presión del sistema en el lado de alta y baja presión, cuenta con dos termómetros que miden la temperatura del agua en los depósitos donde se encuentran el evaporador y condensador (Figura 6). De esta manera se puede calcular la cantidad de calor extraída (evaporador, agua fría) y emitida (condensador, agua caliente).

El equipo cuenta con una mirilla que muestra el estado del refrigerante después de la válvula de expansión termostática, el equipo trabaja con un compresor hermético a 230/120 volts y utiliza refrigerante ecológico 134a, y el peso del equipo es de aproximadamente 30 kg.



Figura 6. Circuito de refrigeración por compresión sencillo (*Gunt HAMBURG*).

1.2.5 CAMBIOS DE ESTADO EN EL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN

Equipo desarrollado por *Gunt HAMBURG*, el cual representa un típico circuito de refrigeración, compuesto por un compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador (Figura 7).

En el equipo el refrigerante fluye a través del circuito de refrigeración y experimenta diversos cambios de estado. Aquí se aprovecha el efecto físico de la transición de la fase líquida a la fase gaseosa del refrigerante, se requiere energía que es extraída del medio ambiente (entalpía de evaporación).

El evaporador y condensador son transparentes, así que el proceso de transición de fase durante la evaporación y condensación se pueden observar. Antes de la

entrada al evaporador se puede observar el estado del refrigerante en una mirilla. Un circuito de agua fría en el condensador y/o proporciona la carga de refrigeración para el evaporador.

Los caudales de agua de refrigeración, calentamiento y del refrigerante son ajustables. El bajo nivel de presión del refrigerante Solkatherm SES36 utilizado posibilita el uso de evaporador y condensador de vidrio. El refrigerante no contiene clorofluorocarbonos (CFC).

Las temperaturas y lecturas de presión son registradas e indicadas para introducir un diagrama presión-entalpía. Además se indica la potencia del compresor así como de los caudales de los flujos de agua y del refrigerante.



Figura 7. Cambios de estado en el circuito de refrigeración (*Gunt HAMBURG*).

1.2.6 INSTALACIÓN FRIGORÍFICA DE COMPRESIÓN

Equipo desarrollado por *Gunt HAMBURG*, el equipo está compuesto por compresor tipo hermético, condensador, evaporador y elemento de expansión (Figura 8). El evaporador y condensador están concebidos como intercambiadores de calor de tubos y aletas. El equipo cuenta con tres tubos

capilares de diferente longitud y una válvula de expansión termostática para comparar entre si los elementos de expansión. Además está equipado con un colector para extraer y agregar refrigerante al circuito, de esta manera es posible estudiar los efectos de sobre llenado y sub llenado en el equipo.

El caudal, la presión y la temperatura así como la potencia eléctrica absorbida por el compresor son todas registradas continuamente por medio de sensores y los valores de medición registrados son leídos en indicadores digitales y se pueden transferir a una computadora vía USB, para posteriormente ser evaluados con ayuda del *software* suministrado.

Las modificaciones de parámetros en el circuito de refrigeración se pueden observar en el diagrama presión-entalpía del *software* de manera dinámica. El equipo se encuentra soportado sobre una estructura metálica y su peso total es de 150 kg.



Figura 8. Instalación frigorífica de compresión (*Gunt HAMBURG*).

1.3 OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo principal es el desarrollo de un equipo didáctico de refrigeración por compresión de vapor que permita visualizar de forma más clara los cambios físicos que sufre el refrigerante a su paso por cada uno de los componentes básicos que componen al sistema.

Objetivos específicos.

El desarrollo de este equipo pretende que el alumno observe fenómenos físicos, implicados con la transferencia de calor y la termodinámica.

Analizar el comportamiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapor con tubo capilar y válvula termostática.

Analizar el comportamiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapor en función de la carga térmica.

Obtención del diagrama presión-entalpía del sistema bajo diferentes condiciones termodinámicas.

1.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

Para llevar a cabo la selección de los distintos componentes es necesario conocer la aplicación y la temperatura de trabajo en el espacio a refrigerar.

El equipo de refrigeración por compresión de vapor se diseñó con fines didácticos y la temperatura a la que se desea trabajar es de -20°C a 7°C aproximadamente, siendo estas temperaturas las que manejan los sistemas de refrigeración domésticos y comerciales. Con este intervalo de temperatura se podrá variar la carga térmica dentro del espacio a refrigerar, para lo cual se dispone de 3 resistencias calefactoras de 1500 Watts cada una, las cuales podrán funcionar de manera independiente o al mismo tiempo.

La selección de la unidad condensadora (compresor y condensador) se realizó sobre la base de tablas de rendimiento generadas por el fabricante. Para dicho fin se seleccionó un compresor hermético marca Danfoss con una capacidad de 746 Watts (1HP), 115 V-60 Hz, el cual proporciona una temperatura de evaporación de -30°C , además de trabajar con refrigerante ecológico 134_a.

El condensador es de aire forzado, proveniente de un motor ventilador de 18.4 Watts (1/40 hp), trabaja a 1200 rpm para forzar el paso del aire a través de la tubería, además de alcanzar una temperatura de condensación de 55°C y una presión de 6.11 kg/cm^2 a 13.007 kg/cm^2 (87 a 185 psi).

Para cumplir el objetivo planteado el equipo cuenta con dos controles de flujo empleados en refrigeración (válvula termostática y tubo capilar), los cuales se seleccionaron según las características de la unidad de condensación; esto permite mantener lleno de refrigerante en el evaporador a distintas cargas térmicas de operación sin peligro de que el refrigerante llegue en forma líquida al compresor.

Para la selección del evaporador se deben considerar los datos de la temperatura de evaporación, potencia requerida y requerimientos de flujo volumétrico del refrigerante a través de este elemento; el fabricante presenta características del evaporador en función de las características de los elementos mencionados anteriormente.

Es importante mencionar que los elementos básicos de un sistema de refrigeración deben de ser compatibles con sus capacidades de operación para que el sistema funcione adecuadamente.

2. METODOLOGIA.

En este capítulo se presenta la descripción y características de los componentes principales de la unidad didáctica de refrigeración por compresión de vapor, tales como el compresor, el condensador, el control de flujo, evaporador (Figura 9), así como los sensores de temperatura y presión los cuales nos permiten obtener datos para llevar a cabo la caracterización del equipo.

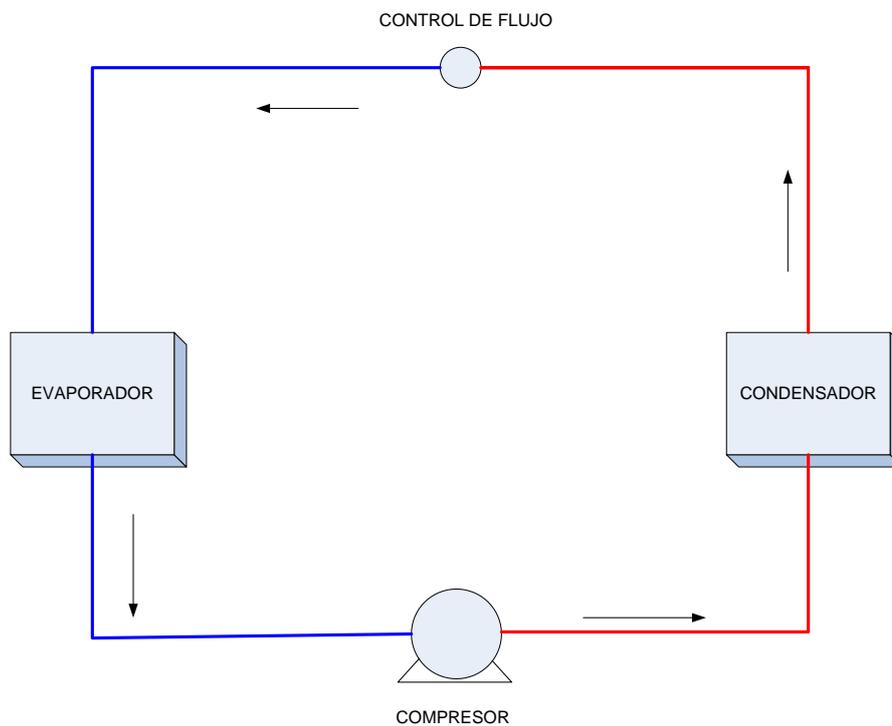


Figura 9. Ciclo básico de refrigeración.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE REFRIGERACIÓN

Actualmente la refrigeración por compresión mecánica de vapor se ha convertido en el sistema más empleado en aplicaciones que requieren diferentes capacidades de enfriamiento.

El ciclo de refrigeración también conocido como ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico, el cual consta de cuatro procesos fundamentales: compresión, condensación, expansión y vaporización, como se muestra en la figura 9.

En el compresor se instalaron dos manómetros análogos para medir las presiones de entrada y salida (Figura 10) además de dos sensores de presión tipo cerámico con un intervalo de operación de 0-16 bares, lo cual permite la comparación en las lecturas para poder determinar la relación de compresión. El compresor trabaja con gas refrigerante 134a, (denominación ASHRAE) y tiene una potencia de 746 W (1 hp) a 127 V.



Figura 10. Compresor tipo hermético.

Para observar las temperaturas de evaporación y condensación se instalaron 4 termopares tipo J a la entrada y salida de cada uno de los elementos donde ocurre este fenómeno (Figura 11). Además el equipo cuenta con un sensor de flujo tipo paleta a la salida del control de flujo, lo cual permite tener conocimiento de la cantidad de refrigerante que circula por el sistema para realizar un análisis más completo del ciclo termodinámico.

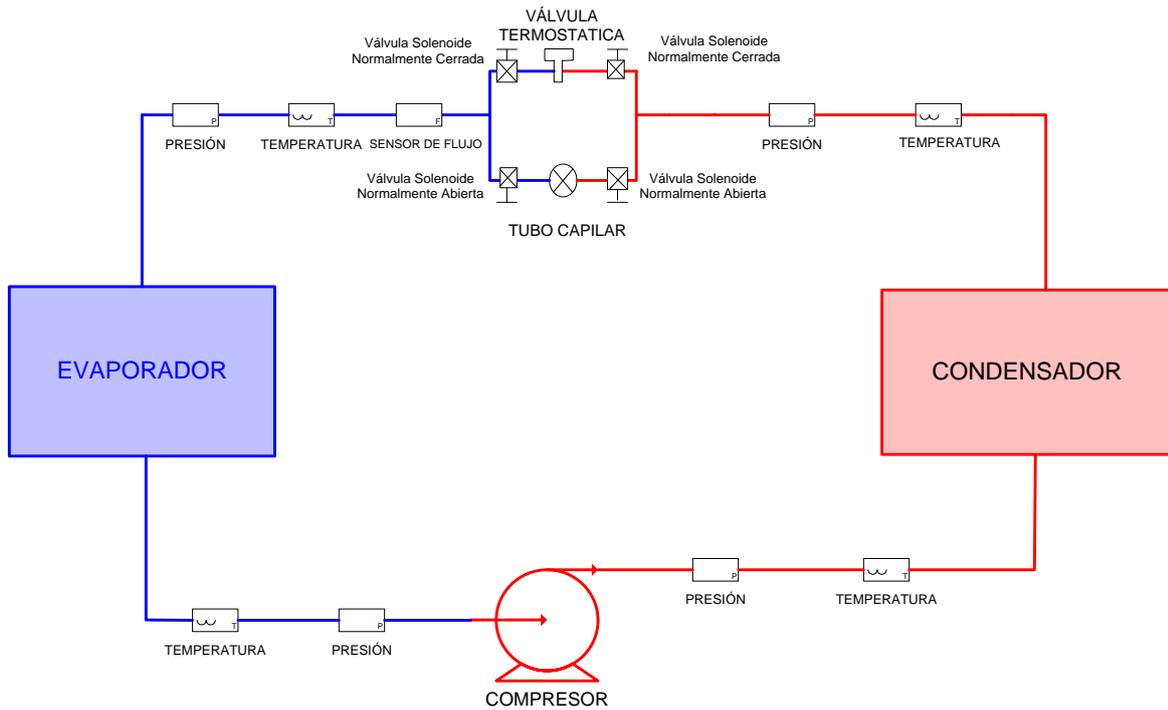


Figura 11. Ubicación de sensores en el equipo.

El equipo cuenta con dos diferentes controles de flujo (tubo capilar y válvula termostática), donde se puede modificar el comportamiento que tiene el gas refrigerante a su paso por cualquiera de estos dos elementos. Para poder efectuar el manejo de cada control de flujo se instalaron dos válvulas solenoides, una de ellas normalmente abierta (NA) y otra normalmente cerrada (NC) para desviar el paso del gas refrigerante por cualquiera de los elementos de control del flujo.

El evaporador (Figura 12), se compone de un circuito a través del cual circula refrigerante a baja presión, enfriando el medio a refrigerar mediante convección natural. Este elemento está construido de aluminio ya que este material es buen conductor del calor y tiene alta resistencia a la corrosión, además de contar con un ventilador para circular aire a través de este elemento con la finalidad de tener la temperatura homogénea en el espacio a refrigerar.



Figura 12. Evaporador.

El evaporador se encuentra dentro de una estructura fabricada de tubular cuadrado de 25.4 mm (1 pulgada) (Figura 13), la cual está aislada con espuma de poliuretano para reducir la transferencia de calor entre el medio ambiente y el espacio a refrigerar.



Figura 13. Estructura del espacio a refrigerar.

El espacio a refrigerar es el área donde se lleva a cabo el enfriamiento, lo cual permite tener una temperatura por debajo de la temperatura ambiente (Figura 14).



Figura 14. Espacio a refrigerar.

El condensador al igual que el evaporador es un intercambiador de calor, el cual está compuesto por un serpentín de cobre y aletas de aluminio, esto permite una mejor transferencia de calor del refrigerante durante la condensación al medio ambiente (Figura 15), además de tener instalado un motor-ventilador de 18.4 W (1/40 hp) y 1200 rpm para forzar el paso del aire a través de la tubería.



Figura 15. Condensador.

En el espacio a refrigerar, están colocadas tres resistencias calefactores de 300 Watts cada una (Figura 16), con el propósito de variar la carga de calor en el equipo.



Figura 16. Resistencias calefactoras.

Se pueden monitorear las variables más importantes como son la temperatura y presión dentro del sistema y estas son presentadas en una pantalla de computadora (Figura 17), además se puede activar o desactivar las resistencias colocadas en el evaporador, las válvulas solenoides y motores difusores tanto en el condensador como en el evaporador, lo cual permite tener una condensación

por aire forzado o convección natural, de esta manera el usuario podrá graficar los resultados presentados en el equipo para diferentes condiciones de operación.

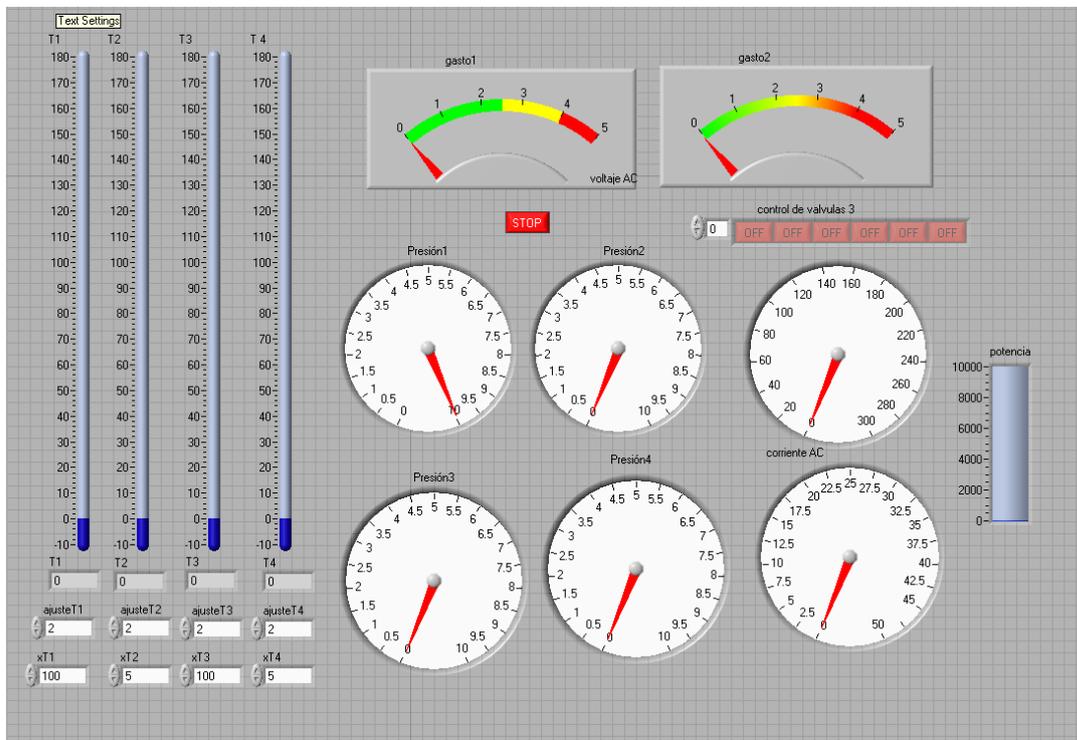


Figura 17. Pantalla de computadora para obtención de datos.

Para monitorear y variar las condiciones del sistema termodinámico, el equipo cuenta con una tarjeta de adquisición de datos marca *National Instruments* tipo PCI-6220 con 16 entradas analógicas de 16 bits, controladores de 32 bits y una velocidad de muestreo de 250 k muestras/s, que permite la interfaz entre el equipo y la computadora, las pantallas que presenta la PC están diseñadas mediante LabView.

Para seleccionar la instrumentación del sistema es indispensable tener una idea general de los intervalos en los que se encuentran las variables a medir (presión, temperatura y flujo), de tal forma que se puedan seleccionar los sensores adecuados.

Todos los componentes del sistema así como la instrumentación de la unidad de refrigeración están colocados sobre un banco de trabajo, con la finalidad de tener un mejor manejo del equipo (Figura 18).

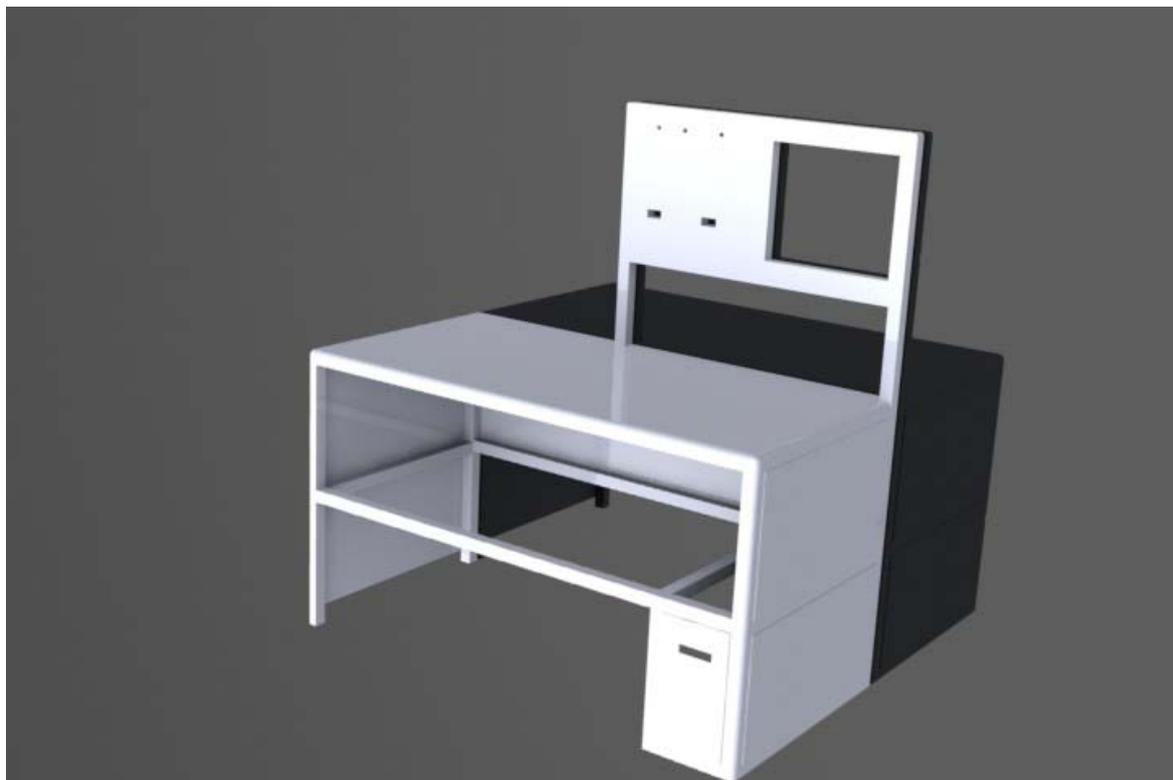


Figura 18. Banco de trabajo.

2.2 CARACTERIZACIÓN

Para poder tener un equipo de calidad es necesario tener la certeza de que los datos que nos arrojan los sensores involucrados son correctos, para esto se hace necesario tener patrones de comparación válidos, de tal forma que se pueda calibrar cada una de las lecturas obtenidas provenientes de los sensores utilizados. Como los datos serán capturados por medio de una PC, en la pantalla se deben de indicar valores reales, ya que de esto depende en gran medida que los cálculos teóricos concuerden con los experimentales.

2.2.1 CARACTERIZACIÓN SENSOR DE FLUJO.

El sensor utilizado para medir caudal del refrigerante dentro del circuito es el sensor mostrado en la (Figura 19).



Figura 19. Sensor de caudal tipo rotativo.

El sensor empleado es de marca Kobold de tipo rotativo modelo DRH-F, este sensor tiene un intervalo de medida de 0.792–3.17 l/s (litros sobre segundo)

(0.05-0.2 gal/min) con una conexión de 6.35 mm (1/4") NPT, está fabricado en materiales de latón y acero inoxidable, presión máxima de trabajo es de 580 psig, la temperatura máxima que soporta en el fluido es de 100 °C (212 °F) y tiene una precisión de ± 2.5 %, el sensor entrega una salida de pulsos, los cuales son traducidos a una señal analógica que varía entre 4 y 20 mA, la cual está en función de la cantidad de caudal que pasa por el sensor.

El sensor de flujo utiliza imanes situados en la rueda de paletas rotatoria, para detectar el flujo que se tiene a través del instrumento. Este sensor se encuentra herméticamente sellado y trabaja bajo el efecto Hall, el cual detecta el paso de los imanes y proporciona una salida que es proporcional a la velocidad de flujo. El sensor convierte esta salida a una señal de frecuencia o corriente según sea el tipo, en nuestro caso como ya se mencionó se tiene una salida de corriente proporcional al flujo. La electrónica conectada a la unidad convierte la señal analógica a una señal de corriente con un intervalo de 4 a 20 mA de salida.

Para la caracterización de este sensor se implementó un circuito compuesto por una bomba sumergible, un variador de voltaje, válvula de paso, sensor de caudal, un depósito de almacenamiento y el fluido utilizado para la calibración fue agua.

En el circuito implementado se forzó al fluido a circular a través del sensor con ayuda de la bomba sumergible, a la cual se le varió el voltaje, lo cual permitió variar la velocidad del fluido y con la válvula de paso se varió la cantidad de agua que circula a través del sensor.

Posteriormente se ajustó una velocidad y un determinado flujo de agua a través del sensor durante un minuto, y la cantidad de agua se midió en una probeta graduada y con un amperímetro se registró la lectura de corriente que entrega el sensor a la salida.

2.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN.

El sensor de presión utilizado en la unidad de refrigeración es un sensor modelo 8314 del fabricante Burkert como el mostrado en la Figura 20.



Figura 20. Sensor de presión.

Este sensor cuenta con una célula de medición de cerámica y es una versión de dos hilos, su construcción es compacta, la salida de señal es muy estable, su conexión mecánica es de G ¼ exterior, se puede operar en un intervalo de 0 a 16 bares, la alimentación eléctrica puede estar en intervalo de 8 hasta 33 V y la salida entrega una señal de 4 a 20 mA.

Para la caracterización de estos sensores de presión se implementó un arreglo de aire a presión como el que se muestra en la Figura 21, El compresor utilizado tiene una capacidad de 3 hp y una capacidad en el tanque de 2.5 litros, a la salida del compresor de aire se instaló la unidad de mantenimiento compuesta por una válvula de paso y un manómetro analógico con un rango de 0-14 kg/cm² (0-200 psi). Este dispositivo permite regular el flujo del aire hacia el sensor para tener diferentes presiones, las cuales tendrán que coincidir con el sensor que se está

caracterizando. La señal a la salida del sensor de presión se conecto a una tarjeta National Instruments SCB-68 la cual se comunica directamente con la PC.

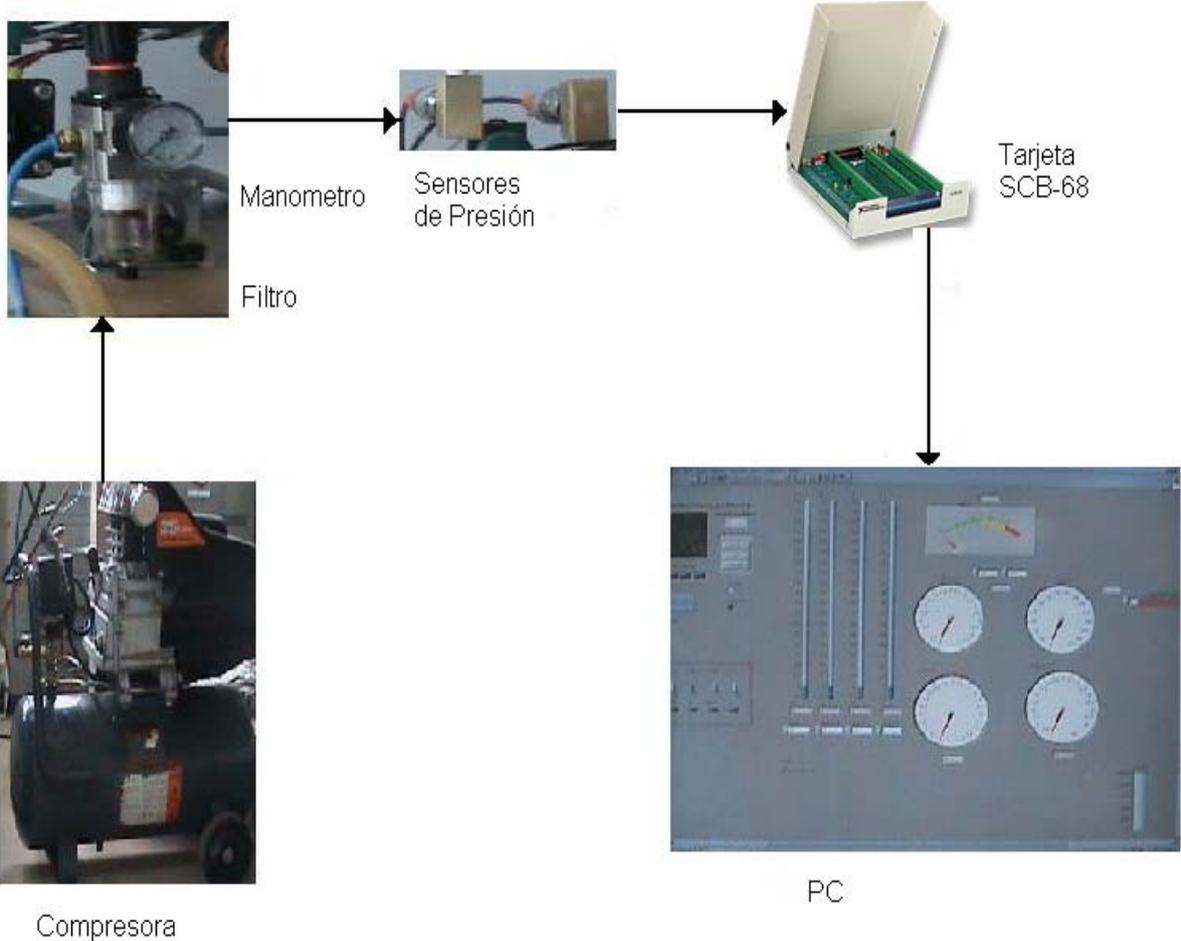


Figura 21. Arreglo experimental para la caracterización del sensor de presión.

En este caso se ajustaron directamente los indicadores de presión de la interfaz de usuario de tal forma que coincidieran con las lecturas del manometro analogo, para esto se modificaron los ajustes de "offset" que el programa contempla en su estructura.

2.2.3 CARACTERIZACIÓN SENSOR DE TEMPERATURA

El equipo cuenta con cuatro sensores de LM35 de TEXAS INSTRUMENTS como el que se muestra en la Figura 22, este sensor es utilizado para el diseño electrónico de termómetros.

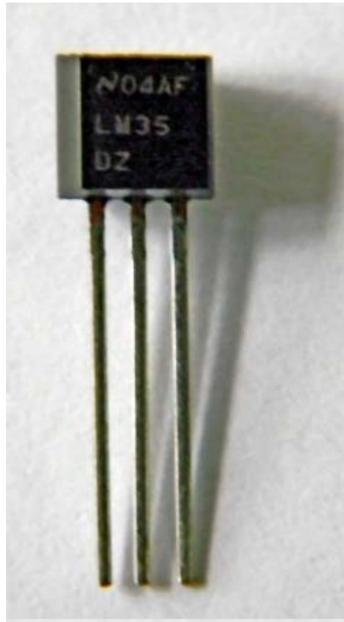


Figura 22. Sensor de temperatura LM35

El sensor LM35 cuenta con una precisión de 1 °C, además puede medir temperaturas en un intervalo comprendido entre -55 °C a 150 °C, la salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10 mV en la salida. El sensor tiene una baja corriente de alimentación (60 uA) y una baja impedancia de salida, la tensión de salida del sensor es proporcional a la temperatura en la escala Celsius, además no necesita calibración externa y su fuente de alimentación puede estar comprendida entre 4V y 30 V, como ventaja adicional el sensor LM35 no requiere de circuitos adicionales para su calibración externa. El sensor se encuentra disponible en diferentes encapsulados comúnmente utilizados por los transistores de baja potencia figura 23, el encapsulado empleado en la unidad didáctica de refrigeración fue metálico para lograr una mejor y más rápida señal de respuesta.



Figura 23. Encapsulados para sensores

Aunque no es necesario caracterizar estos sensores, es importante comprobar su buen funcionamiento. Con ayuda de un termómetro externo se pudo verificar que las lecturas obtenidas entre el sensor y el termómetro fueran iguales, para hacer esta comparación fue necesario lograr un buen contacto entre el sensor y el termopozo, para lo cual fue necesario aplicar una pasta de silicón en el interior de este elemento, finalmente se ajustó en la interfaz de usuario, el valor correcto que indicaba el termómetro mediante el ajuste de ganancias y control de nivel de DC que el programa contempla para este fin.

3. RESULTADOS

Para tener la certeza de que los datos que nos arrojan los sensores involucrados son correctos (flujo, presión, temperatura) es necesario caracterizarlos, de tal forma que se pueda calibrar cada una de las lecturas obtenidas. Como los datos serán capturados por medio de una PC, en la pantalla se deben de indicar valores reales, ya que de esto depende en gran medida que los cálculos teóricos concuerden con los experimentales.

3.1 SENSOR DE FLUJO

En el sensor se tomaron lecturas de corriente (mA) y flujo (ml/min) las cuales se muestran en la Tabla A-3

I (mA)	\dot{Q} ml/mín
8.3	190
8.9	198
9.3	215
9.44	225
10.16	265
11.19	315
12.02	345
12.76	375

Tabla A-3. Datos de corriente contra caudal en el sensor.

Es importante mencionar que al momento de realizar las pruebas de calibración se observó que la señal de salida no es a partir de 4 mA para un flujo de 0.02 gal/min (galones por minuto) como señala el fabricante, ya que el valor mínimo que se logró fue 8.3 mA para un flujo de 190 ml.

En la gráfica mostrada (Figura 24), se puede apreciar que el comportamiento no es lineal; sin embargo, mediante regresión lineal se puede obtener la curva de calibración verificando que la discrepancia de los valores obtenidos mediante dicha curva y los valores registrados no sean mayor al 2.5% como lo indica el fabricante.

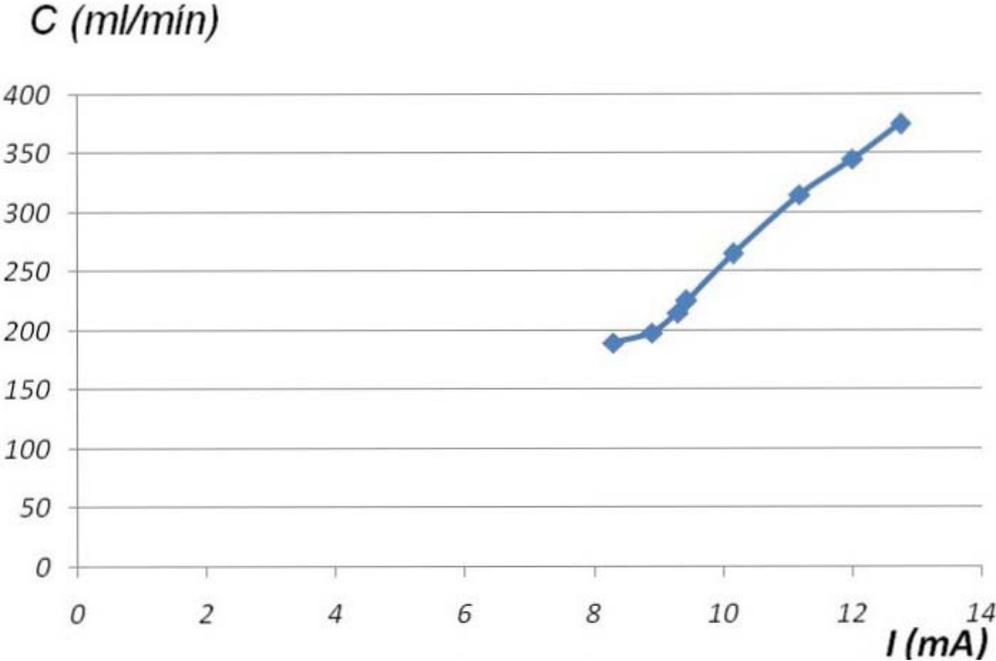


Figura 24. Gráfica flujo vs corriente.

Debido a que la gráfica no es una línea recta es necesario ajustarla, para ello se necesita conocer el coeficiente de correlación aplicando regresión lineal lo cual implica calcular la media aritmética, la covarianza y la varianza tanto de la corriente como del caudal, los valores se muestran en la Tabla A-4.

Corriente $I \times \dot{Q}^2$	I^2	\dot{Q}^2
1577	68.89	36100
1762.2	79.21	39204
1999.5	86.49	46225
2124	89.11	50625
2692.4	103.22	70225
3524.85	125.21	99225
4146.9	144.48	119025
4785	162.81	1400625

Tabla A-4. Datos de Corriente y Caudal.

los valores obtenidos anteriormente de corriente (I) y caudal (\dot{Q}) mostrados en la tabla A-3, se obtienen las *medias aritméticas* mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

donde: \bar{X} = *media aritmética*

x_i = *cada valor de x*

n = *numero de valores de x (8 valores de corriente y caudal)*

Sustituyendo y aplicando la ecuación (10) obtenemos la media aritmética de corriente y del caudal tenemos:

$$\bar{I} = 10.25 \text{ mA} \quad \text{y} \quad \bar{\dot{Q}} = 266 \text{ ml/min}$$

Para la obtención de la covarianza se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{Ix\dot{Q}}{n} - I\bar{x}\bar{\dot{Q}} \quad (11)$$

donde: $\sigma = \text{covarianza}$

$I = \text{corriente}$

$\dot{Q} = \text{caudal}$

$\bar{I} = \text{media aritmética de la corriente}$

$\bar{\dot{Q}} = \text{media aritmética del caudal}$

$n = \text{numero de valores de } I \text{ x } \dot{Q}$

Sustituyendo y aplicando la ecuación (11) tenemos:

$$\sigma = 99.98 \text{ mA} \times \text{ml} / \text{min}$$

Para obtener la varianza tanto de la corriente como del caudal aplicamos la siguiente ecuación:

$$\sigma^2_I = \frac{\sum_{i=1}^n I^2}{n} - \bar{I}^2 \quad (12)$$

donde: $\sigma^2_I = \text{varianza}$

$I = \text{corriente}$

$\bar{I}^2 = \text{media aritmética de la corriente}$

$n = \text{numero de valores de corriente}$

sustituyendo y aplicando la ecuación (12) con valores de corriente tenemos:

$$\sigma^2_I = 1.5 \text{ mA}$$

sustituyendo y aplicando la ecuación (12) con valores de caudal tenemos:

$$\sigma^2_{\dot{Q}} = 66.33 \text{ ml} / \text{min}$$

La recta de regresión del caudal sobre la corriente se utiliza para estimar los valores del caudal a partir de los valores de corriente para ello utilizamos la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} - \bar{\dot{Q}} = \frac{\sigma_{I \times \dot{Q}}}{\sigma_I^2} (I - \bar{I}) \quad (13)$$

donde: $\dot{Q} = \text{caudal}$

$\bar{\dot{Q}} = \text{media aritmética del caudal}$

$\sigma_{(I)(Caud)} = \text{covarianza}$

$\sigma_I^2 = \text{varianza de la corriente}$

sustituyendo y aplicando la ecuación (13) tenemos:

$$\dot{Q} = 66.65 I - 417.19 \quad (14)$$

Con la expresión anterior podemos obtener la gráfica de la recta ajustada asignándole valores de corriente para obtener valores de flujo.

Para obtener el coeficiente de correlación (r) utilizamos la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{I \times Caud}}{\sigma_I \sigma_{Caud}} \quad (15)$$

donde: $\sigma_{I \times Caud} = \text{covarianza}$

$\sigma_I = \text{varianza de la corriente}$

$\sigma_{Caud} = \text{varianza del caudal}$

Sustituyendo y aplicando la ecuación (15) tenemos:

$$r = \frac{99.98}{1.5 \times 66.33}$$

$$r = 1.00$$

Debido a que el resultado del coeficiente de correlación es 1 podemos concluir que hay una dependencia total entre las variables de corriente (I) y de caudal (ml), es decir que cuando una variable aumenta la otra también lo hace en proporción constante.

3.2 SENSOR DE PRESIÓN

Para la caracterización de este sensor se implementó un arreglo de aire comprimido, a la salida del compresor de aire se instaló la unidad de mantenimiento compuesta por una válvula de paso y un manómetro analógico. Este dispositivo permite regular el flujo del aire hacia el sensor para tener diferentes presiones, las cuales tendrán que coincidir con el sensor que se está caracterizando, los resultados obtenidos se muestran en la tabla A-5.

Presión (kg/cm ²)	Voltaje (V)
10.197	1.52
20.39	1.75
30.59	1.95
40.78	2.08
50.98	2.61
61.18	2.86
71.38	3.10
81.57	3.33
91.77	3.52
101.97	3.77

Tabla A5. Datos de presión y voltaje.

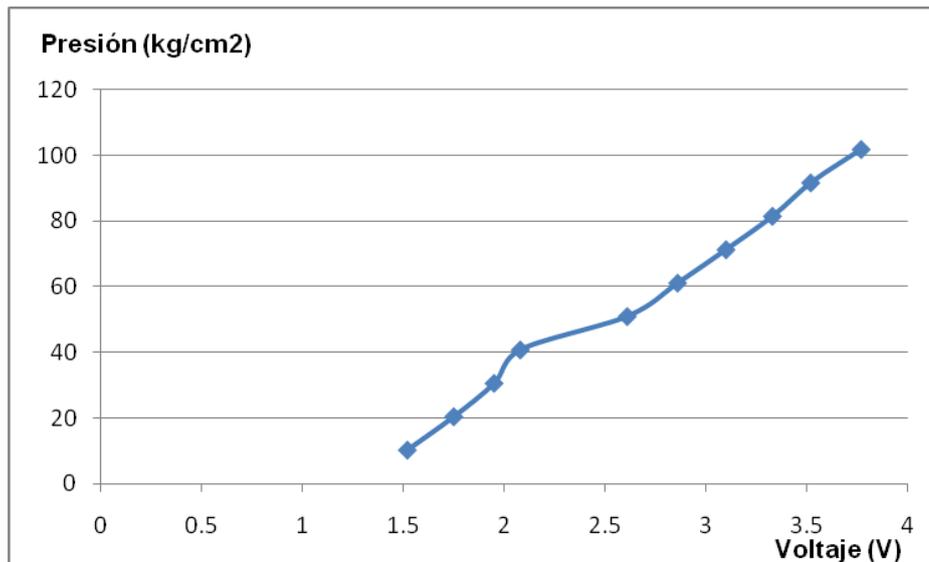


Figura 25. Gráfica Presión vs Voltaje.

Se puede observar que el comportamiento no es lineal, sin embargo mediante regresión lineal se puede obtener la curva de calibración, para ello se debe calcular el coeficiente de correlación aplicando regresión lineal.

Siguiendo el procedimiento realizado en el sensor de flujo se obtienen la media aritmética, la varianza y la covarianza.

De la ecuación (10) se obtiene la media aritmética de la presión y el voltaje

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

donde: \bar{X} = media aritmética de P y V

x_i = cada valor de P y V

n = numero de valores de x (10 valores de Presión y Voltaje)

Sustituyendo valores:

$$\bar{P} = 56.08 \text{ (kg / cm}^2\text{)} \quad \text{y} \quad \bar{V} = 2.56 \text{ (V)}$$

Para obtener la covarianza se multiplica cada valor de presión y voltaje además de elevarlos al cuadrado, los resultados se muestran en la tabla A-6.

Presión x Voltaje	P^2	V^2
15.49	103.97	2.31
35.68	415.75	3.06
59.65	935.74	3.80
88.90	1663	4.75
133.05	2598.96	6.81
174.97	3742.99	8.17
221.27	5095.10	9.61
271.62	6656.92	11.08
323.03	8421.73	12.39
384.42	10397.88	14.21

Tabla A-6 Datos de presión y voltaje.

Obtenemos la media de PxV , P^2 , V^2

$$\sum PxV = 1708$$

$$\sum P^2 = 40032.04$$

$$\sum V^2 = 77.88$$

$$\bar{PxV} = \frac{1708}{10} = 155.28$$

$$\bar{P} = \frac{40032.04}{10} = 3639.27$$

$$\bar{V} = \frac{77.88}{10} = 7.08$$

Para obtener la covarianza utilizamos la ecuación (11)

$$\sigma = \frac{PxV}{n} - \bar{PxV}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$\sigma = \frac{1708}{10} - 2.65 \times 56.08$$

$$\sigma = 22.19$$

Para obtener la varianza de la presión y del voltaje se aplica la ecuación (12), con los valores de presión tenemos:

$$\sigma_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^n P^2}{n} - \bar{P}^2$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$\sigma_p^2 = \frac{40032.04}{10} - 56.08^2$$
$$\sigma_p = 29.29$$

Con los valores de voltaje tenemos:

$$\sigma_v^2 = \frac{76.19}{10} - 2.65^2$$
$$\sigma_v = 0.768$$

La recta de regresión de la presión sobre el voltaje se utiliza para estimar los valores de la presión a partir de los valores de voltaje para ello utilizamos la ecuación (13)

$$P - \bar{P} = \frac{\sigma_{PxV}}{\sigma_v^2} (V - \bar{V})$$

Despejando P y sustituyendo valores tenemos:

$$P = 28.89 V - 18.47$$

Con la expresión anterior se obtiene la gráfica de la recta ajustada ya que al asignar valores de voltaje obtenemos valores de presión para graficar.

Para obtener el coeficiente de correlación (r) utilizamos la ecuación (15)

$$r = \frac{\sigma_{PxV}}{\sigma_p \times \sigma_v}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$r = \frac{22.19}{(29.29)(0.768)}$$

$$r = 0.986$$

Debido a que el coeficiente de correlación es muy próximo a 1 se puede concluir que hay una dependencia total entre las variables de presión y voltaje, es decir que cuando una variable aumenta la otra también lo hace en forma proporcional.

3.3 SENSOR DE TEMPERATURA

Aunque no es necesario caracterizar estos sensores, es importante comprobar su funcionamiento. Con ayuda de un termómetro externo se pudo verificar que las lecturas obtenidas entre el sensor y el termómetro fueran iguales, para hacer esta comparación fue necesario lograr un buen contacto del sensor en el equipo. En la tabla A-7 se muestran los valores obtenidos de temperatura y voltaje.

Temperatura (°C)	Voltaje (mA)
-30	0
-20	100
-10	200
0	300
10	400
20	500
30	600
40	700
50	800
60	900

Tabla A-7. Valores de Temperatura y Voltaje.

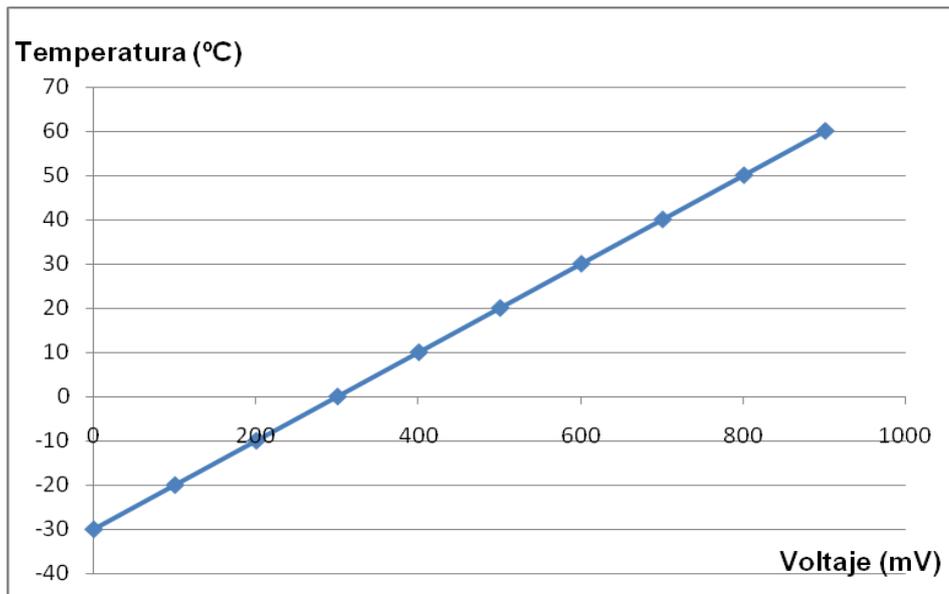


Figura 26. Gráfica de temperatura vs Voltaje.

Como se puede observar la respuesta es lineal por ello no es necesario obtener la curva de calibración.

Una vez caracterizados los sensores (presión, flujo y temperatura), se colocaron en el sistema de refrigeración, como se muestra el diagrama a bloques (Figura 27). Mediante una tarjeta de adquisición de datos A/D y D/A tipo PCI-6220 de *National Instruments* se recolectan todos los datos de los sensores. Estos datos son enviados hacia la PC, la cual se encarga de procesarlos y posteriormente, mediante la misma tarjeta antes mencionada, y si así se desea, regresa señales de control a los actuadores para modificar algunos parámetros del ciclo.

Dos tarjetas adicionales se encargan de acondicionar las señales procedentes de los sensores, además de que, por otro lado, también les proporcionan potencia a las señales que vienen de la PC para activar los actuadores encargados de modificar parámetros. Una fuente de voltaje suministra +24VDC y +5 VDC para alimentar los sensores que así lo requieren y la parte de potencia del sistema. Se muestra el diagrama a bloques del sistema electrónico de la unidad de refrigeración

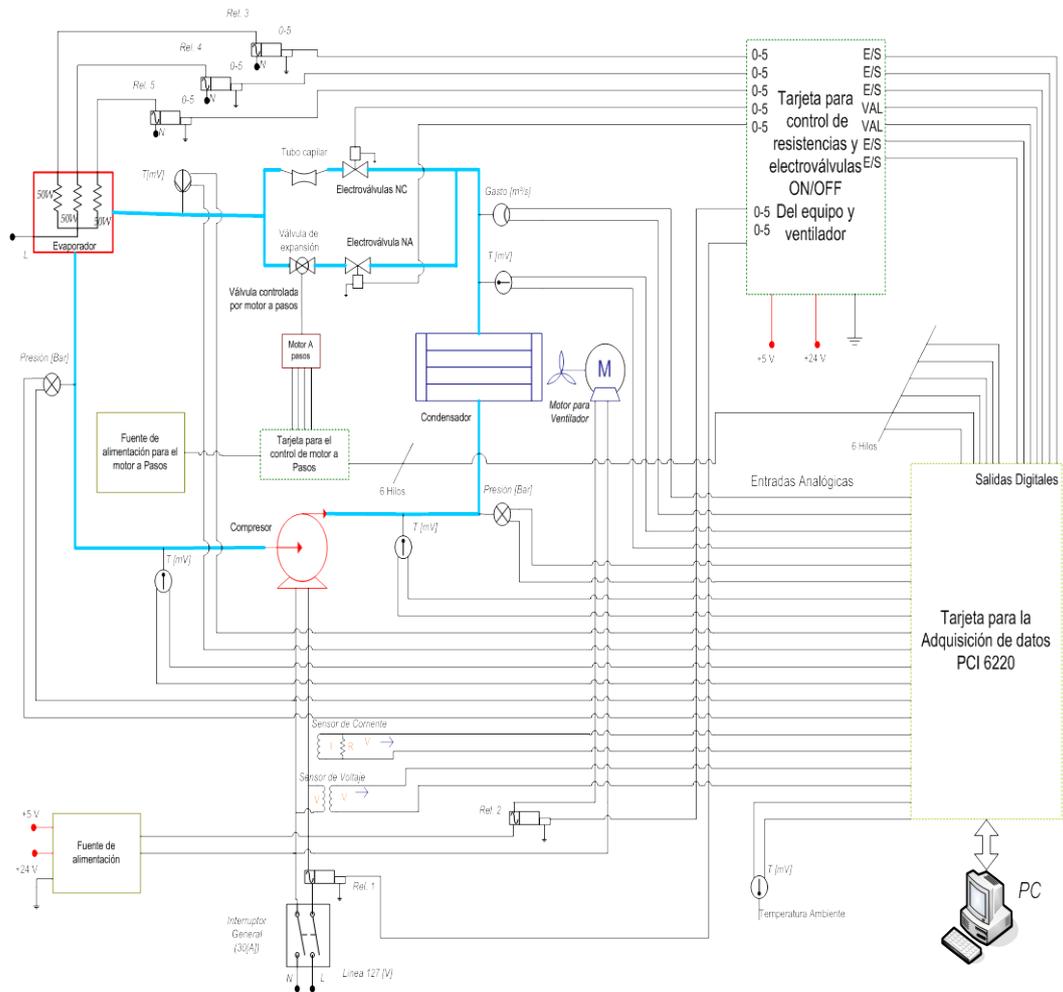


Figura 27. Diagrama del sistema electrónico.

Al hacer funcionar el equipo de refrigeración (Figura 28), el sensor de presión colocado a la salida del compresor “**punto A**”, se obtiene un valor de **12.53 kg/cm² (178 p si)** y en el sensor de temperatura de **47.22 °C (117 ° F)**, es importante mencionar que el compresor comprime al refrigerante aumentando tanto su presión como su temperatura.



Figura 28. Arreglo de la instrumentación en el circuito de refrigeración.

El valor de presión es comparado con un manómetro analógico colocado tanto a la salida como a la entrada del compresor como se muestra en la figura anterior.

En el “**punto B**” (salida del condensador), se colocó otro sensor de temperatura ya que a medida que el refrigerante avanza por el condensador su temperatura disminuye registrando una temperatura de **13°C (55.4 ° F)** y una presión de **12.53 kg/cm² (178 psi)** en éste punto el gas caliente que sale con alta presión de la válvula de descarga del compresor se empieza a condensar en su recorrido por el condensador.

Cuando el refrigerante llega a la válvula de expansión “**punto C**” (entrada al control de flujo), la temperatura disminuye y la presión sigue manteniéndose de manera constante **9°C (48 ° F) y 12.53 kg/cm² (178 p si)**, en este punto el refrigerante se encuentra como líquido sub-enfriado a alta presión. A medida que el refrigerante pasa a través de la válvula de expansión, que es una válvula de control de flujo o por el tubo capilar, esto dependerá del usuario, ya que desde la computadora podrá seleccionar el paso del refrigerante por alguno de los dos

elementos de control de flujo, en este punto la presión del refrigerante se va reduciendo hasta la presión de vapor, de tal manera que la temperatura de saturación del refrigerante en el evaporador hará disminuir la temperatura del espacio refrigerado. En el “**punto D**” (entrada al evaporador), los valores de temperatura y presión del refrigerante son **-7.7°C (18 °F) y 2.23 kg/cm² (31.73 psi)** respectivamente.

El vapor refrigerante que sale del evaporador se encuentra saturado y tiene aproximadamente la misma presión y temperatura que la del refrigerante líquido-vapor, para el “**punto E**” (salida del evaporador), los valores registrados por el sensor de temperatura y de presión son **-1°C (30.2 °F) y 2 kg/cm² (28.44 psi)**. El vapor refrigerante en su recorrido a la línea de succión absorbe calor de los alrededores y se vuelve vapor sobrecalentado. En el “**punto F**” (entrada del compresor) el vapor se encuentra a **21°C (69.8 ° F) y 2 kg/cm² (28.44 p si)**. Finalmente el compresor saca el vapor refrigerante del evaporador por la línea de succión para nuevamente repetir el ciclo.

Los valores registrados por los sensores de presión y temperatura se presentan en una pantalla de computadora como la mostrada en la Figura 29.

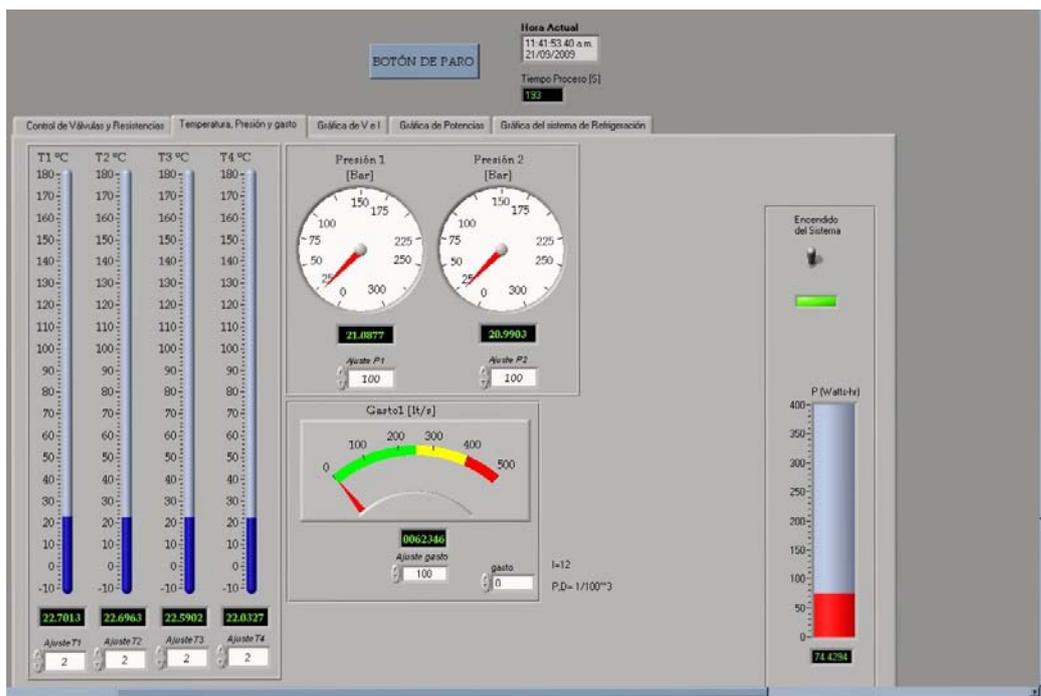


Figura 29. Pantalla mostrada en la computadora.

Con los valores de presión y temperatura de los diferentes puntos del equipo mostrados en la pantalla de la computadora, podemos trazar el diagrama de ciclo saturado simple de nuestro sistema de refrigeración con gas refrigerante 134a, como se muestra en la figura 30.

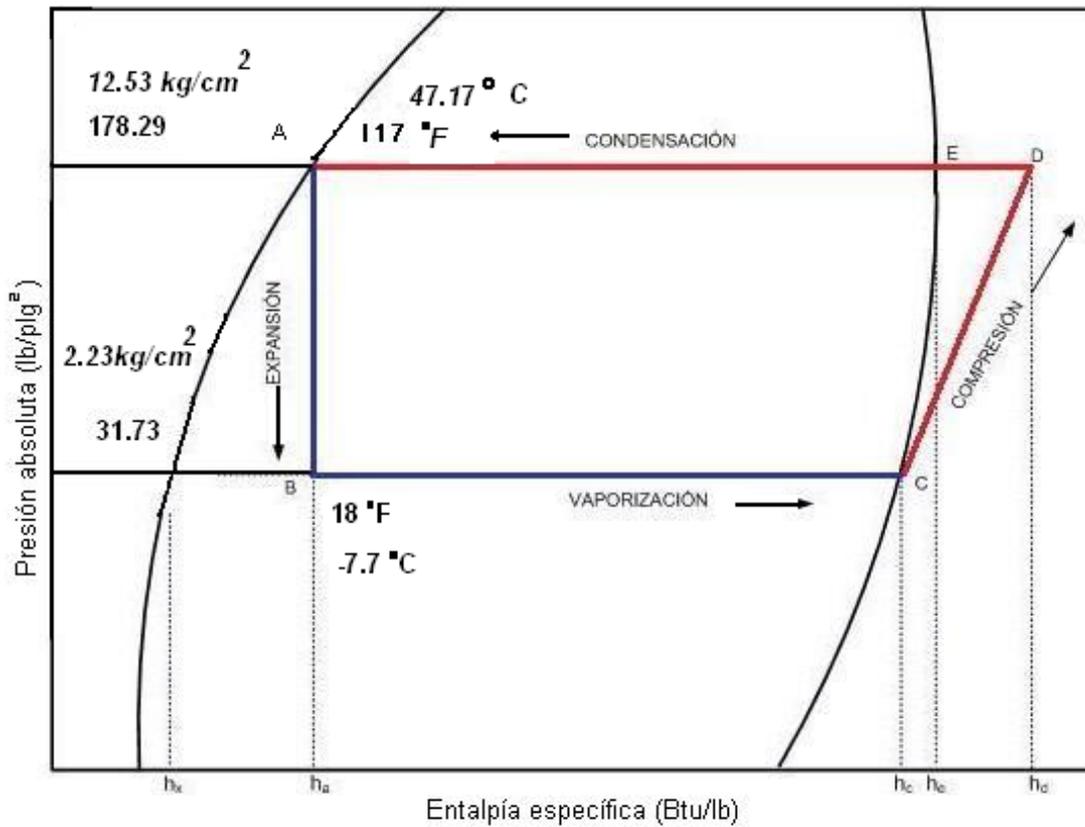


Figura 30. Diagrama presión-entalpía de nuestro sistema.

En el diagrama de presión-entalpía se puede observar el trazo del ciclo de refrigeración saturado simple con gas refrigerante 134a, como se puede observar el sistema trabaja a una temperatura en el evaporador de $-7.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($18 \text{ }^\circ\text{F}$) y una presión de 2.23 kg/cm^2 (31.73 psi), en el condensador trabaja a una temperatura de $47.17 \text{ }^\circ\text{C}$ ($117 \text{ }^\circ\text{F}$) y una presión de 12.53 kg/cm^2 (178 psi). Los puntos A, B, C, D. y E sobre el diagrama corresponden a los puntos del sistema de refrigeración así mismo h_a , h_b , h_c , h_d , h_e , representan las entalpías en esos puntos, (fig.30)

El punto A es el punto correspondiente a la parte inferior del condensador donde termina este proceso, en este punto se encuentra el refrigerante como líquido

saturado a la temperatura y presión condensante, se pueden obtener datos de entalpia, de la tabla de propiedades del refrigerante 134a (tabla A-8)

$$P = 12.53 \text{ kg/cm}^2 \text{ (178.29 psi)}$$

$$T = 47 \text{ }^\circ\text{C (117 }^\circ\text{F)}$$

$$h_a = 119.32 \text{ kJ/kg (51.3 Btu/lb)}$$

$$s = 428.73 \times 10^{-3} \text{ kJ/kg.K (0.1024 Btu/lb}^\circ\text{R)}$$

En el proceso de **expansión** no ocurre ningún cambio en las propiedades del refrigerante (líquido) a medida que fluye a través de la tubería desde el condensador hasta el control del refrigerante punto A.

El proceso descrito entre los puntos A-B sucede en el control del refrigerante, cuando la presión del líquido es reducida desde la presión condensante hasta la presión vaporizante a medida que el líquido pasa a través del dispositivo de control del refrigerante (líquido). Lo mismo sucede con la temperatura disminuye y de inmediato una parte del líquido pasa a ser vapor.

Como resultado de la vaporización parcial del refrigerante líquido durante este proceso, el refrigerante en el punto B es una mezcla de líquido vapor cuyas propiedades las podemos encontrar en la tabla A-8.

$$P = 2.23 \text{ kg/cm}^2 \text{ (31.739 psi)}$$

$$T = -7.7 \text{ }^\circ\text{C (18}^\circ\text{F)}$$

$$h_b = 119.32 \text{ kJ/kg (51.3 btu/lb)}$$

$$s = 531.72 \times 10^{-3} \text{ kJ/kg.K (0.127 btu/lb}^\circ\text{R)}$$

El proceso de **vaporización** del refrigerante B-C ocurre en el evaporador. Debido a que la vaporización se efectúa a temperatura y presión constante, el proceso es tanto isotérmico como isobárico. En el punto C el refrigerante se encuentra totalmente vaporizado y es un vapor saturado a la temperatura y presión vaporizante, las propiedades, del refrigerante en este punto se pueden obtener en la tabla A-8.

$$P = 2.23 \text{ kg/cm}^2 \text{ (31.739 psi)}$$

$$T = -7.7 \text{ }^\circ\text{C (18}^\circ\text{F)}$$

$$h_c = 245.86 \text{ kJ/kg (105.7 btu/lb)}$$

$$s = 936.59 \text{ kJ/kg.K (0.2237 btu/lb}^\circ\text{R)}$$

A medida que el refrigerante fluye a través del evaporador y absorbe calor del espacio refrigerado, se incrementa la entalpía del refrigerante durante el proceso B-C. La cantidad de calor absorbido por el refrigerante en el evaporador (efecto refrigerante) es la diferencia del valor entre la entalpía de refrigerante de los puntos B-C

Para calcular el efecto refrigerante (Q_e) utilizamos la expresión (1)

$$q_e = h_c - h_a$$

$$q_e = 245.86 - 119.32$$

$$q_e = 126.54 \text{ kJ / kg (54.4 Btu / lb)}$$

En el proceso de **compresión** el refrigerante no cambia de condiciones mientras fluye a través de la tubería de succión desde el evaporador hasta el compresor.

El proceso C-D se efectúa en el compresor a medida que se incrementa la presión del vapor debido a la compresión desde la presión vaporizante hasta la compresión condensante, en el punto D, el refrigerante es un vapor sobrecalentado cuyas propiedades son:

$$P = 12.53 \text{ kg/cm}^2 \text{ (178.29 psi)}$$

$$T = 47 \text{ }^\circ\text{C (117 }^\circ\text{F)}$$

$$h_d = 272.14 \text{ kJ/kg (117 Btu/lb)}$$

$$s = 936.59 \times 10^{-3} \text{ kJ/kg.K (0.2237 btu/lb}^\circ\text{R)}$$

Durante el proceso C-D se efectúa un trabajo sobre el vapor refrigerante y se incrementa la energía (entalpía) del vapor en una cantidad que es igual al trabajo mecánico efectuado sobre el vapor. La energía equivalente al trabajo efectuado durante el proceso de compresión es a menudo llamada calor de compresión y es igual a la diferencia de valores de entalpía del refrigerante entre los puntos D y C, para calcular el trabajo de compresión utilizamos la ecuación (2).

$$q_w = h_d - h_c$$

$$q_w = 272.14 - 245.86$$

$$q_w = 26.28 \text{ kJ/kg (11.3Btu/lb)}$$

El trabajo mecánico efectuado sobre el vapor por el pistón durante la compresión puede calcularse a partir del calor de compresión, si W es el trabajo efectuado y J es el equivalente mecánico, utilizamos la ecuaciones (3)

$$W = (q_w)(J)$$

Sabemos que $q_w = h_d - h_c$; $J = 746 \text{ Watts}$ tenemos:

$$W = J(h_d - h_c)$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$W = (746)(26.28)$$

$$W = 19604.88 \text{ kJ x kg}$$

En el proceso de **condensación** por lo general los procesos D-E como E-A (figura 30) se verifican en el condensador a medida que el gas caliente descargado del compresor es enfriado hasta la temperatura de condensación y después condensado, el proceso D-E toma lugar en la parte superior del condensador y en una parte de la longitud de la tubería. Esto representa el enfriamiento del vapor desde la temperatura de la descarga hasta la temperatura condensante a medida que el vapor cede su calor al medio condensante. En este proceso la presión del vapor permanece constante, sus propiedades en el punto E son:

$$P = 12.53 \text{ kg/cm}^2 \text{ (178.29 psi)}$$

$$T = 47.17 \text{ }^\circ\text{C (117}^\circ\text{F)}$$

$$h_e = 274.47 \text{ kJ/kg (118 btu/lb)}$$

$$s = 0.91356 \text{ kJ/kg.K (0.2182 btu/lb}^\circ\text{R)}$$

Al regresar al punto A el refrigerante ha completado un ciclo y sus propiedades son las mismas que se describieron anteriormente en ese punto.

La cantidad total de calor cedido por el refrigerante en el condensador es la diferencia entre las entalpías del vapor sobre calentado en el punto D y el líquido saturado en el punto A. Con la ecuación (4) podemos calcular el calor eliminado en el condensador.

$$q_c = h_d - h_a$$

Sustituyendo valores:

$$q_c = 272.14 - 119.32$$

$$q_c = 152.82 \text{ kJ / kg } (65.7 \text{ Btu / lb})$$

Si el refrigerante al llegar al punto A al final del ciclo, esta es la misma condición que cuando dejó en el punto A al principio del ciclo, el calor eliminado del refrigerante al medio condensante en el condensador debe ser exactamente igual al calor absorbido por el refrigerante en todos los demás puntos del ciclo. La energía del refrigerante se incrementa en solo dos puntos del ciclo

1. El calor absorbido del espacio refrigerado (q_e)
2. La energía equivalente debido al trabajo mecánico en el compresor (q_w)

Utilizando la ecuación (5) tenemos:

$$q_c = q_e + q_w$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$q_c = 126.54 + 26.28$$

$$q_c = 152.82 \text{ kJ / kg } (65.7 \text{ Btu / lb})$$

Con la ecuación (6) obtenemos la capacidad de refrigeración del sistema

$$Q_e = (\dot{m})(q_e)$$

El flujo másico (\dot{m}) de refrigerante que debe circular por minuto de tonelada de capacidad de refrigeración, se obtiene dividiendo 211010 J/minxkg entre el efecto refrigerante por kilogramo a las condiciones dadas.

$$\dot{m} = \frac{211010 \text{ J / min } \times \text{ton}}{126.54 \text{ kJ / kg}}$$

$$\dot{m} = 1667.535 \text{ kJ / min } \times \text{ton}$$

Conociendo el valor del flujo másico podemos calcular la capacidad de refrigeración del sistema.

$$Q_e = (211010 \text{ J / min } \times \text{ton})(126.54 \text{ kJ / kg})$$

$$Q_e = 26701205 \text{ J / min } \times \text{ton}$$

Con la ecuación (7) podemos calcular la cantidad total de calor eliminado en el condensador (Q_c)

$$Q_c = (\dot{m})(q_c)$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$Q_c = (211010 \text{ J / min } \times \text{kg})(152.82 \text{ kJ / kg})$$

$$Q_c = 32246.5482 \text{ kJ / min } \times \text{ton}$$

Para calcular la energía térmica equivalente al trabajo del compresor por minuto y por tonelada de capacidad de refrigeración utilizamos la ecuación (8)

$$Q_w = (\dot{m})(q_w)$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$Q_w = (1667.535 \text{ J / min } \times \text{ton})(26.28 \text{ kJ / kg})$$

$$Q_w = 43.822819 \text{ kJ / min } \times \text{ton}$$

Utilizando la ecuación (9) calculamos el trabajo de compresión por minuto por tonelada en pies-libra

$$W = (J)(Q_w)$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$W = (778 \text{ pies} \times \text{lb} / \text{Btu})(43.822819 \text{ kJ / min } \times \text{ton})$$

$$W = 32263.66 \text{ pies} \times \text{lb} / \text{min } \times \text{ton}$$

Para calcular la potencia teórica en caballos de potencia necesaria para impulsar al compresor por tonelada de refrigeración de capacidad, utilizamos la siguiente expresión:

$$T_{hp/ton} = \frac{32263.66(\text{pies} \times \text{lb} / \text{Btu})}{33000(\text{pies} \times \text{lb} / \text{min } \times \text{hp})} \quad (16)$$

$$T_{hp/ton} = 746 \text{ Watts } (0.977 \text{ hp} / \text{ton})$$

La potencia del compresor calculada sólo representa la potencia necesaria para comprimir al vapor, es decir, es la potencia teórica que se necesita para una capacidad de 1 tonelada de refrigeración en un sistema de 100% de eficiencia.

El coeficiente de rendimiento (c.d.r.) de un ciclo de refrigeración, es una expresión de la **eficiencia** del ciclo y queda definido como la relación del calor absorbido en el espacio refrigerado a la energía térmica equivalente de la energía suministrada al compresor, esto es:

$$c.d.r. = \frac{\text{Calor absorbido en el espacio refrigerado}}{\text{Energía térmica equivalente a la energía suministrada en el compresor}} \quad (17)$$

la expresión puede escribirse de la siguiente manera:

$$c.d.r. = \frac{\text{Efecto refrigerante}}{\text{Calor de compresión}} \quad (18)$$

La expresión se puede también escribir

$$c.d.r. = \frac{(h_c - h_a)}{(h_d - h_c)}$$

de manera más simple

$$c.d.r. = \frac{q_e}{q_w}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$c.d.r. = \frac{126.54(kJ / kg)}{26.28(kJ / kg)}$$

$$c.d.r. = 4.81$$

El resultado del coeficiente de rendimiento nos indica que el compresor tiene la capacidad de bombear cuatro veces más energía que la requerida.

TEMP. (°C)	PRESION ABSOLUTA (bar)		DENSIDAD (Kg/m ³)		ENTALPIA (kJ/Kg)		ENTROPIA (kJ/Kg.K)	
	BURBUJA	ROCIO	BURBUJA	ROCIO	BURBUJA	ROCIO	BURBUJA	ROCIO
-40	0.51	0.51	1413.94	2.76	149.45	375.65	0.8008	1.7710
-35	0.66	0.66	1399.95	3.50	155.53	378.93	0.8266	1.7646
-30	0.84	0.84	1385.72	4.39	161.67	382.20	0.8521	1.7590
-25	1.06	1.06	1371.24	5.45	167.88	385.45	0.8773	1.7540
-20	1.32	1.32	1356.46	6.71	174.16	388.69	0.9023	1.7497
-15	1.63	1.63	1341.36	8.19	180.51	391.90	0.9270	1.7458
-10	2.00	2.00	1325.92	9.92	186.93	395.07	0.9515	1.7425
-5	2.42	2.42	1310.10	11.92	193.43	398.20	0.9759	1.7395
0	2.92	2.92	1293.86	14.23	200.00	401.28	1.0000	1.7369
5	3.49	3.49	1277.17	16.89	206.65	404.30	1.0240	1.7346
10	4.14	4.14	1259.99	19.93	213.38	407.25	1.0478	1.7325
15	4.88	4.88	1242.27	23.40	220.20	410.13	1.0714	1.7306
20	5.71	5.71	1223.96	27.34	227.11	412.92	1.0950	1.7288
25	6.65	6.65	1205.00	31.81	234.11	415.62	1.1184	1.7272
30	7.70	7.70	1185.33	36.88	241.21	418.20	1.1417	1.7256
35	8.88	8.88	1164.89	42.61	248.42	420.67	1.1650	1.7240
40	10.18	10.18	1143.58	49.08	255.74	423.01	1.1882	1.7223
45	11.62	11.62	1121.32	56.40	263.19	425.20	1.2114	1.7206
50	13.20	13.20	1197.98	64.66	270.77	427.23	1.2346	1.7187

Tabla A-8. Propiedades termodinámicas del refrigerante 134a.

Otros valores que se pueden obtener del equipo de refrigeración es el voltaje y consumo de la corriente eléctrica del compresor, los cuales se pueden observar directamente en la computadora (Figura 33).

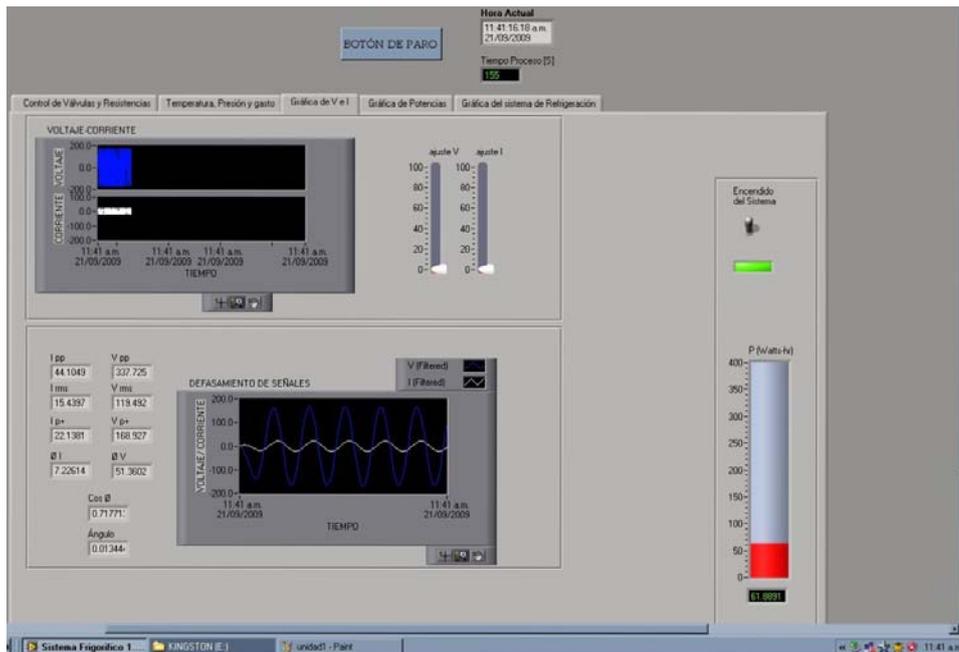


Figura 33. Pantalla mostrando valores de Voltaje y Corriente.

4. CONCLUSIONES.

Se diseñó una unidad didáctica para el estudio del ciclo termodinámico de refrigeración para el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Dicha unidad está dirigida a estudiantes de licenciatura en Ingeniería Mecánica con enfoque en el área de Fluidos. Este equipo permitirá llevar a cabo prácticas básicas sobre el ciclo de refrigeración con el objeto de que el estudiante pueda observar los fenómenos involucrados en el proceso, teniendo la oportunidad de variar las condiciones de operación del equipo y generar el diagrama presión-entalpía. Además de observar los cambios físicos que sufre el refrigerante a su paso por cada uno de los componentes básicos del sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Con la unidad didáctica se pretende que el alumno asocie un sistema de refrigeración con la conservación de alimentos y el acondicionamiento de aire, si no que visualice que este ciclo termodinámico tiene muchas otras aplicaciones tanto en la industria y la investigación.

Con los valores de presión y temperatura que se obtienen del sistema de refrigeración se podrá calcular el efecto refrigerante, trabajo mecánico de compresión, calor eliminado en el condensador así como la capacidad de refrigeración.

Los componentes del sistema de refrigeración son de uso comercial esto permite llevar a cabo mantenimiento tanto preventivo como correctivo a un bajo costo, los sensores de presión y flujo es la parte de mayor costo en el equipo debido a que son de fabricación extranjera. Sin embargo, la electrónica e interfaz de comunicación a la computadora es un desarrollo realizado en la UNAM, lo cual permite que el equipo tenga un precio menor a los equipos didácticos que permiten el estudio de este ciclo termodinámico de procedencia extranjera.

5. REFERENCIAS

Air-Conditioning and Refrigeration Institute, *Manual de Refrigeración y Aire Acondicionado*, Ed. Prentice-Hall, 1987.

Air-Conditioning and Refrigeration Institute, *Refrigeración y Aire Acondicionado*, Ed. Prentice-Hall, 1979.

Baigorri, J., Bachs, X., *Enseñar y Aprender Tecnología en la Educación Secundaria*, 1ª edición, Ed. Horsori, 1977.

Baumeister, T., *Marks Manual del Ingeniero Mecánico*, 2ª edición, Ed. Mc Graw-Hill, 1982.

Carrio, M.L., *Ventajas del uso de la Tecnología en el Aprendizaje Colaborativo*, Revista Iberoamericana de la Educación, 2007.

Cottell, L., *Aire Acondicionado y Refrigeración para Regiones Tropicales*, 1ª edición, Ed. Limusa, 2000.

Dossat, J., *Principios de Refrigeración*, 2ª edición, Ed. Continental, 1980.

Hernández, G.E., *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*, 1ª edición, Editorial Limusa, 1973.

Jennings, B., *Aire Acondicionado y Refrigeración*, 4ª edición, Ed. Continental, 1970.

Kuehn, T., Ramsey, J., *Thermal Environmental Engineering*, 3ª edición, Ed. Prentice-Hall, 1998.

Gilver Copeland, S.A de C.V., *Manual de Refrigeración*, 1983.

Pita, E., *Acondicionamiento de Aire Principios y Sistemas*, 2ª edición, Ed. Continental, Prentice-Hall, 2006.

Reynolds, W., Perkins, H., *Ingeniería Termodinámica*, 2ª edición, Ed. Mc Graw-Hill, 1980.

Stoecker, W.F., *Refrigeración y Acondicionamiento de Aire*, 1ª edición en español, Ed. Mc Graw-Hill, 1970.

Wark, K., *Termodinámica*, 4ª edición, Ed. Mc Graw-Hill, 1984.

REFERENCIAS ELECTRONICAS

De Lorenzo. (2010). *Equipos didácticos de laboratorio*. Recuperado el 14 de 11 de 2011, de <http://www.delorenzo.com.mx>

Gunt Hamburg. (2005). *equipment for engineering education*. Recuperado el 14 de 02 de 2013, de http://www.gunt.de/static/s1_1.php

corporation, H. E. (1999). *equipo de entrenamiento*. Retrieved 02 13, 2012, from <http://www.hampden.com>

Ltd, P. H. (2011). *Engineering Laboratory*. 2012, from <http://www.p-a-hilton.co.uk>