CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO A PARTIR DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICO CON FINES DE ENSEÑANZA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

DANIEL FELIPE RIVERA ARIAS
OMAR DANIEL ZULUAGA LEÓN

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2015

CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO A PARTIR DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICO CON FINES DE ENSEÑANZA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

DANIEL FELIPE RIVERA ARIAS
OMAR DANIEL ZULUAGA LEÓN

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecánico

Director

CARLOS ALBERTO URIBE BEDOYA

Ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2015

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del Jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a nuestras familias por su constante ayuda en nuestro proceso de formación en todos los ámbitos, por su esfuerzo incesante en nuestro crecimiento como personas y como profesionales que pondrán a disposición de la sociedad todo el conocimiento adquirido a lo largo del proceso académico y personal.

Agradecemos al CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y CALIDAD EN REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN por facilitarnos el espacio y recursos necesarios para la realización de este trabajo de grado.

A nuestro director, el ingeniero Carlos Alberto Uribe Bedoya, por poner a nuestra disposición toda su experiencia y conocimientos que facilitaron el aprendizaje durante nuestro proceso académico en las diferentes materias de la carrera y durante este proyecto de grado.

Finalmente agradecemos a la Universidad Pontificia Bolivariana por brindar el espacio suficiente para el desarrollo de profesionales con una formación integral en valores y conocimiento técnicos.

CONTENIDO

Introducción 15

CAPÍTULO 1. Marco conceptual 18

1.1 Marco teórico 18

1.1.1 Historia 18

1.1.2 Refrigeración por compresión de vapor 20

1.1.3 Componentes del sistema de refrigeración por compresión de vapor 21

1.1.4 Refrigeración doméstica 31

1.1.5 Refrigerantes 34

CAPÍTULO 2. Diseño conceptual de un refrigerador doméstico 41

2.1 Variables termodinámicas 41

2.1.1 Temperatura 41

2.1.2 Presión 44

2.2 Componentes principales de un equipo domestico 46

2.2.1 Temporizador de descongelamiento 47

2.2.2 Termostato de descongelamiento 48

2.2.3 Resistencia de descongelamiento 49

2.2.4 Ventiladores 50

2.2.5 Control de temperatura por expansión de un fluido 51

2.3 Nuevas tendencias en refrigeración doméstica..... 52

2.3.1 Compresores..... 52

2.3.2 Condensadores y evaporadores..... 54

2.3.3 Aislamiento..... 54

2.3.4 Refrigerantes..... 55

2.3.5 Controles..... 55

2.3.6 Carga de refrigerantes y dispositivos de expansión..... 56

CAPÍTULO 3. Diseño de detalle..... 57

3.1 Modelado del refrigerador en CAD con sus modificaciones..... 57

3.2 Instrumentación..... 59

3.2.1 Rangos de trabajo del sistema de refrigeración..... 59

3.2.2 Selección de la instrumentación 60

3.2.3 Diseño del tablero del circuito de instrumentación..... 66

3.2.4 Diagrama de instrumentación y proceso..... 68

CAPÍTULO 4. Construcción y montaje 70

4.1 Despiece e identificación de componentes..... 72

4.2 Remoción de espuma de poliuretano y pared posterior del refrigerador 76

4.3 Instalación de láminas de acero en la parte posterior del refrigerador 77

4.4 Desmonte de la pared de plástico del interior del refrigerador 78

4.5 Instalación de láminas de acrílico 79

4.6 Instalación de ductos de ventilación en acrílico 80

4.7 Instalación de termopozos para medición de temperatura del refrigerante 82

4.8 Instalación de los transductores de presión 83

4.9 Instalación caja de conexiones 84

4.10 Detección de fugas 85

4.11 Carga de refrigerante 87

CAPÍTULO 5. Guia de refrigeración 89

Conclusiones 98

Recomendaciones 99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de refrigeración de Carnot por compresión de vapor. Hecha por los autores. 21

Figura 2. Compresor hermético alternativo [9]. 22

Figura 3. Compresor semihermético [11]. 23

Figura 4. Condensador de tubo con aletas Modificado de [12]..... 24

Figura 5. Condensador de tiro natural. Hecha por los autores. 25

Figura 6. Tubo Capilar [14]. 26

Figura 7. Válvula de expansión automática. Modificada de [12]..... 27

Figura 8. Ilustración de una válvula de expansión termostática. Modificada de [12]..... 27

Figura 9. Válvula de expansión electrónica [15]. 28

Figura 10. Esquema de evaporador seco o de expansión directa [18]. 29

Figura 11. Evaporador roll bond. Modificada de [12]. 30

Figura 12. Evaporador de tubo con aletas. Modificada de [12]..... 31

Figura 13. Esquema de un refrigerador doméstico [21]..... 32

Figura 14. Arreglo típico de refrigeradores lado a lado o “side by side” con congelador al lado izquierdo, donde también se ubica el dispensador de hielo y agua [22]. 33

Figura 15. Arreglos de refrigeradores con puerta simple y con puerta arriba y abajo: (A) refrigerador de puerta simple con congelador interno con puerta propia, (B) refrigerador

con puerta arriba y abajo con congelador superior, (C) refrigerador con puerta arriba y abajo con congelador en el fondo. Modificada de [12]. 33

Figura 16. Presión de saturación a diferentes temperaturas de evaporación, para refrigerantes comunes en neveras domésticas. Hecha por los autores. 45

Figura 17. Presión de saturación a diferentes temperaturas de condensación, para refrigerantes comunes en neveras domésticas. Hecha por los autores. 46

Figura 18. Temporizador de descongelamiento para refrigeradores [28]. 48

Figura 19. Termostato bimetálico de descongelamiento [29]. 49

Figura 20. Un calentador utilizado para la descongelación eléctrica del evaporador de baja temperatura. Modificada de [12]. 50

Figura 21. Ventilador de tiro forzado [12]. 50

Figura 22. Bulbo remoto que transmite la presión al diafragma basándose en la temperatura del refrigerador. Modificada de [12] 51

Figura 23. Ciclos de termostato no anticipado que muestran retraso y sobrepaso del sistema provocando un gran cambio de temperatura Modificada de [12]. 52

Figura 24. Modelo en CAD del equipo didáctico sin modificaciones. Hecha por los autores. 57

Figura 25. Modelo en CAD del equipo didáctico con modificaciones. Hecha por los autores. 58

Figura 26. Modelo en CAD del equipo didáctico con modificaciones. Hecha por los autores. 59

Figura 27. Esquema de ubicación de los indicadores, interruptores y testigos. Hecha por los autores. 67

Figura 28. Circuito eléctrico de los equipos de instrumentación. Hecha por los autores. . 68

Figura 29. Diagrama de instrumentación y procesos. Hecha por los autores. 69

Figura 30. Diagrama de proceso de construcción y montaje del equipo didáctico. Hecho por los autores 70

Figura 31. Nevera doméstica usada para la modificación, interior. Hecha por los autores. 72

Figura 32. Evaporador de la nevera usada para la modificación. Hecha por los autores. 74

Figura 33. Nevera doméstica usada para la modificación, parte posterior. Hecha por los autores. 75

Figura 34. Caja de control de la nevera usada para la modificación. Hecha por los autores. 76

Figura 35. Remoción de espuma de poliuretano de la nevera. Hecha por los autores. 77

Figura 36. Fabricación de elementos en chapa. Hechas por los autores. 78

Figura 37. Remoción de recubrimiento plástico interior e instalación de elementos fabricados. Hecha por los autores. 79

Figura 38. Instalación de acrílico y evaporador. Hechas por los autores. 80

Figura 39. Fabricación en acrílico de ductos del conservador. Hechas por los autores. .. 81

Figura 40. Instalación de ductos del conservador. Hecha por los autores. 81

Figura 41. Termopozos para medición de temperatura en la parte posterior del equipo. Hecha por los autores. 82

Figura 42. Termopozos para medición de temperatura en el evaporador. Hecha por los autores. 82

Figura 43. Ubicación de los transmisores de presión. Hecha por los autores. 83

Figura 44. Panel de instrumentación. Hechas por los autores. 84

Figura 45. Proceso de detección de fugas. 86

Figura 46. Proceso de carga de refrigerante 88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores de impacto ambiental de diferentes refrigerantes [24]. 38

Tabla 2. Propiedades de refrigerantes de uso común en el sector doméstico [25]. 40

Tabla 3. Tiempos de conservación de alimentos a diferentes temperaturas [27] 43

Tabla 4. Rangos de trabajo del sistema de refrigeración. 60

Tabla 5. Cuadro de selección de instrumentación. 63

Tabla 6. Descripción de componentes internos de la nevera, mostrados en la Figura 31. 73

Tabla 7. Descripción de los componentes del panel de instrumentación. 76

Tabla 8. Descripción de los componentes del panel de instrumentación. 85

Tabla 9. Coeficientes para el cálculo del rendimiento del compresor del refrigerador domestico 93

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS OPCIONES DE INSTRUMENTACIÓN EVALUADAS 102

ANEXO 2. MANUAL DE USO DEL SOFTWARE SITRAD 105

ANEXO 3. INFORME ESPERADO DE LA PRÁCTICA DE REFRIGERACIÓN 117

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el ánimo de incentivar a los estudiantes a aprender conceptos básicos de termodinámica y refrigeración domestica como una aproximación inicial a sistemas industriales más complejos, gracias a un equipo didáctico construido a partir de modificaciones de un refrigerador doméstico.

En este trabajo se presentan antecedentes para comprender la refrigeración y su evolución, y se muestran los principales conceptos para entender los sistemas de refrigeración por compresión de vapor.

Para la construcción del equipo didáctico se hace una selección de las variables termodinámicas de mayor interés en la evaluación de un ciclo de refrigeración y se identifican los principales componentes de un sistema de refrigeración doméstica.

Previo a las modificaciones del refrigerador se realizan una modelación en CAD del equipo para conocer con certeza las principales modificaciones; se realizan los diagramas de control y proceso y los diagramas eléctricos, también se hace la selección de la instrumentación adecuada para la medición de las variables termodinámicas más relevantes.

Se realizan las modificaciones en el equipo y se procede con revisiones de seguridad para el posterior arranque del equipo, a continuación se hacen los procesos debidos de carga de refrigerante y configuraciones de los sensores e indicadores.

Finalmente se realiza una guía de laboratorio que permita a los docentes y estudiantes realizar una práctica de refrigeración en el equipo didáctico.

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Estudios del consumo eléctrico en el sector residencial realizados por la Unidad de Planeación Minero Energética UPME han mostrado que para ciudades grandes, un alto porcentaje de las neveras tienen más de 10 años de uso y que para hogares que usan gas natural para la cocción de alimentos, la nevera es el electrodoméstico que presenta el mayor consumo de energía eléctrica, en promedio un poco más del 30 % [1].

Teniendo en cuenta este escenario y con el objetivo de continuar aportando a la formación de personal capacitado en el tema de refrigeración mediante el mejoramiento de la infraestructura del laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la Universidad Pontificia Bolivariana se pretende realizar la construcción de un equipo de refrigeración didáctico a partir de un equipo doméstico comercial.

La Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con un Laboratorio de Refrigeración y Aire Acondicionado que hace parte del plan curricular de Ingeniería Mecánica; dada la importancia de la refrigeración en la vida cotidiana se ha planteado la necesidad de enseñar a los futuros ingenieros con equipos reales que permitan una interacción mayor y más efectiva con los mismos.

Por lo tanto, este trabajo plantea modificar un equipo de refrigeración doméstico real con el fin de hacerlo didáctico; que permita a los estudiantes entender claramente su funcionamiento, conocer en detalle la configuración de subsistemas, zonas críticas de la línea de refrigeración y los equipos necesarios para monitorear las variables que intervienen en el proceso.

JUSTIFICACIÓN

La realización de este trabajo ofrecerá una herramienta académica muy importante; este equipo brindará a los estudiantes las herramientas necesarias para mejorar el entendimiento, la comprensión y análisis de los fenómenos físicos en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, específicamente en el área doméstica.

Con la construcción del equipo se busca que los estudiantes egresados del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana tengan un mejor desempeño en el área de refrigeración y acondicionamiento de aire; además este equipo podrá ser utilizado con fines de profundización, bien sea en trabajos de grado o en proyectos de investigación.

El equipo didáctico acompañado de las clases magistrales darán a conocer la importancia de la refrigeración doméstica a nivel académico, además de la necesidad de buscar el mejor desempeño de estos equipos mediante la evaluación de su consumo energético.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar la construcción e instrumentación de un equipo de refrigeración didáctico, a partir de una nevera doméstica comercial, para la enseñanza en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Objetivos específicos

- Realizar el diseño conceptual de un equipo de refrigeración doméstico didáctico.
- Identificar las principales variables de interés docente del sistema de refrigeración.
- Seleccionar las partes necesarias para la instrumentación y monitoreo de las variables del equipo de refrigeración doméstico, didáctico.
- Definir las modificaciones necesarias para la instrumentación del equipo.
- Modelar el equipo de refrigeración didáctico y las modificaciones necesarias para la instalación de la instrumentación del sistema en CAD.

- Dibujar los diagramas de proceso e instrumentación del equipo de refrigeración didáctico.
- Convertir un equipo de refrigeración doméstico en una unidad didáctica.
- Realizar una guía de laboratorio para el equipo de refrigeración didáctico.

CAPÍTULO 1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Historia

La historia de la refrigeración se remonta a miles de años atrás, donde los pueblos de la India conservaban sus productos y generaban frio a través de procesos como el enfriamiento evaporativo, enfriamiento nocturno, enfriamiento mediante soluciones salinas; siendo todos estos procesos naturales, es decir, sin intervención mecánica.

Enfriamiento nocturno: El enfriamiento nocturno consiste en colocar una delgada capa de agua sobre una bandeja o recipiente y exponerlo a cielo abierto, allí se genera un flujo de calor por radiación a la estratosfera debido a que la temperatura de ésta es de aproximadamente -55 °C, así el agua pierde calor hasta congelarse en las primeras horas de la mañana. La temperatura que puede alcanzar el agua está delimitada por factores como nubosidad y velocidad del viento, además de la distancia a la que esté(n) ubicada la(s) bandeja(s) de las construcciones y los árboles [2].

Enfriamiento evaporativo: El enfriamiento evaporativo es una técnica que se ha usado por siglos y que aún está vigente en países como India. Esta técnica consiste en almacenar agua en recipientes de barro, el agua penetra a través de los poros del barro hacia la superficie exterior donde pierde su calor latente en parte por el recipiente de barro y en parte por el contacto con el aire haciendo que se evapore; por tal motivo, se enfrían las paredes del recipiente y éstas a su vez enfrían el contenido de agua [2].

Enfriamiento por soluciones salinas: El enfriamiento mediante soluciones salinas se da por medio de la disolución de alguna sal en agua. La sal por sus propiedades, es capaz de absorber el calor de la solución lo que enfría el agua. Con cloruro de sodio se podrían alcanzar temperaturas cercanas a -20 °C. Si se requiere que la sal sea recuperada para que el proceso sea cíclico, esto implica que el agua debe ser evaporada y por tanto requiere de cierta cantidad de energía.

Además de estos procesos, se aprovechaban las condiciones estacionales para almacenar el hielo producido en temporadas de invierno en las llamadas casas de hielo o

bodegas de hielo (*icehouses)*, muy comunes en Irán, Europa y Norteamérica. Allí, se almacenaba el hielo y se comercializaba mediante transporte marítimo a otros países, convirtiéndose en un gran negocio para la época [2]

En el año 1809 se construye el primer refrigerador doméstico. Este lo constituían una caja de cedro aislada con piel de conejo y envuelta en una hoja metálica y un cubo de hielo. El cubo de hielo estaba ubicado en la parte superior de manera que el aire frio y denso descendiera y se formara una circulación natural de aire; además, este refrigerador tenía un sistema de goteo para evacuar el hielo fundido. Este refrigerador tenía principalmente dos problemas: el hielo debía ser reemplazado cada cierta cantidad de tiempo y la temperatura estaba limitada por la cantidad de hielo. Esto comenzó a tener un impacto en la sociedad, sobretodo en el sector agrícola, ya que los cultivadores no tenían que caminar en la noche hacia el mercado para mantener sus productos, además estos se conservaban por más tiempo y abrió mercados para productos como la leche y sus derivados; además los consumidores no se tenían que desplazar con tanta frecuencia al mercado para conseguir productos frescos. Pese a los problemas que presentaba este tipo de refrigerador, fue usado sin tener mayores alteraciones durante aproximadamente 150 años [3].

También a principios del siglo XIX, el llamado rey del hielo *Frederic Tudor* hizo toda una fortuna alrededor del negocio de la comercialización del hielo, convenciendo a los dueños de bares de que sirvieran sus bebidas con hielo, comenzó a comercializarlo a gran escala después de algunos tropiezos con su negocio. Todo comenzaba con cortar el agua congelada de grandes lagos, se obtenían cubos de tamaños similares que luego eran transportados mediante embarcaciones al Caribe, Europa e incluso India donde se vendían a alto costo, tanto así que el hielo era considerado en algunas partes un artículo de lujo [2].

Refrigeración por medios mecánicos: En cuanto a la refrigeración mecánica, durante el siglo XIX, numerosas personas y científicos trataron de diseñar refrigeradores mecánicos, es decir, que operaran con un dispositivo que generara un aumento de presión en el fluido de trabajo, todos obedecían al principio de licuefacción y posterior evaporización de un gas. Los primeros refrigeradores resultaron ser de gran tamaño y funcionaban con

amoniaco y debido a su toxicidad solo se utilizaban en procesos industriales de producción de hielo.

Se debió esperar hasta 1911 para usar el refrigerador mecánico en el hogar, cuando General Electric® presentó un refrigerador casero inventado por un monje francés, pocos años después se incorporaron los modelos Kelvinator® y Servel®. En estos refrigeradores, el compresor era impulsado por un motor mediante bandas, luego se presentaron unidades más compactas con control automático en la década de los años 20's.

La producción en masa de los refrigeradores domésticos comenzó después de la segunda guerra mundial, hasta allí los esfuerzos se habían concentrado en buscar una sustancia de trabajo menos peligrosa, y cuyos frutos fue la implementación del gas freón como refrigerante [4].

Hoy en día, el refrigerador es el electrodoméstico más usado en el mundo, y como vemos ha cambiado los hábitos alimenticios y el estilo del vida desde hace muchos siglos, permitiendo el desarrollo de numerosos sectores industriales, el mejoramiento de las condiciones de vida y una gran contribución al sector de la salud, los esfuerzos (como en el siglo anterior) aún se concentran en disminuir el impacto de las sustancias de trabajo en el medio ambiente, así como la construcción de equipos más eficientes para disminuir el consumo energético.

1.1.2 Refrigeración por compresión de vapor

El sistema de refrigeración por compresión de vapor es el más usado [5], [6], por la facilidad de los líquidos para absorber calor en la medida que se evaporan, la facilidad de construcción y su costo.

La refrigeración por compresión de vapor opera en un ciclo, ver Figura 1, en su forma más simple está compuesto por un compresor, un condensador, un evaporador y una válvula de expansión.

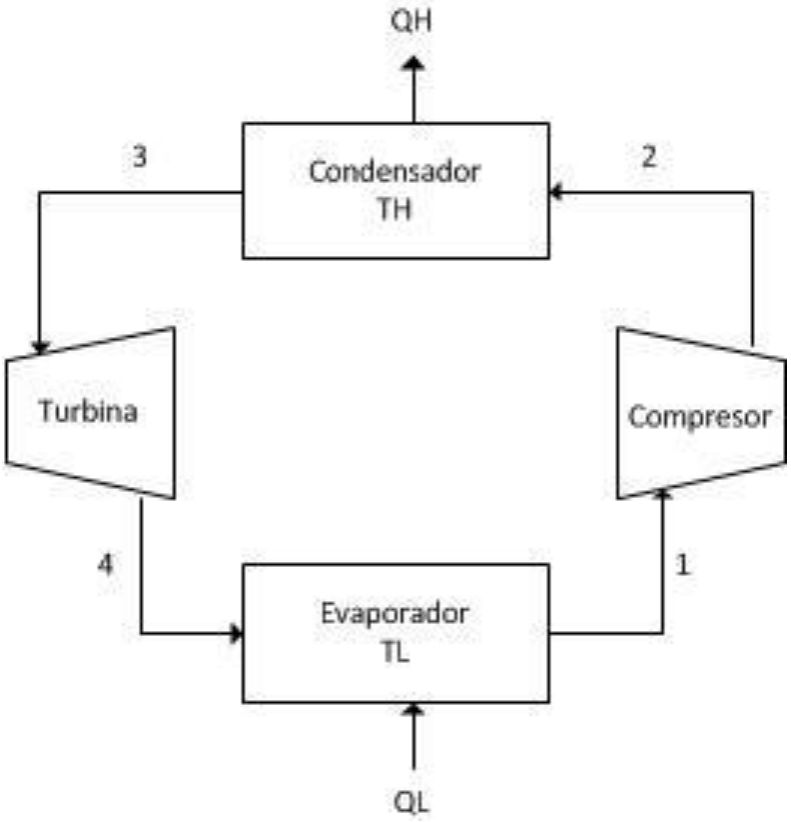


Figura 1. Ciclo de refrigeración de Carnot por compresión de vapor. Hecha por los autores.

1.1.3 Componentes del sistema de refrigeración por compresión de vapor

- *Compresor*

El compresor tiene como función llevar el gas refrigerante del estado de baja presión al de alta presión usando energía eléctrica externa, debido a las pérdidas y la eficiencia del motor, la energía que se transfiere al gas es menor a la entregada al compresor [7].

Se eligen teniendo en cuenta principalmente las presiones y caudales requeridos por el proceso, para refrigeración doméstica es común encontrar el uso de compresores herméticos, pero se pueden encontrar diferentes tipos como los compresor de pistón, compresor de tornillo, turbocompresores radiales, compresores tipo *scroll*, a su vez se pueden clasificar en compresores herméticos y semiherméticos [8].

Compresores herméticos: En ese tipo de compresores el motor y el compresor están contenidos en una misma estructura que es soldada al momento de la fabricación del

compresor. El único acceso que se tiene a este compresor es mediante el corte de la estructura, por lo cual cualquier servicio que requiera el compresor, debe ser hecho por personal especializado. Por lo general tienen un sistema de lubricación por presión pero los compresores de menor capacidad tienen lubricación por 'splash'. Su rango de aplicación es bastante amplio, ya que son usados desde pequeños sistemas domésticos hasta sistemas con potencias de 50 HP. Son ampliamente utilizados en sistemas de refrigeración domestica debido a su bajo costo y al poco ruido que produce.

Figura 2. Compresor hermético alternativo [9].

Compresores semiherméticos: Al igual que en los compresores herméticos, en los compresores semiherméticos el motor y el compresor están bajo una misma estructura, con la diferencia que en los semiherméticos se puede acceder al interior retirando los tornillos de fijación, motivo por el cual son más fáciles de reparar y no requieren mano de obra muy especializada. Por lo general estos compresores son enfriados por aire, por lo cual se les reconoce por las aletas que rodean su estructura para darles más área superficial y por tanto aumentan la tasa de enfriamiento. Se fabrican en potencias superiores a dos caballos de fuerza (HP), por lo que su uso en refrigeración doméstica es muy reducido, además de su alto costo [10].

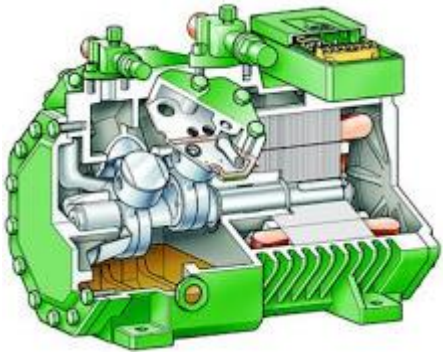


Figura 3. Compresor semihermético [11].

- *Condensador*

El condensador es un intercambiador de calor, su función principal es expulsar el calor, que se transfiere de las cargas térmicas al evaporador, en un sumidero de calor (generalmente el medio ambiente o agua), dentro del condensador el refrigerante cambia de un estado de alta presión y alta temperatura a un estado de alta presión y baja temperatura, en ciclos ideales líquido saturado, en condiciones reales es un líquido subenfriado.

Los condensadores se clasifican de acuerdo a diversos parámetros, según el medio condensante y su capacidad, pero principalmente los condensadores se clasifican según su forma constructiva y según su fluido de trabajo.

Según su forma constructiva se encuentran dos tipos de condensadores:

Condensador de tubo con aletas: Están formados por un serpentín y aletas espaciadas entre sí. El intercambio de calor se produce entre el fluido y el serpentín y entre el serpentín y sus aletas, razón por la cual aumenta considerablemente el área de transferencia de calor y por tanto el flujo de calor hacia el sumidero es mayor. Aunque su rango de aplicaciones es mayor comparado con un condensador de tubo liso, los condensadores de tubos con aletas también son mayormente utilizados en equipos de baja capacidad, como equipos de refrigeración doméstica.

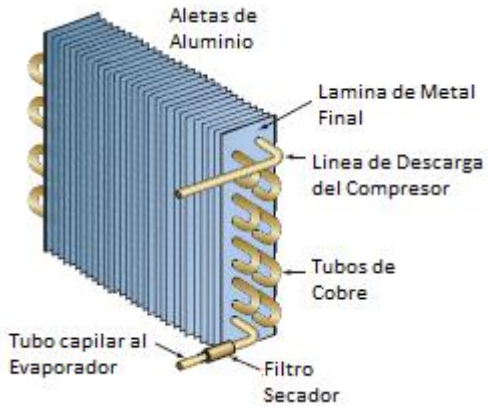


Figura 4. Condensador de tubo con aletas Modificado de [12].

También se clasifican por el fluido de trabajo y su régimen:

Condensador de flujo natural: Su uso se limita a sistemas de muy baja potencia y suelen funcionar con convección natural, razón por la cual se debe respetar cierta distancia entre la parte posterior del condensador y las paredes, de no ser así, la temperatura de condensación aumentaría, reduciendo la eficiencia del equipo, y por tanto, la eficiencia global del sistema de refrigeración, son también llamados condensadores estáticos, son condensadores con velocidad de aire demasiado lenta, por lo cual se suele acumular suciedad. Por lo general son de grandes longitudes y su uso se limita a refrigeradores domésticos.

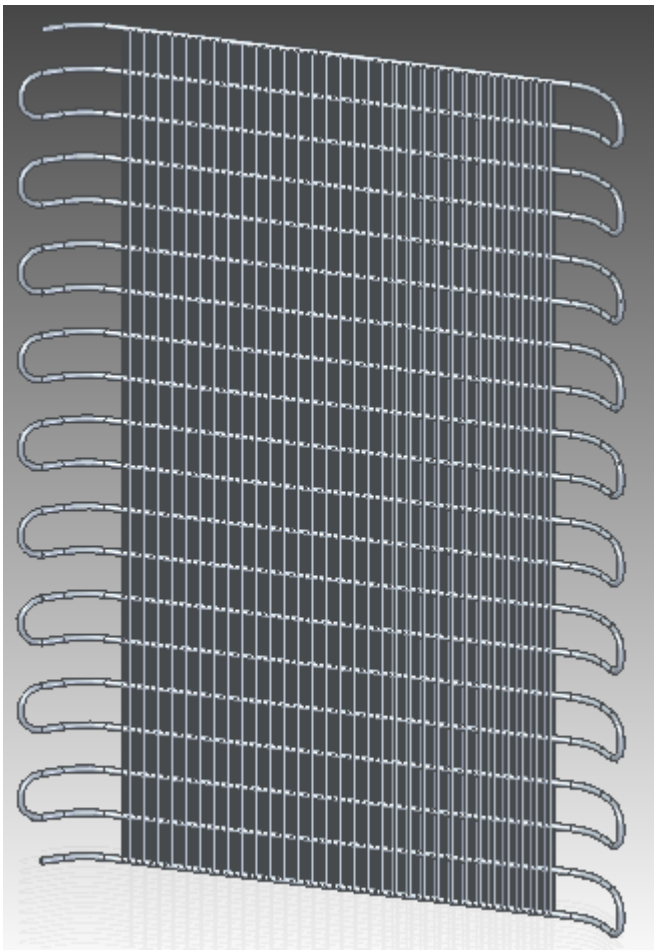


Figura 5. Condensador de tiro natural. Hecha por los autores.

Condensador de flujo forzado: son condensadores que utilizan ventiladores con el fin de aumentar la velocidad del aire, esto causa que aumente el coeficiente de convección y la transferencia de calor hacia el medio circundante sea mayor. Estos condensadores requieren menos área de transferencia de calor si son comparamos con uno de flujo natural. Su rango de aplicaciones suele ubicarse entre sistemas de baja y media capacidad [13].

- *Dispositivo de expansión*

Las funciones del dispositivo de expansión son dos principalmente: la primera es reducir la presión hasta que alcance el valor necesario para que el refrigerante evapore a bajas temperaturas y la segunda es controlar el flujo másico del sistema de refrigeración de

acuerdo con los criterios para los que esté diseñado. De acuerdo con las cargas y las condiciones de funcionamiento de los sistemas de refrigeración, se encuentran numerosos dispositivos de expansión, los más destacados son:

Tubo capilar: El tubo capilar es un dispositivo de expansión que controla el flujo de refrigerante mediante la caída de presión por cambio de área, este tubo está construido en cobre y los parámetros que determinan que tanto flujo de refrigerante pasa por éste son el diámetro interno y la longitud, produciendo una determinada caída de presión. Este dispositivo no controla el sobrecalentamiento o la caída de presión, es decir, solo trabaja en la condición para la que fue diseñado. Su uso es limitado y su aplicación es en las instalaciones de baja capacidad como refrigeradores domésticos.

Figura 6. Tubo Capilar [14].

Válvula de expansión automática: Este dispositivo de expansión controla el flujo de refrigerante hacia el evaporador por medio de un diafragma que censa de presión, es una válvula en la que cambia la dimensión interna en respuesta a la presión medida. La característica más importante de las válvulas de expansión automáticas es que mantienen una presión constante en el evaporador ya que tienen un lado del diafragma hacia el evaporador y el otro lado hacia el entorno o sistema de ajuste como se ve en la Figura 7; si se presenta algún cambio de presión en el evaporador, la válvula cambia de posición y varia el flujo de refrigerante.

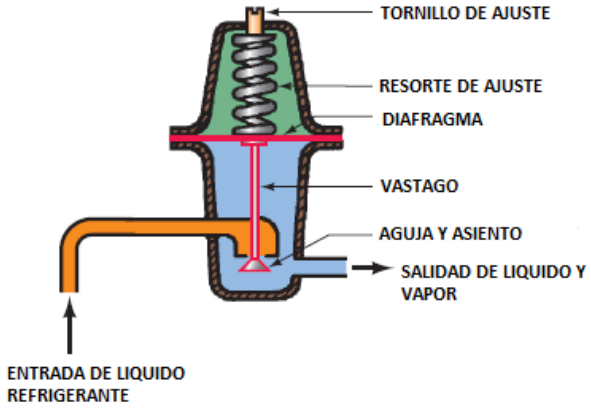


Figura 7. Válvula de expansión automática. Modificada de [12]

Válvula de expansión termostática: La válvula de expansión termostática regula el flujo de refrigerante usando un medidor de temperatura para monitorear el sobrecalentamiento, operando así en función de este elemento térmico. Éste dispositivo de expansión mantiene el sobrecalentamiento constante en el evaporador. El sobrecalentamiento en pequeñas proporciones es necesario para evitar daños en el compresor; el sobrecalentamiento recomendado para los evaporadores es el siguiente [12]:

- Evaporadores de alta temperatura: entre 10 y 12 °C
- Evaporadores de media temperatura: entre 5 y 10 °C
- Evaporadores de baja temperatura: entre 2 y 5 °C

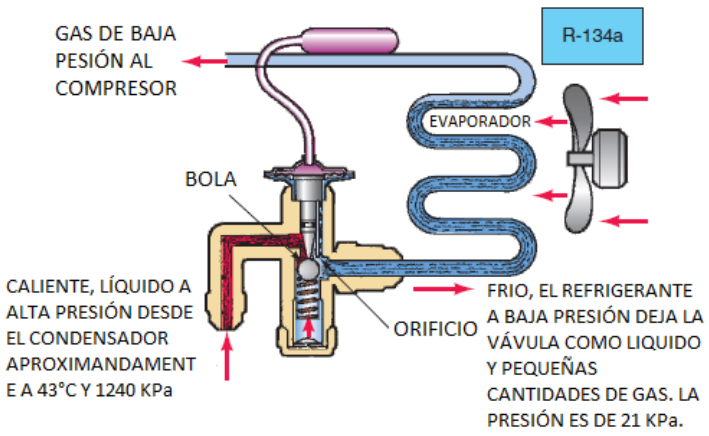


Figura 8. Ilustración de una válvula de expansión termostática. Modificada de [12].

Válvulas de expansión electrónica: Existen varios tipos de válvulas de expansión electrónica, el tipo de válvula varía de acuerdo a la construcción y al funcionamiento.

El primero es la válvula de expansión electrónica modulada en pulsos variables por medio de un control electrónico; el tipo de válvula es solenoide, es decir solo funciona ON – OFF, pese a que solo está totalmente abierta o cerrada, regula el flujo de refrigerante de acuerdo al tiempo que permanece abierta o cerrada. Otro tipo de válvula de expansión electrónica es la llamada 'Heatmotor valve', en ésta, la operación se controla mediante dos sensores que miden la energía suministrada en el actuador de la válvula, en estas se puede controlar el sobrecalentamiento requerido mediante un potenciómetro. En caso de que el sobrecalentamiento no sea igual al requerido, el controlador envía una señal para que la válvula opere, bien sea abriéndose o cerrándose [10].

Figura 9. Válvula de expansión electrónica [15].

- *Evaporador*

Son equipos fabricados con materiales que poseen alta conductividad térmica y áreas superficiales extendidas para mejorar la transferencia de calor. Es el encargado de contener el refrigerante como líquido a baja presión y baja temperatura, las condiciones de alta temperatura del recinto a enfriar y las propiedades del refrigerante generan una evaporación del fluido de trabajo a baja presión, este equipo es el encargado de la producción de frio dentro del sistema [16].

Entre los principales tipos se encuentran los siguientes:

Evaporadores secos: En este tipo de evaporadores no hay presencia de fluido refrigerante en estado líquido ya que éste se expande directamente en la válvula de expansión, alcanzando rápidamente el estado de vapor [17].

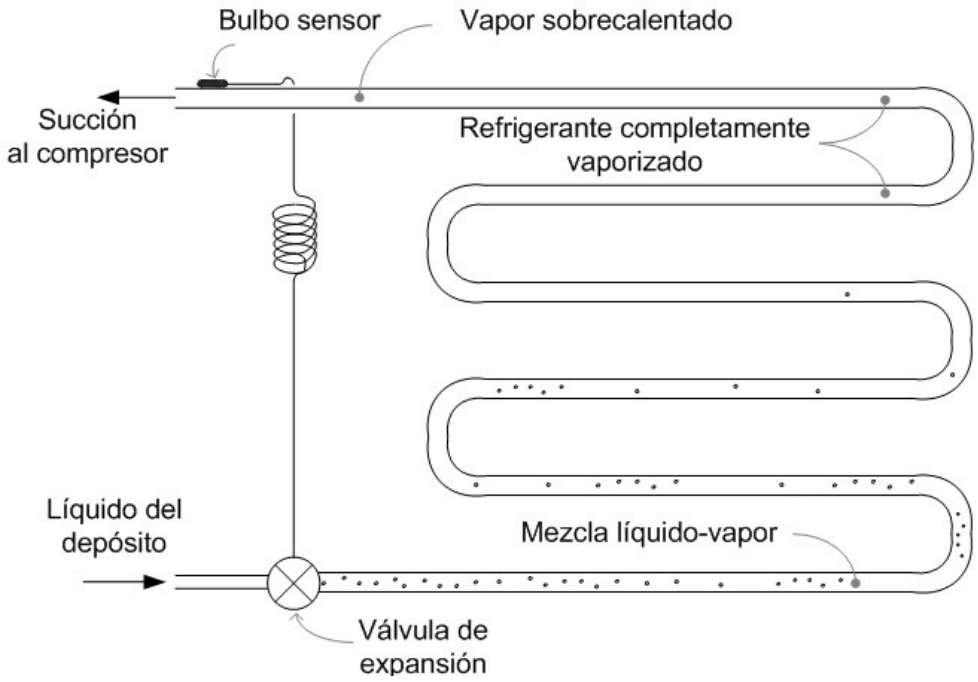


Figura 10. Esquema de evaporador seco o de expansión directa [18].

Los evaporadores en refrigeradores domésticos pueden ser de dos tipos, de tiro natural o de tiro forzado. Los evaporadores de tiro forzado tienen un ventilador que aumenta la eficiencia y permite que desde la parte constructiva, el evaporador sea más compacto. Sin embargo, otros refrigeradores son fabricados con evaporadores de tiro natural debido su bajo costo y su facilidad de construcción.

Evaporadores roll bond: Estos evaporadores desde su forma constructiva constan de una placa plana (en su gran mayoría de aluminio) con conductos de refrigerante estampados al interior de la placa. Son efectivos desde el punto de vista de la transferencia de calor, pero requieren que los productos estén en contacto directo con la placa.

Los evaporadores tipo roll bond son visibles y por tal motivo están sujetos a mal trato por parte de los usuarios, sobre todo a la hora de su descongelamiento. En su gran mayoría,

éste tipo de evaporadores están diseñados para que su descongelamiento sea manual, lo cual requiere que el equipo esté apagado. El hielo adherido al evaporador es derretido por la temperatura del aire ambiente y el agua se recolecta en una bandeja ubicada en la parte baja del compartimento de congelación.

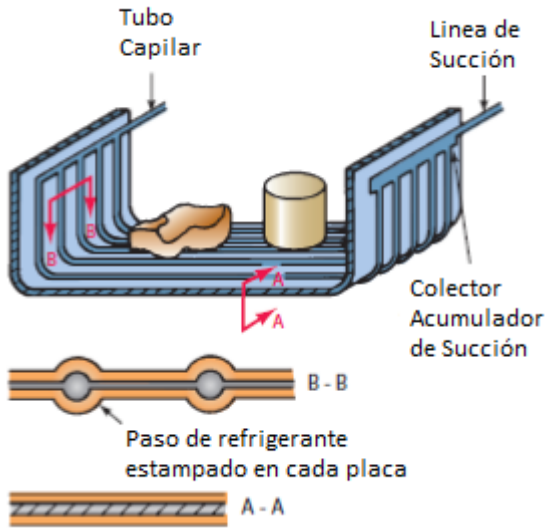


Figura 11. Evaporador roll bond. Modificada de [12].

Evaporadores de tubo con aletas: Un evaporador de tubo con aletas consiste en un serpentín sobre el cual se ubican unas finas aletas de aluminio con el fin de aumentar el área efectiva de transferencia de calor. Al igual que los evaporadores de placa y tubo, éstos evaporadores están fabricados en su gran mayoría en aluminio. Estos evaporadores requieren de una corriente de aire que no es natural, por lo tanto van acompañados de un ventilador que hace pasar corrientes de aire a través del fino espacio entre sus aletas. Los evaporadores que operan a más baja temperatura tienen un espaciado mayor entre aletas a los de temperatura media con el fin de permitir que se forme la película de hielo y que aun así exista un flujo de aire considerable. El ventilador incrementa la eficiencia del evaporador, lo cual le permite ser más compacto y así tener más espacio disponible para el almacenamiento de productos al interior del refrigerador. Tanto el ventilador como el evaporador están generalmente empotrados al chasis de la nevera y no expuesto, a diferencia de los evaporadores roll bond. Este tipo de evaporadores no requieren mantenimiento y no poseen filtros de aire.

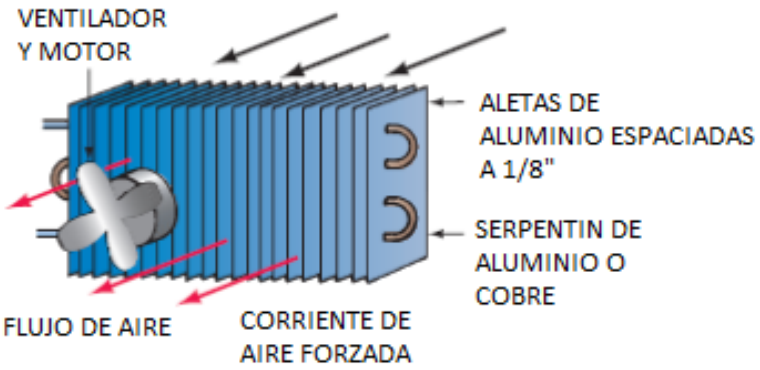


Figura 12. Evaporador de tubo con aletas. Modificada de [12].

Todos los componentes mencionados, así como sus tipos hacen parte de los equipos de refrigeración doméstica, dependiendo del tipo de refrigerador y su capacidad de enfriamiento y almacenamiento pueden estar compuestos por subsistemas más o menos complejos.

1.1.4 Refrigeración doméstica

La refrigeración doméstica está limitada a refrigeradores y congeladores caseros, pero la cantidad de estos equipos genera que una parte muy importante de la industria de la refrigeración esté dedicada al sector doméstico [19].

Los sistemas domésticos son de tamaño reducido, lo que requiere bajas potencia, entre 0.0373 kW y 0.373 kW (1/20 hp y 1/2 hp), por lo cual los compresores herméticos son de uso generalizado en el sector doméstico y sus principales características son su tamaño compacto, bajo nivel de ruido y bajo costo [16], [19].

Para equipos pequeños, donde la carga térmica es constante, como se da en los equipos de refrigeración y aire acondicionado domésticos, el dispositivo de regulación más común es el tubo capilar, por su simplicidad de funcionamiento y costo [20].

En refrigeración doméstica se usan, en muchos casos, condensadores pequeños enfriados por aire y convección natural, los cuales son fabricados con serpentines de

acero y aletas de alambre de acero, el acero es usado por el costo comparativo con el cobre y la resistencia a altas presiones [16].

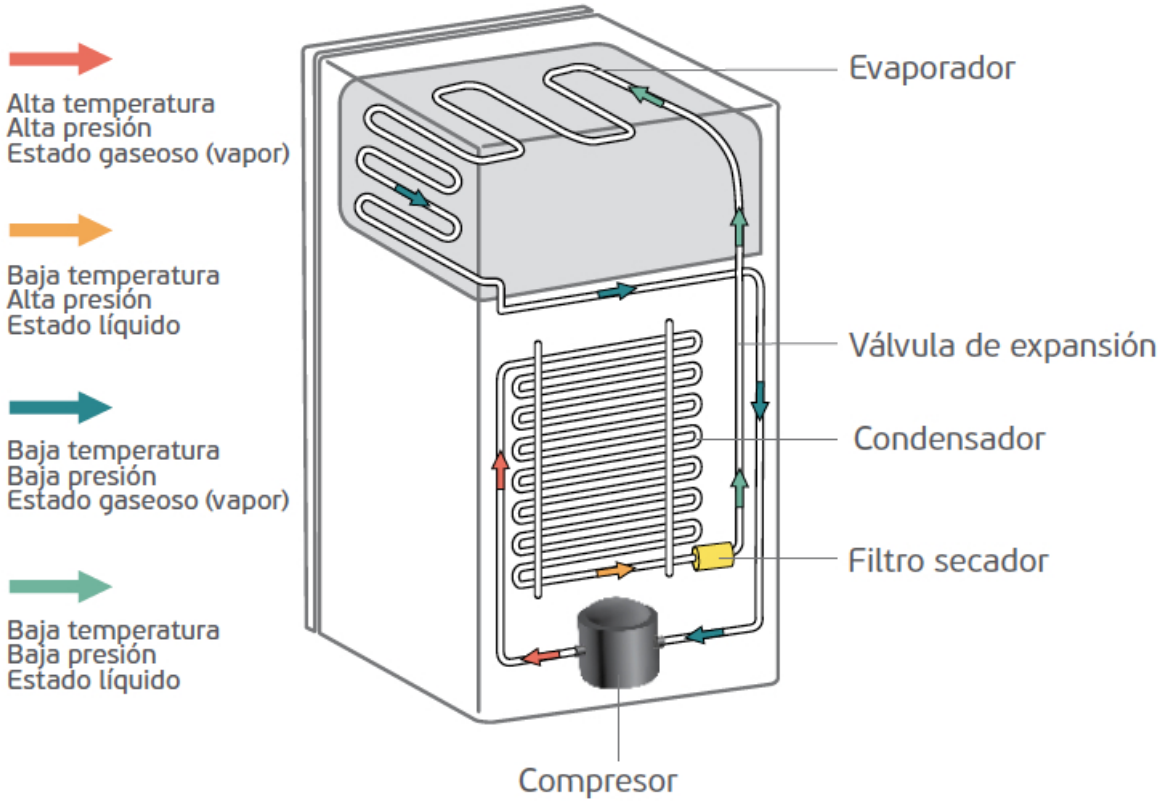


Figura 13. Esquema de un refrigerador doméstico [21].

En refrigeración doméstica hay muchas configuraciones en las cuales varían la cantidad de puertas de acceso, la ubicación del congelador y el conservador, en configuraciones lado a lado o “side by side” la nevera está dividida verticalmente y tiene una puerta de acceso para el congelador y otra puerta de acceso para el conservador como se puede ver en la Figura 14, otras neveras solo tienen una puerta de acceso y el congelador y la puerta de este están al interior, otras configuraciones cuentan con dos accesos, arriba, y abajo y el congelador puede estar arriba o abajo (ver Figura 15).

Figura 14. Arreglo típico de refrigeradores lado a lado o "side by side" con congelador al lado izquierdo, donde también se ubica el dispensador de hielo y agua [22].

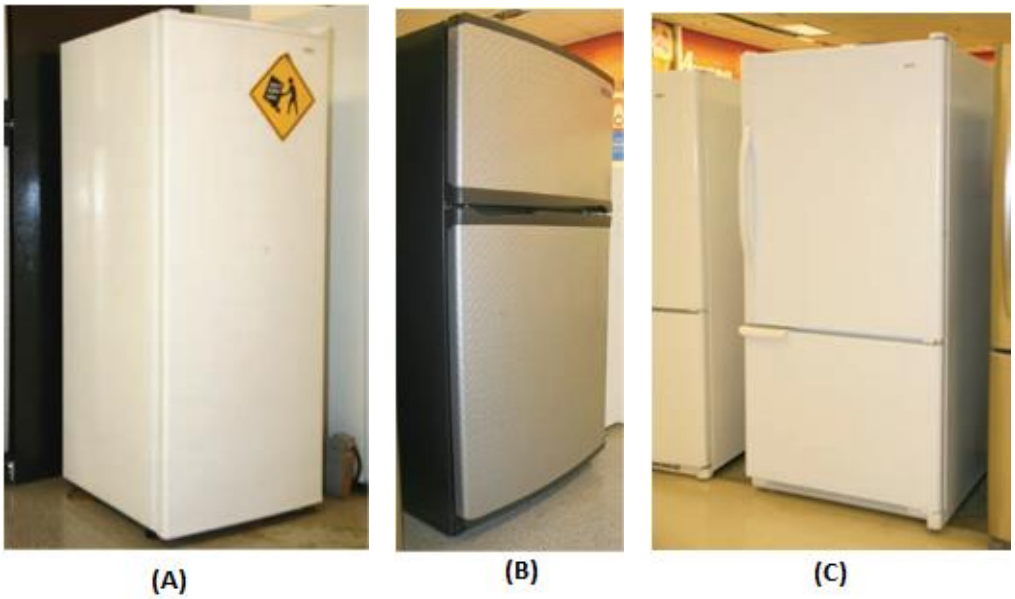


Figura 15. Arreglos de refrigeradores con puerta simple y con puerta arriba y abajo: (A) refrigerador de puerta simple con congelador interno con puerta propia, (B) refrigerador con puerta arriba y abajo con congelador superior, (C) refrigerador con puerta arriba y abajo con congelador en el fondo. Modificada de [12].

Todos los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, incluyendo los sistemas de refrigeración domestica requieren de una sustancia que transporte la energía (calor) de un lugar a otro dentro del circuito de refrigeración; a esta sustancia se le llama agente refrigerante y su selección radica principalmente en temas de normativas ambientales, propiedades térmicas y termodinámicas y capacidad del equipo.

1.1.5 Refrigerantes

Un refrigerante o agente de enfriamiento es aquella sustancia utilizada para absorber calor de un medio. Los procesos de enfriamiento pueden clasificarse como sensibles o latentes de acuerdo al efecto que tiene el calor absorbido sobre el refrigerante. Cuando el calor absorbido aumenta la temperatura del refrigerante, el proceso de enfriamiento es sensible, por otra parte, cuando el calor absorbido cause en el refrigerante un cambio en su estado físico, se dice que el proceso de enfriamiento es latente. En un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante es el fluido de trabajo que alternativamente se vaporiza y se condensa absorbiendo y cediendo calor, respectivamente.

Para los ciclos de refrigeración no existe un refrigerante ideal debido a la gran cantidad de aplicaciones y condiciones en los que estos operan, solo un refrigerante se acercará a ser un refrigerante ideal si sus propiedades satisfacen las condiciones y necesidades de la aplicación en la cual va a ser utilizado [19].

- *Propiedades físicas y termodinámicas.*

Presión de vapor: La presión de vapor debe ser ligeramente superior a la presión atmosférica para evitar la introducción de aire y aporte de humedad.

Presión de condensación: La presión de condensación no debe ser muy elevada para que los elementos del sistema requieran menos resistencia mecánica, haciéndolos menos robustos y compactos; además no debe estar cercana a la presión critica del refrigerante con el fin de facilitar su condensación.

Temperatura de solidificación: La temperatura de solidificación debe estar por debajo de la temperatura de trabajo del refrigerante.

Relación de compresión: Esta relación debe ser pequeña en condiciones de trabajo debido a que la eficiencia volumétrica varía de manera inversa con la relación de compresión.

Calor latente de vaporización: Exceptuando los sistemas de baja potencia, es recomendable un alto calor latente debido a que será mayor la producción especifica de frio, además los sistemas requieren menor flujo másico y permite utilizar equipos más compactos con menos consumo de potencia.

Calor específico: En fase líquida el calor específico debe ser bajo, por el contrario, en fase de vapor, el calor específico debe ser alto. Esta característica incrementa el rendimiento del sistema.

- *Propiedades químicas*

Comportamiento frente a la humedad: La presencia de pequeñas cantidades de agua en los circuitos de refrigeración es inevitable, sin embargo para el correcto funcionamiento se requiere que las cantidades de humedad se encuentren por debajo de los niveles nocivos para los componentes del sistema. El nivel máximo admisible en un circuito de refrigeración depende del tipo de refrigerante, aceite lubricante y temperaturas de trabajo del sistema; se conocen como valores máximos de agua 1% para amoniaco y 0,0025% para fluidos halogenados.

La combinación del agua con el fluido de trabajo en los circuitos de refrigeración puede originar la formación de compuestos corrosivos que pueden reaccionar con el aceite, los materiales y equipos del sistema. El agua también puede estar presente como ‘agua libre’ y en puntos de temperaturas iguales o inferiores a 0°C puede transformarse en hielo, reduciendo el rendimiento del sistema y bloqueando el dispositivo de expansión.

Comportamiento frente a los materiales: Cualquier material empleado en equipos de refrigeración debe ser resistente a la acción de las materias con las que entre en contacto. Los refrigerantes no atacan directamente a los materiales usados en los circuitos de refrigeración, sin embargo la presencia de agua los hace corrosivos en ciertas condiciones. En refrigeración doméstica, las redes de los circuitos de refrigeración son generalmente de cobre, cuyos refrigerantes prohibidos son el amoniaco y el formiato de

metilo. Las aleaciones de cobre pueden utilizarse después de un examen de compatibilidad.

Relación refrigerante – aceite: En condiciones de trabajo normales, los refrigerantes se muestran estables frente a los aceites lubricantes, sin embargo, por la presencia de aire y humedad, las reacciones entre el aceite y el refrigerante pueden cambiar y generar problemas como: formación de lodos y ácido, corrosión en la tubería y depósitos de cobre.

Dependiendo de la miscibilidad del aceite lubricante con el fluido refrigerante, se pueden separar en tres grupos: totalmente miscibles en las condiciones de trabajo del sistema, miscible en el condensador con reducción en el grado de mezcla en el evaporador y no miscible.

Con los refrigerantes que presentan cierto grado de miscibilidad, el aceite tiende a separarse en las zonas frías, en el evaporador y en zonas donde el refrigerante este en fase líquida; en estos casos es recomendable la instalación de separadores de aceite en las zonas de descarga con el fin de reducir la circulación de aceite en el sistema.

- *Características de seguridad*

Para que un fluido tenga un uso apropiado como refrigerante, éste debe ser químicamente inerte hasta el grado de no ser inflamable, con algunas excepciones como el isobutano, con el que se debe tener un manejo más cuidadoso, no debe ser explosivo ni toxico tanto en su estado puro como cuando tienen cierta porción de humedad; por esta razón el amónico es usado como refrigerante indirecto en sistemas donde hay personas, además, para que se considere seguro, el refrigerante no debe reaccionar desfavorablemente con los materiales usados en el equipo de refrigeración o con el aceite lubricante. El fluido refrigerante no debe contaminar de ninguna manera los productos alimenticios u otros productos almacenados en caso de que se presente fugas en el sistema.

Toxicidad: La toxicidad es una característica de una sustancia que la hace nociva o letal para personas o animales debido a la exposición intensa o prolongada por cualquier medio, bien sea inhalación, ingestión o contacto. Los fluidos refrigerantes pueden causar

sofocación cuando se tienen en grandes concentraciones, evitando tener el oxígeno suficiente para sustentar la vida.

Según su toxicidad, los refrigerantes se clasifican en dos grandes grupos:

Grupo A: Refrigerantes cuya concentración no tiene efectos adversos en la mayoría de las personas que puedan estar expuestas a éste durante una jornada de 8 horas diarias y 40 horas semanales y cuya concentración media es igual o mayor a 400 ml/m^3 (400 ppm).

Grupo B: Refrigerantes cuya concentración no tiene efectos adversos en la mayoría de las personas que puedan estar expuestas a éste durante una jornada de 8 horas diarias y 40 horas semanales y cuya concentración media es inferior a 400 ml/m3 (400 ppm).

Inflamabilidad y explosividad: La mayoría de refrigerantes de uso común, no son inflamables o explosivos, excepto el amoniaco y algunos hidrocarburos, pero con las debidas precauciones, el riesgo disminuye notablemente; además, en algunas ocasiones las pequeñas cantidades de refrigerante representan un bajo riesgo cuando se utiliza en espacios relativamente grandes, donde no sea posible que se alcance un alto nivel de concentración. Cabe anotar que el manejo de estas sustancias solo se debe permitir a personal calificado en manipulación de sustancias inflamables y explosivas. Para evitar incendios o explosiones se deben tomar precauciones en caso de fuga, entre las que se encuentran la extracción, la ventilación y las alarmas [19].

- *Aspectos ambientales*

Como bien se sabe, la mayoría de refrigerantes de uso común tienen un fuerte impacto en el medio ambiente. Se suelen utilizar dos criterios muy importantes con el fin de medir el efecto de éstos en la atmosfera cuando no se manipulan de manera controlada.

(ODP) Ozone Depletion Potential ó (PAO) Potencial de Agotamiento de Ozono: es un número que mide la cantidad de ozono que destruye una sustancia en comparación con el CFC 11, gas refrigerante muy común en la última parte del siglo pasado. Gases refrigerantes como el R 134a, gas refrigerante más común de los sistemas de refrigeración doméstica, perteneciente al grupo de los HFCs (hidrofluorocarbonados) tienen un PAO nulo, debido a que no contienen cloro [23].

(GWP) Global Warming Potential ó (PCA) Potencial de Calentamiento Atmosférico: es un número que indica la cantidad de calentamiento global que causa una sustancia, al igual que PAO, es un número que compara, pero en este caso, con la cantidad de calentamiento global causado por el CO2 (con valor de 1). El PCA del refrigerante R 134ª tiene un valor de 1300, que si bien es considerable, es bajo respecto a otros refrigerantes de su clase, los cuales pueden llegar a tener valores PAO de hasta 5000 [24].

En la Tabla 1, se pueden encontrar los valores del potencial de calentamiento atmosférico y el potencial de agotamiento de ozono para algunos gases refrigerantes.

Tabla 1. Factores de impacto ambiental de diferentes refrigerantes [24].

Refrigerants	(ODP)	(GWP)
CFC12	0.9	8,500
HFC134a	0.0	1,300
HCFC22	0.05	1,700
R407C	0.0	1,370
CFC502	0.18	4,510
R404A	0.0	3,850
HFC125	0.0	3,200
HFC143a	0.0	4,400

- *Refrigerantes comunes en refrigeración doméstica*

En refrigeración domestica hay gran cantidad de agentes refrigerantes, los cuales tienen características propias, entre los más usados actualmente se encuentran el R134A y el R22, los cuales están siendo reemplazados en parte por el R600A ya que tiene menos efectos nocivos sobre el medio ambiente.

R134A: Es un refrigerante ampliamente usado en aplicaciones domésticas tanto en aire acondicionado como en refrigeración. Con un potencial de destrucción de capa de ozono de cero, fue diseñado para sustituir al R12 en la mayoría de aplicaciones, exceptuando las de congelación a temperaturas menores a -20°C. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la climatización de automóviles, refrigeración doméstica y comercial, además

es usado como agente soplador de espumas. Es compatible con lubricantes de éster de poliol y glicol.

R22: Es un refrigerante usado en aplicaciones de baja y media temperatura, es químicamente estable, no es inflamable ni tóxico. Es catalogado como una sustancia peligrosa para la capa de ozono, por lo tanto se prohibió su fabricación a partir del primero de enero de 2010, además su utilización es prohibida a partir del 2015 en algunos países.

R600A: Este refrigerante conocido como isobutano es un gas refrigerante natural que minimiza el daño ambiental causado por los CFC's. Es ampliamente usado en refrigeración doméstica en países europeos, especialmente en Alemania (porcentaje mayor a 90%). El R600A tiene características muy similares al R22 y al R134A, su principal diferencia radica en el nivel de presión, por ejemplo, a -25°C de temperatura de evaporación corresponde a un 55% de la presión del R134A. Es un refrigerante muy inflamable, por lo tanto está clasificado como una sustancia muy peligrosa.

En la Tabla 2. Propiedades de refrigerantes de uso común en el sector doméstico [25].Tabla 2 pueden verse algunas características importantes de los tres refrigerantes mencionados.

Tabla 2. Propiedades de refrigerantes de uso común en el sector doméstico [25].

Características de refrigerantes en refrigeración doméstica				
Propiedades	R22	R134A	R600A	Unidades
Descripción	Clorodifluorometano	Tetrafluoroetano	Isobutano	-
Fórmula Química	CHCIF2	CH2FCF3	(H3C)-CHCH3-CH3	-
Aplicación	Refrigeración a media y baja temperatura	Refrigeración doméstica, comercial e industrial	Refrigeración doméstica y comercial	-
Componentes	Puro	Puro	Puro	-
Temperatura de ebullición @ 101,3 kPa	-40,7	-26,1	-11,6	°C
Temperatura de congelación	-160	-96,6	-160	°C
Presión de vapor @25°C	1053	665,5	350	kPa
Inflamabilidad en el aire	Ninguna	Ninguna	Extremadamente inflamable	-
ODP	0,055	0	0	-
Clasificación de seguridad	A1	A1	G4	-
Lubricantes	Aceite mineral	Poliolléster	Aceite mineral	-
GWP	1500	1300	<10	-

CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN REFRIGERADOR DOMÉSTICO

En el diseño conceptual del equipo de refrigeración domestico se realiza una selección de las variables termodinámicas de interés que se van a medir en el circuito de refrigeración. Teniendo claro cuáles son las variables sujetas a medición, se debe conocer cuáles son sus valores o rangos típicos de operación en los equipos que pertenecen al circuito de refrigeración para que posteriormente en el diseño de detalle se realice una matriz de selección que guie la selección de los equipos de medición. Además, en el diseño conceptual se realiza una breve introducción a ciertos elementos que no pertenecen propiamente al circuito de refrigeración, pero que hacen que el equipo funcione correctamente y cumpla las funciones para las cuales fue diseñado. Por último, se mencionan las nuevas tecnologías aplicadas a la refrigeración doméstica, que hacen que estos equipos funcionen de una manera más eficiente, reduciendo su consumo eléctrico, que como se ha mencionado anteriormente, alcanza un gran porcentaje del consumo energético total en hogares.

2.1 VARIABLES TERMODINÁMICAS

La relación temperatura/presión correlaciona la presión del vapor y el punto de ebullición del agente refrigerante. Por lo cual al controlar las presiones en un sistema de refrigeración, se pueden controlar las temperaturas que mantendrá el sistema [10].

Dada la importancia de la relación temperatura/presión para el sistema de refrigeración por compresión de vapor, en este capítulo se estudian más a fondo estas dos variables termodinámicas.

2.1.1 Temperatura

En equipos de refrigeración domésticos es común encontrar diferentes temperaturas en el aire que se encuentra en el interior del equipo, las temperaturas del conservador son diferentes a las del congelador, debido a que todo el aire es dirigido constantemente hacia el serpentín de evaporación por la recirculación causada por el ventilador o por corrientes naturales generadas por cambios en la densidad.

En un refrigerador doméstico, es común encontrar diferentes compartimentos para conservar o congelar los productos. Dichos compartimentos (y por tanto, los refrigeradores) se clasifican en función de las temperaturas que puedan alcanzar.

Compartimento para almacenar alimentos frescos: almacena alimentos no congelados.

Compartimento de bodega: almacena alimentos o bebidas a una temperatura mayor que la del compartimento para alimentos frescos.

Compartimento de baja temperatura: este compartimento puede ser:

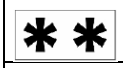
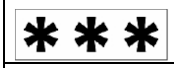
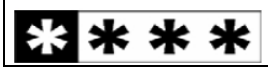
Compartimento para fabricar hielo: compartimento de congelamiento y almacenamiento de agua congelada.

Compartimento para almacenar alimentos congelados: estos compartimentos se clasifican de acuerdo a su temperatura de la siguiente manera:

- **Compartimento una estrella:** compartimento de almacenamiento que no excede una temperatura de -6 °C.
- **Compartimento dos estrellas:** compartimento de almacenamiento que no excede una temperatura de -12°C.
- **Compartimento tres estrellas:** Compartimento de almacenamiento que no excede una temperatura de -18 °C [26].

Es importante conocer los niveles de temperatura que el refrigerador puede alcanzar porque de estos depende el tiempo de conservación de los alimentos, en la Tabla 3 se muestra un resumen de los tiempos de conservación para diferentes clasificaciones de refrigerador.

Tabla 3. Tiempos de conservación de alimentos a diferentes temperaturas [27]

Clasificación	Temperatura	Tiempo de Conservación
	Hasta -6 °C	1-2 días
	Hasta -12°C	Hasta 3 días
	Hasta -18°C	Hasta un mes
	Hasta -24°C	3 o más meses

Temperatura típica de operación – evaporador

En refrigeradores domésticos para una temperatura del espacio refrigerado de -15°C, la temperatura en un evaporador de tubo liso con aletas debe estar entre -23°C y -25°C, en el caso de un evaporador de esta misma construcción pero de tiro forzado, la temperatura en el evaporador se encuentra entre -20°C y -23°C [12].

Temperatura típica de operación – condensador

Los refrigeradores domésticos en Colombia, país con clima tropical, están diseñados para operar en espacios cerrados, en donde la temperatura del aire se encuentra entre 18°C y 43°C [26], es decir que el condensador opera con dicho rango de temperaturas en sus alrededores. Los condensadores, especialmente los de tiro natural, deben estar diseñados para condensar el refrigerante alrededor de 10°C o 15°C por encima de las condiciones de los alrededores. El condensador es más eficiente a medida que la temperatura de condensación es más baja.

Temperatura típica de operación- Compresor

El compresor es el corazón del circuito de refrigeración, no debe ser ruidoso y tampoco debe trabajar con fuertes vibraciones. Los compresores se refrigeran por aire o por refrigerante, aquellos que se refrigeran con aire, tienen superficies extendidas para incrementar el intercambio de calor con el ambiente; por su parte, los compresores

enfriados por refrigerante, son refrigerados por medio de la línea de succión, donde el refrigerante debe contener un aceite especial que ayude a que el compresor trabaje en temperaturas adecuadas. La temperatura de operación de un compresor varía de acuerdo a su capacidad y el tipo de refrigerante, generalmente opera a temperaturas superiores a los 43°C estimados para el condensador.

2.1.2 Presión

En sistemas de refrigeración domésticos, básicamente se presentan dos presiones: la línea de alta presión que va desde la descarga del compresor hasta el dispositivo de expansión y la línea de baja presión que va desde la salida del dispositivo de expansión hasta la succión del compresor. Debido a que los tramos de tubería son relativamente cortos y que se presentan pocas pérdidas de presión en los equipos, muchas veces se asume, para equipos de refrigeración doméstica, que la presión es constante en cada línea.

Presión típica de operación – evaporador

En refrigeradores domésticos, para alcanzar temperaturas del ambiente refrigerado del orden de -15°C, el evaporador (de tubo con aletas) debe trabajar a muy bajas presiones, es decir, 7 kPa, incluso puede llegar a trabajar ligeramente por debajo de la presión atmosférica. Para un evaporador de convección forzada, la diferencia no es muy notoria, puesto que están entre 7 y 20 kPa. Cabe anotar que dichas presiones se alcanza casi al final del ciclo de refrigeración, es decir, cuando las temperaturas del sistema están completamente en equilibrio y el compresor está a punto de apagarse.

Las presiones en el evaporador varían según el tipo de refrigerante y las temperaturas necesitadas, en la Figura 16, puede verse la variación de las presiones con el cambio de temperatura para refrigerantes de uso común en neveras domésticas.

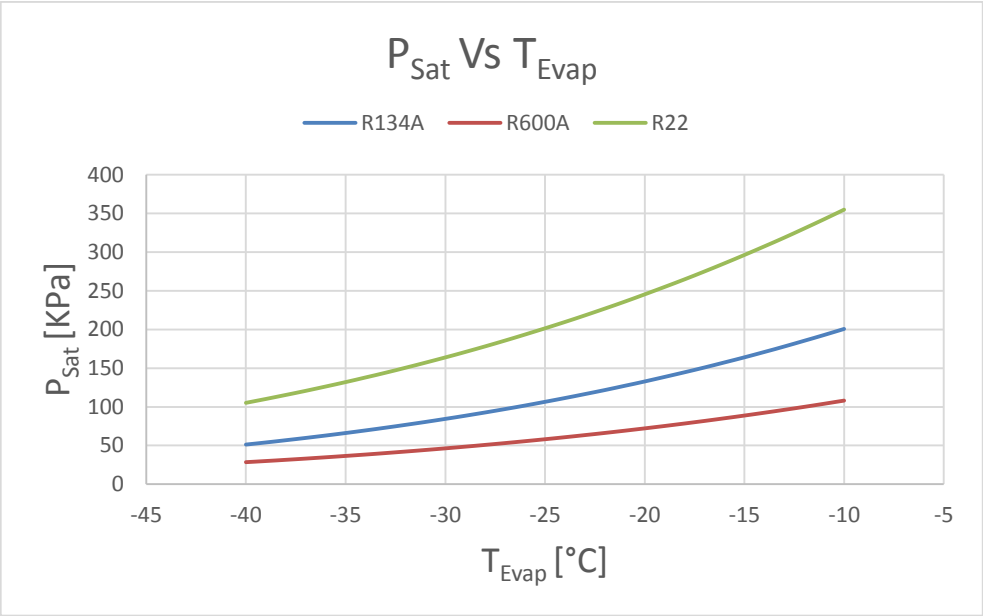


Figura 16. Presión de saturación a diferentes temperaturas de evaporación, para refrigerantes comunes en neveras domésticas. Hecha por los autores.

Presión típica de operación – condensador

En refrigeración doméstica, los circuitos o tuberías suelen ser cortos entre equipos, por tal motivo, el condensador trabaja cerca de la presión de descarga del compresor. Estas presiones generalmente son altas y varían según el tipo de refrigerante y las temperaturas de condensación (ver Figura 17).

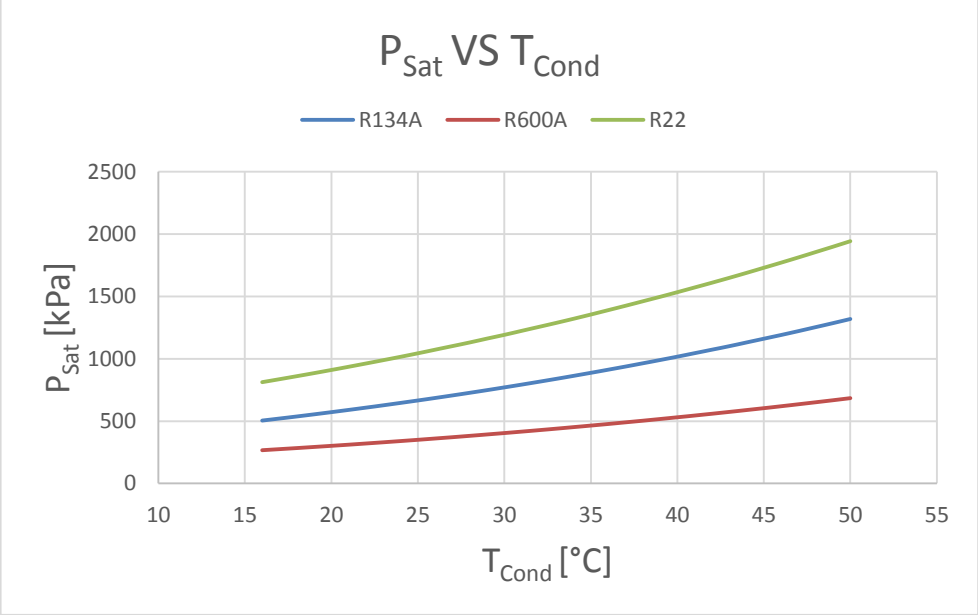


Figura 17. Presión de saturación a diferentes temperaturas de condensación, para refrigerantes comunes en neveras domésticas. Hecha por los autores.

2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN EQUIPO DOMESTICO

Los equipos de refrigeración doméstica por compresión de vapor tienen un ciclo mecánico, descrito en el capítulo 1.1.3, el cual está compuesto por los siguientes sistemas:

- Compresor
- Evaporador
- Condensado
- Dispositivos de expansión

Sin embargo los refrigeradores domésticos tienen otros componentes que cumplen con funciones indirectas al ciclo por compresión de vapor pero que garantizan el correcto funcionamiento en un ambiente doméstico.

En todos los sistemas de refrigeración que tienen una temperatura de evaporación por debajo del punto de congelamiento del agua se presenta formación de escarcha debido al

congelamiento de la humedad que se encuentra en el aire que circula a través del evaporador.

El exceso de escarcha en los evaporadores reduce drásticamente la eficiencia del ciclo de refrigeración y puede causar daños cuando no se realiza un adecuada remoción de escarcha, en los sistemas de refrigeración es común hacer descongelamiento manual apagando el ciclo por cortos periodos. Actualmente es muy usado el descongelamiento automático mediante la implementación de componentes adicionales.

2.2.1 Temporizador de descongelamiento

El temporizador de descongelamiento es un dispositivo que permite tener ciclos programables donde el sistema de refrigeración es apagado para que por un periodo de tiempo el sistema de descongelamiento esté activado, a este tiempo se le conoce comúnmente como tiempo de falla segura.

Durante el ciclo de descongelamiento el temporizador desactiva el ventilador, para el caso de evaporadores de tiro forzado y energiza la resistencia eléctrica que se encuentra cercana del evaporador.

En los sistemas más comunes tiene un cableado sencillo entre el compresor, la resistencia y el temporizador como se puede ver en la Figura 18, adicionalmente la mayoría de estos sistemas cuentan con indicadores de inicio y terminación del ciclo.

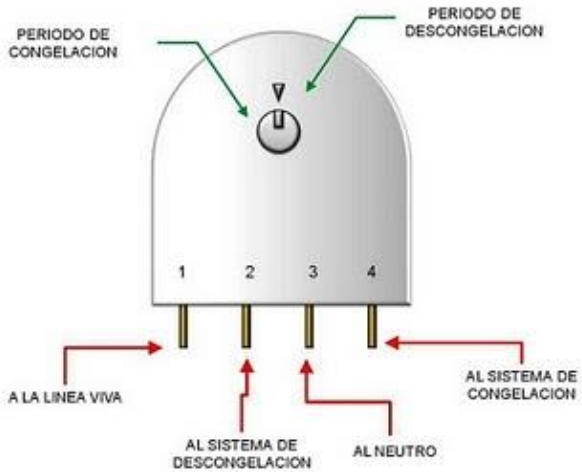


Figura 18. Temporizador de descongelamiento para refrigeradores [28].

2.2.2 Termostato de descongelamiento

Este dispositivo es comúnmente conocido como interruptor de seguridad de la resistencia de descongelamiento o control limitador de descongelamiento.

Este sistema está conectado en serie entre el temporizador y la resistencia de descongelamiento; censa la temperatura en el evaporador, cuando la temperatura en el evaporador es muy elevada este interruptor se abre y apaga la resistencia de descongelamiento aunque el ciclo predeterminado del temporizador no haya terminado.

Figura 19. Termostato bimetálico de descongelamiento [29].

2.2.3 Resistencia de descongelamiento

La resistencia de descongelamiento es usada para remover la escarcha acumulada en los evaporadores de baja temperatura; a pesar que hay diferentes modos de hacer el descongelamiento, en sistemas de refrigeración domésticos las resistencias eléctricas son el método más común.

Las resistencias eléctricas son controladas por el temporizador de descongelamiento y por el termostato, están ubicadas muy cerca a los evaporadores incluso entrelazadas con los serpentines (ver Figura 20).

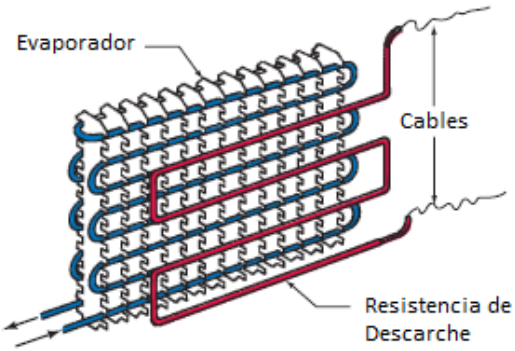


Figura 20. Un calentador utilizado para la descongelación eléctrica del evaporador de baja temperatura. Modificada de [12].

2.2.4 Ventiladores

En refrigeración doméstica es muy común encontrar ventiladores de tiro forzado en los evaporadores y en algunos casos en el condensador, estos dispositivos son usados para aumentar la eficiencia de los intercambiadores y para garantizar corrientes de aire uniformes dentro de los recintos del refrigerador.

En refrigeración doméstica los ventiladores más comunes son los ventiladores axiales los cuales generan un gran caudal de aire y una presión dinámica baja.

En neveras domésticas es común que el ventilador o ventiladores estén conectados en serie con un interruptor ubicado en las puertas para desactivar el ventilador cuando la nevera está abierta evitando infiltraciones de aire mayores.

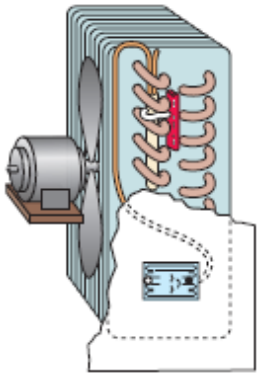


Figura 21. Ventilador de tiro forzado [12].

2.2.5 Control de temperatura por expansión de un fluido

Las funciones principales de un sistema de refrigeración son enfriar un recinto y mantener el recinto en una temperatura establecida, por esto es importante contar con sistemas de control.

En refrigeración doméstica los sistemas más comunes son los termostatos, los cuales trabajan por cambios de presión de algún fluido volátil que se encuentra confinado y reacciona fácilmente con los cambios de temperatura (ver Figura 22), a su vez activan o desactivan el circuito eléctrico del sistema de refrigeración. Estos sistemas tienen un margen de temperatura en los cuales mantienen el recinto que se desea controlar, sin embargo estos sistemas de control tienen tiempos de respuesta lo que genera que se presenten sobrepasos o retrasos en la temperatura deseada en el recinto como se puede ver en la Figura 23.

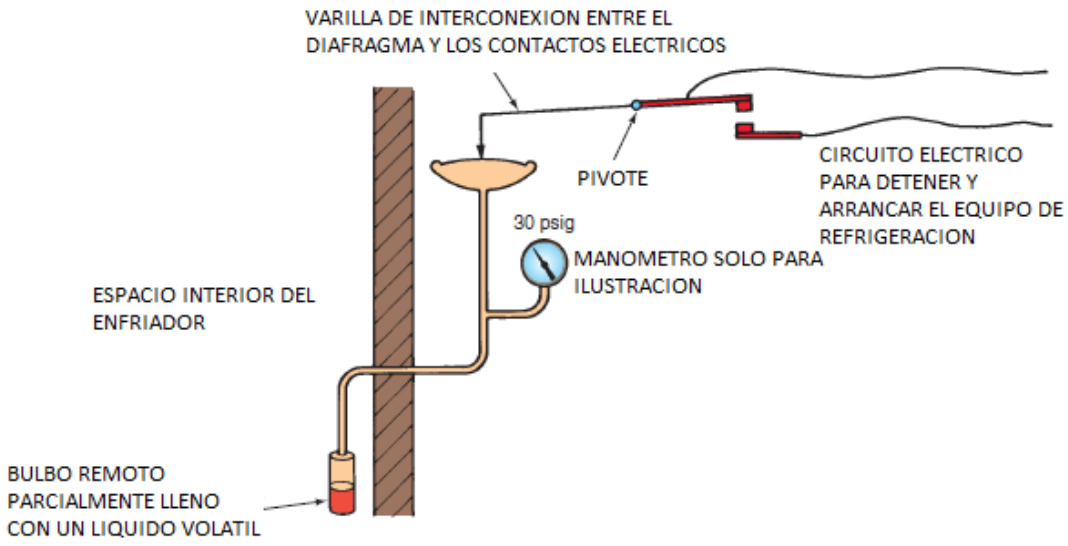


Figura 22. Bulbo remoto que transmite la presión al diafragma basándose en la temperatura del refrigerador. Modificada de [12]

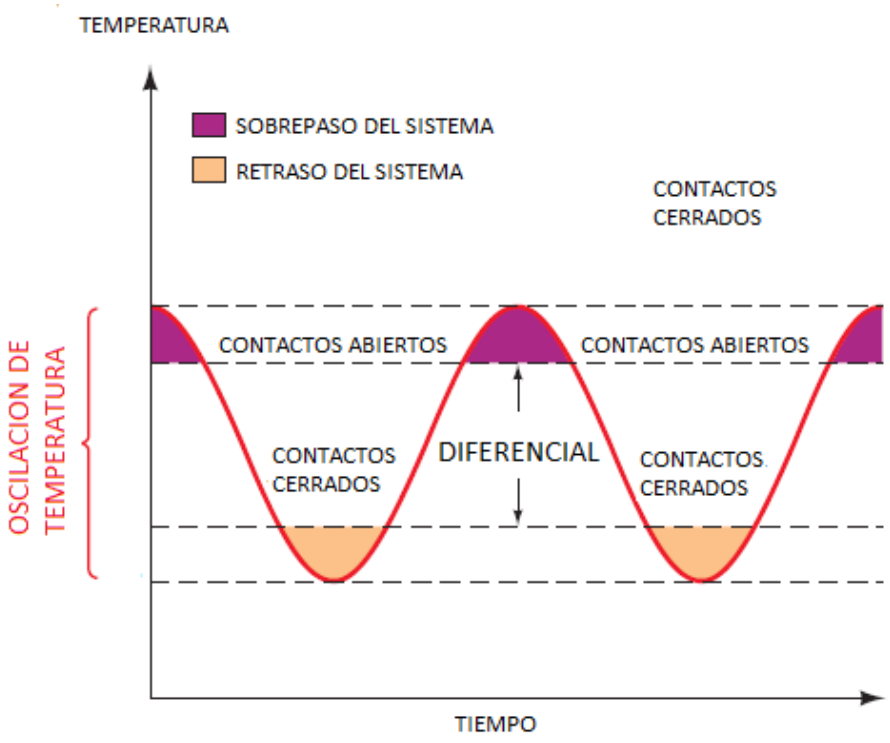


Figura 23. Ciclos de termostato no anticipado que muestran retraso y sobrepaso del sistema provocando un gran cambio de temperatura Modificada de [12].

2.3 NUEVAS TENDENCIAS EN REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA

Dada la importancia de los sistemas de refrigeración en el consumo eléctrico de la gran mayoría de los hogares es común que investigadores alrededor de todo el mundo investiguen y estudien nuevas tecnologías que permitan mejorar cada uno de los componentes de un sistema de refrigeración doméstico y por consiguiente la eficiencia global del sistema de refrigeración.

A continuación se presentan nuevas tendencias, tecnologías y estudios en los componentes de los sistemas de refrigeración doméstica.

2.3.1 Compresores

- **Compresor sin aceite:** Embraco ® lanzó al mercado en 2014 una nueva línea de compresores con tecnología Wisemotion ® cuya principal característica es que funciona sin utilizar aceite. Entre las ventajas de esta nueva tecnología se

encuentra una mayor preservación de los productos debido a la poca variación de la temperatura al interior del refrigerador; además, este compresor es aproximadamente 10 mm más bajo que los compresores convencionales de capacidades similares y utiliza un 50% menos de materiales para su construcción; otra ventaja que tiene esta nueva tecnología es que requiere de una menor carga de gas refrigerante. Por último, la parte más atractiva de este compresor es su consumo, ya que reduce hasta un 20% el consumo de energía comparado con los compresores convencionales [30].

- **Compresor lineal:** Mientras que un compresor reciprocante transforma un movimiento rotacional en uno lineal mediante ejes y bielas, el movimiento de un compresor lineal, como su nombre lo indica, es netamente lineal, lo que disminuye la cantidad de partes móviles y por lo tanto las pérdidas por fricción.

  El funcionamiento de un compresor lineal consiste en un pistón que se mueve linealmente debido al campo magnético generado por un estator, este pistón esta soportado sobre resortes que se encargan de devolver al pistón a su posición inicial y así generar el ciclo necesario para generar la compresión.

  Los compresores lineales son capaces de recuperar alguna de la energía perdida en la expansión del refrigerante; además la menor cantidad de partes móviles representa un potencial de mayores eficiencias. Debido a esto se ha demostrado que un sistema de refrigeración con un compresor lineal fue capaz de alcanzar un COP de 11, valor que representa aproximadamente el 39% del COP de Carnot [31].

- **Tubo difusor:** se estudia el efecto que tiene la implementación de un tubo difusor en la línea de succión y en la de descarga de un sistema de refrigeración doméstica. Comparando los consumos energéticos presentados por cada uno de estos equipos se encontró que el refrigerador que tenía implementado el tubo difusor en la succión presentó un ahorro de 4.09% mientras que el equipo con el tubo difusor en la descarga presentó un ahorro del 8.0% [32].

2.3.2 Condensadores y evaporadores

- **Inclinación del condensador:** Debido a que el aire fluye verticalmente en el condensador, la parte superior del mismo presenta menores diferenciales de temperatura y, por lo tanto, menor potencial de transferencia. Se propone entonces posicionar el condensador con cierto ángulo de inclinación y de esta manera, el aire que recibe el calor del refrigerante se encuentra a temperatura ambiente en todos los puntos del condensador. Después de estudiar diferentes ángulos de inclinación, se determina un ángulo óptimo de 6 grados, logrando una reducción del 10% en el consumo del refrigerador [33].
- **Ciclo dual:** Un ciclo dual hace uso de 2 evaporadores independientes, uno para el congelador y otro para el compartimiento de conservación de alimentos. Estos ciclos pueden ser con los evaporadores en serie o en paralelo y un solo compresor o con 2 compresores. Los ciclos duales que utilizan un solo compresor y 2 evaporadores presentan menores consumos energéticos que el ciclo convencional y puede ser optimizado para cada uno de los compartimientos [34].

2.3.3 Aislamiento

- **Estrategias de optimización del espesor de pared:** La optimización del espesor del aislamiento es de vital importancia para incrementar el desempeño de refrigeradores domésticos, sin embargo es difícil encontrar un espesor óptimo del aislamiento que permita un mínimo consumo de energía para el COP con el que se diseña el equipo. Por lo tanto se proponen alternativas de optimización de este espesor que toman en cuenta la relación existente entre el COP y el espesor de aislamiento de cada compartimiento; algunas de esta estrategias han logrado un ahorro de hasta 6.1% en el consumo energético de refrigeradores domésticos [35], [36].
- **Agentes espumantes:** En la producción de espumas aislantes es necesaria la utilización de un agente espumante que dará las características finales a los poros de la espuma y consecuentemente a las propiedades térmicas de la misma. Por lo tanto, se han realizado diversos trabajos en la búsqueda del agente espumante que proporcione las mejores propiedades térmicas al producto final para su uso como aislante térmico. El uso de HFC-245fa como agente espumante para el

aislamiento de refrigeradores domésticos ha demostrado otorgar a estos equipos un ahorro energético del 12% comparado con el uso de ciclopentano y n-pentano [37].

- **Paneles de aislamiento al vacío:** Los paneles de aislamiento al vacío consisten en placas de material aislante que se sellan al vacío para reducir los potenciales de transferencia de calor por los gases que puedan encontrarse en sus poros. Estos paneles han demostrado tener potenciales de resistencia térmica de 10 veces las de espumas convencionales de poliestireno y poliuretano [38].

2.3.4 Refrigerantes

- **Mezclas de refrigerantes Hidrocarburos:** Como alternativa al refrigerante R134a, adicionalmente a los Hidrocarburos puros, se han propuesto mezclas de refrigerantes hidrocarbonados para combinar las características de ambos y así obtener un refrigerante que pueda ofrecer mejores rendimientos a los equipos de refrigeración doméstica. Al reemplazar el R134a de un refrigerador doméstico con una mezcla de R290 y R600a con una composición de 45.2:54.8 en peso respectivamente, se tradujo en disminución de su consumo energético y aumento del COP entre 3.25% y 3.6% [39].

2.3.5 Controles

- **Control del compresor de capacidad variable:** Con respecto al control de la velocidad del compresor existen principalmente dos estrategias, una consiste en controlar totalmente las velocidades del compresor teniendo la capacidad generar rampas de funcionamiento a casi cualquier velocidad; la otra consiste en definir dos o más velocidades fijas entre las cuales se pondrá a trabajar el compresor generando un funcionamiento escalonado. [40] realizaron estudios experimentales en los que compararon el consumo de dos refrigeradores, uno con control total de la velocidad del compresor y otro con 2 velocidades fijas; se encontró que las dos estrategias generan un ahorro en el consumo siendo el ahorro de la última estrategia un 3% menor al de la estrategia de control total. Sin embargo, puede ser más viable la implementación de la estrategia de 2 velocidades en sistemas

de refrigeración doméstica debido a que sus costos de implementación pueden ser más bajos [40].

2.3.6 Carga de refrigerantes y dispositivos de expansión

- **Correlaciones empíricas:** La determinación de la carga de refrigerante y las dimensiones del tubo capilar, por lo general se realiza por medio de cálculos y correlaciones empíricas que relacionan dichas variables con la capacidad y condiciones de operación del equipo a diseñar. Estas correlaciones se validan para diferentes condiciones como rangos de operación y tipo de refrigerante presentando diferentes valores de precisión, por lo que constantemente se realizan investigaciones con el objetivo de desarrollar estrategias que permitan abarcar rangos más amplios y con mayor precisión. De esta forma, es importante que la determinación de estas variables se realice mediante procedimientos adecuados, válidos y vigentes [41], [42].
- **Determinación experimental por medio de un Banco de Ensayos:** Un banco de ensayo para carga de refrigerante y longitud de tubo capilar es un equipo capaz de controlar estas variables de forma ágil, mientras se mide el consumo energético del refrigerador con el objetivo de establecer las relaciones existentes entre estas magnitudes para cada modelo particular. Trabajos anteriores han demostrado que al emplear un banco de ensayos para dichas variables con una metodología de optimización se puede lograr un equipo con reducciones de consumo energético considerables [43], [44].

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE DETALLE

3.1 MODELADO DEL REFRIGERADOR EN CAD CON SUS MODIFICACIONES

Dada la necesidad de mostrar a los estudiantes los principales subsistemas de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, se plantean las modificaciones en un modelo en CAD del equipo donado por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y CALIDAD EN REFRIGERACIÓN (ver Figura 24).

Retirar parte del aislante que tiene en la parte trasera y reemplazar algunas piezas fabricadas en acrílico hacen parte de las principales modificaciones para mejorar la visibilidad de los componentes del refrigerador doméstico, como se puede ver en la Figura 25 y la Figura 26.

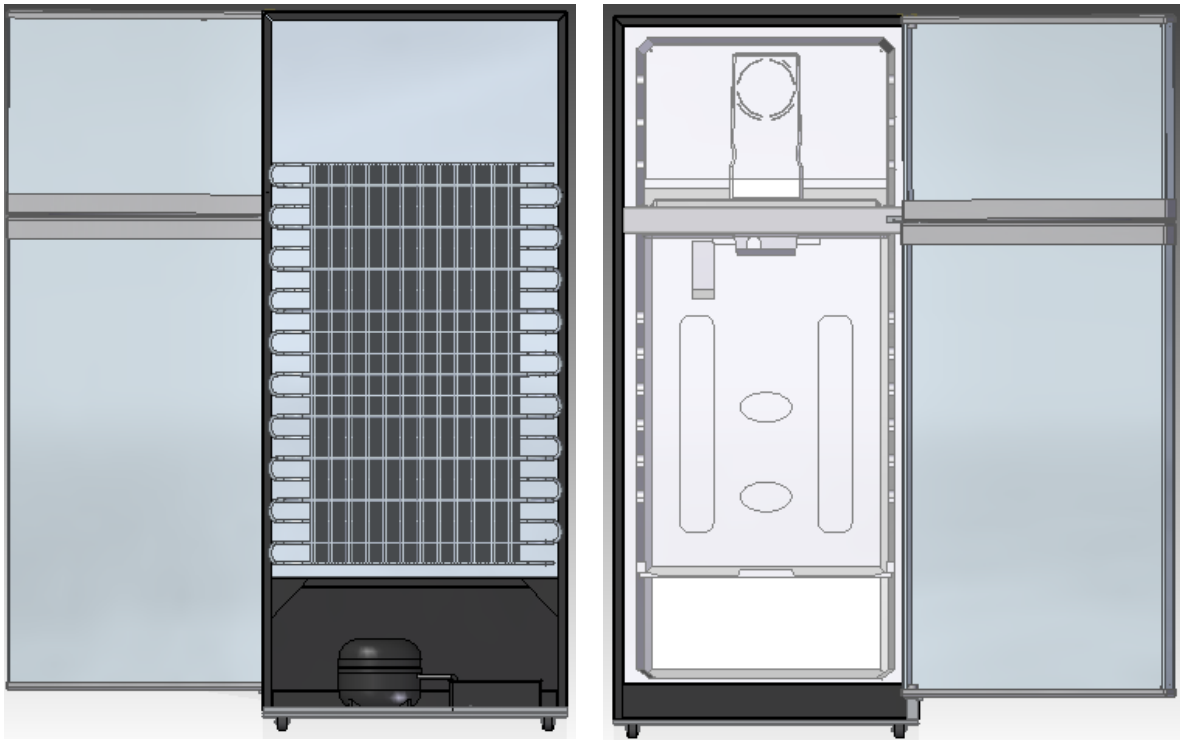


Figura 24. Modelo en CAD del equipo didáctico sin modificaciones. Hecha por los autores.

Figura 25. Modelo en CAD del equipo didáctico con modificaciones. Hecha por los autores.

Figura 26. Modelo en CAD del equipo didáctico con modificaciones. Hecha por los autores.

3.2 INSTRUMENTACIÓN

La importancia que implica conocer la temperatura y la presión de un sistema de refrigeración, para evaluar su comportamiento y eficiencia, hace que se busque instrumentación adecuada para su monitoreo constante.

3.2.1 Rangos de trabajo del sistema de refrigeración

Con base a las variables termodinámicas que van a ser monitoreadas, se estiman sus rangos de valores para realizar una correcta selección de la instrumentación.

Con base en el catálogo del compresor TECUMSEH TWB1380YLS y el refrigerante R134a usado por el sistema de refrigeración, se estiman los siguientes valores para presión y temperatura (Ver Tabla 4)

Tabla 4. Rangos de trabajo del sistema de refrigeración.

COMPRESOR TECUMSEH TWB 1380YLS		
Presiones de Trabajo		
Psat @ 54°C	1456	kPa
Psat @ -23°C	116.5	kPa
Temperaturas de Trabajo		
Alta temperatura	80 a 100	°C
Baja temperatura	-35 a -10	°C

3.2.2 Selección de la instrumentación

Dado que el equipo propuesto tiene carácter didáctico se tiene la necesidad de medir como mínimo seis temperaturas, a la entrada y a la salida del compresor, evaporador y condensador, adicionalmente se requiere la medición de las presiones más representativas del sistema las cuales se ubican en la entrada y salida del compresor.

Es importante contar con un sistema de monitoreo constante de las variables que permita evidenciar el comportamiento de las variables durante los diferentes ciclos que se presentan en un refrigerador doméstico, por lo que se propone implementar un sistema de adquisición de datos de todos los sensores y transmisores.

Según los rangos de temperatura y presión y las necesidades de medición identificadas, se evaluaron tres opciones, PROVEEDOR A, PROVEEDOR B y PROVEEDOR C, empresas especializadas en instrumentación y/o refrigeración de la ciudad de Medellín.

Todas las opciones son evaluadas bajo los siguientes criterios:

- *Criterios*

Indicación local: Este criterio se refiere a si los equipos tienen indicación local en un tablero de control o si se requiere un equipo de cómputo para visualizar los valores de las variables sujetas a medición. Si los equipos poseen indicación local, recibe una alta calificación en este criterio, de lo contrario, recibe una baja calificación.

Opción 1. PROVEEDOR A

En la pantalla del PLC se pueden visualizar tan solo cuatro valores de temperatura y dos valores de presión. Dichos variables se pueden visualizar en todo momento y de manera simultánea.

Calificación: 4

Opción 2. PROVEEDOR B

Esta opción no cuenta con ningún tipo de indicación local, el sistema de adquisición de datos debe llevarlos a una computadora para que las variables puedan ser visualizadas.

Calificación: 0

Opción 3. PROVEEDOR C

Esta opción cuenta con tres estaciones de indicación local para temperatura, en cada una se pueden visualizar alternativamente el valor de tres sensores de temperatura. Para la presión, cuenta con dos estaciones donde se puede visualizar en cada una el valor de la presión en todo momento de la succión y descarga del compresor.

Calificación: 5

Cantidad de Mediciones: Como ya se mencionó, es importante por lo menos poder medir seis temperaturas, una a la entrada y salida del compresor, del condensador y del evaporador, y dos presiones, este criterio se califica con un valor alto para sistemas que cumplan con la cantidad de medidas requeridas, para sistemas que están por debajo del requerimiento la calificación es baja.

Opción 1. PROVEEDOR A

Variables a medir: cuatro en temperatura, dos en presión.

Calificación: 2

Opción 2. PROVEEDOR B

Variables a medir: cuatro en temperatura, dos en presión.

Calificación: 2

Opción 3. PROVEEDOR C

Variables a medir: nueve en temperatura, dos en presión.

Calificación: 5

Conectividad entre equipos: Este criterio se refiere a que tipo de comunicación tienen los equipos de adquisición de datos con una computadora (RS-485, RS-232, USB, etc.) y que bondades ofrece dicha comunicación a la hora de conectarlos; además, si es necesario o no programar las entradas y las salidas y si se requieren protocolos de inicialización adicionales a los que provee el fabricante de los sistemas de adquisición. Si la comunicación entre los sistemas de adquisición y el computador no requiere protocolos de inicialización adicionales y no requiere procesos de acondicionamiento de señales mediante algún software, la calificación es alta, de lo contrario, su calificación es baja.

Opción 1. PROVEEDOR A

Esta opción cuenta con un PLC UNITRONICS, trasmisores de presión SIEMENS y sensores de temperatura PT100 fabricados por la misma empresa. Su comunicación es mediante RS 232/485 montados sobre el protocolo MODBUS. Para registrar los datos en el computador se requiere programar rutinas de inicialización en LABVIEW y en el propio software del PLC.

Calificación: 3

Opción 2. PROVEEDOR B

Esta opción cuenta con un datalogger y sensores de presión NOVUS, sensores de temperatura PT 100 cuyo fabricante es KELVIN. La comunicación se puede hacer mediante protocolos MODBUS, ASCII con tipo de conexión USB. Para la visualización de datos, se requiere un computador en funcionamiento equipado con un software proporcionado por el mismo fabricante del datalogger.

Calificación: 4

Opción 3. PROVEEDOR C

Esta opción cuenta con transductores de presión, sensores de temperatura tipo termistor y dataloggers, todos FULL GAUGE. La comunicación de los sensores es mediante RS – 485, con conexión USB. No requiere de un computador para su funcionamiento y tampoco protocolos de iniciación. La interfaz persona-sistema se realiza mediante un software proporcionado por el fabricante cuando se requiera registrar los datos en un computador.

Calificación: 5

Los resultados de las calificaciones se tabulan (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se le da un grado de importancia a cada criterio según la siguiente descripción:

- Calificación: se califica cada una de las opciones en una escala de cero a cinco, siendo cero la calificación más baja y cinco la calificación más alta para cada criterio.
- Peso: Es la valoración correspondiente a cada criterio de uno a cinco, siendo cinco el criterio de mayor importancia y uno el de menor importancia.
- Ponderación: corresponde a la multiplicación entre el peso del criterio y la calificación de cada opción en dicho criterio.

Tabla 5. Cuadro de selección de instrumentación.

No.	Opciones	Criterio 1: Indicación local		Criterio 2: Cantidad de Mediciones		Criterio 3: Conectividad entre equipos		Total
		Peso	2	Peso	4	Peso	4	
		Calif.	Ponder.	Calif.	Ponder.	Calif.	Ponder.	
1	Proveedor A	4	8	2	8	2	8	24
2	Proveedor B	0	0	4	16	2	8	24
3	Proveedor C	5	10	5	20	5	20	50

Según los criterios de evaluación y las calificaciones asignadas a cada una de las opciones, se obtiene la opción 3 del *PROVEEDOR C* como la más apropiada para la implementación de la instrumentación en el equipo de refrigeración didáctico.

A continuación se presentan las características de los elementos que componen la opción seleccionada, las características de las otras opciones se pueden encontrar en el ANEXO 1.

Opción 3. PROVEEDOR C

Temperatura

Termistor NTC SB19 FG.

- Longitud del bulbo 5/4".
- Diámetro del bulbo 1/5", cable 2 m.
- Rango -50°C – 200°C.

Presión

Transductor de presión Alta SB69-500A FG.

- Rango 0 - 3447.38 kPa (0 – 500 PSI).
- Conexión al proceso ¼'' SAE, macho.
- Salida 4-20 mA, 0.5-4.5 VDC.
- Fuente 7-33 VDC.
- Temperatura de proceso -40°C – 100°C.
- Protección IP 69K.
- Temperatura de proceso -40°C – 125°C

Transductor de presión Baja SB69-100A FG.

- Rango 0-100 PSI.
- Conexión al proceso ¼'' SAE, macho.
- Salida 4-20 mA, 0.5-4.5 VDC.
- Fuente 7-33 VDC.
- Temperatura de proceso -40°C – 100°C.
- Protección IP 69K.
- Temperatura de proceso -40°C – 125°C

Sistema de adquisición de datos

Control FULL GAUGE TI-33Ri plus. Termómetro digital para tres sensores con comunicación serial. Tres unidades.

- Fuente 115-230 VAC, 50/60 Hz.
- 3 entradas analógicas de temperatura.
- Comunicación serial RS-485.
- Software Windows para la configuración, registro y exportación de datos mediante el SITRAD.
- Indicación local de tres temperaturas en pantalla digital.

Control FULLGAUGE PCT 410Ri plus. Controlador digital de presión con comunicación serial. Dos unidades.

- Fuente 12 VDC.
- Resolución 1 PSI/ 0.1 bar.
- Una entrada digital tipo contacto.
- Una entrada analógica de presión.
- Comunicación serial RS-485.
- Software Windows para la configuración, registro y exportación de datos mediante el SITRAD.
- Indicación local de presión en pantalla digital.

Interfaz serial CONV32 que permite que los controladores FULLGAUGE con comunicación serial sean conectados a un PC mediante un puerto de comunicación USB.

- Alimentación: a través del puerto USB.
- Temperatura de operación: 0 a 50 °C.
- Tres leds de indicación.
- Un conector USB-B hembra para conexión con la PC.
- Un puerto RS-485 para conexión de hasta 32 instrumentos, sin la necesidad de terminación.

Software SITRAD®: es el software de FULL GAUGE CONTROLS® para administración a distancia de las instalaciones de refrigeración, calentamiento, climatización y calentamiento solar. Permite el acceso tanto local como remotamente a instalaciones de diversos segmentos, desde redes de supermercados, frigoríficos y restaurantes, hasta hoteles, hospitales, laboratorios, residencias, entre otros.

El software permite evaluar, configurar y almacenar, continuamente, datos de temperatura y presión.

3.2.3 Diseño del tablero del circuito de instrumentación

Luego de haber definido la instrumentación a usar en el equipo de refrigeración didáctico, se realiza el diseño para la ubicación de los elementos indicadores como se ve en la Figura 27, además se realiza el diseño del circuito de los equipos de instrumentación mostrado en la Figura 28.

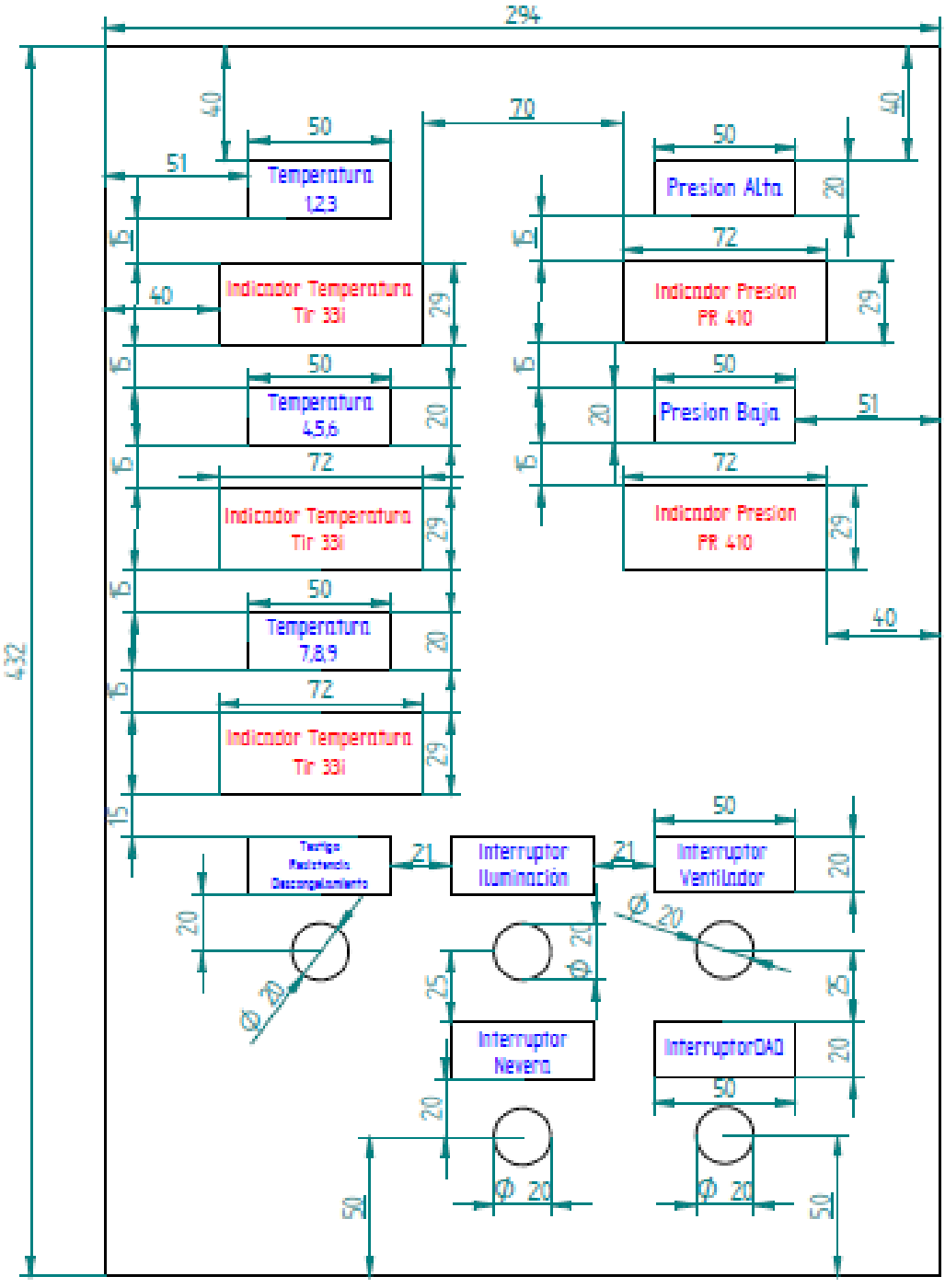


Figura 27. Esquema de ubicación de los indicadores, interruptores y testigos. Hecha por los autores.

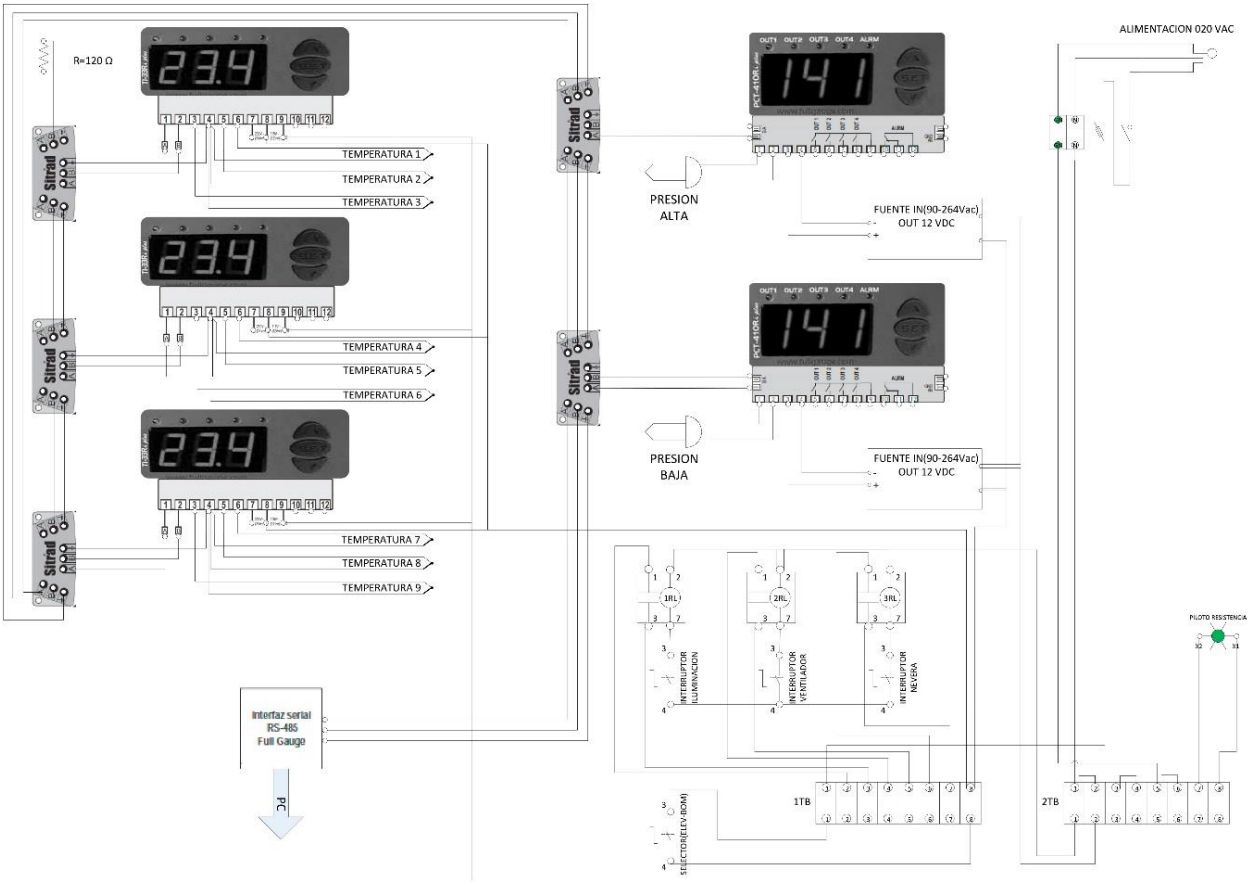


Figura 28. Circuito eléctrico de los equipos de instrumentación. Hecha por los autores.

3.2.4 Diagrama de instrumentación y proceso

Para la posterior instalación de los sensores en la línea de proceso del ciclo de refrigeración se realiza el diagrama de instrumentación y proceso en el programa AutoCAD®, según la norma ANSI/ISA-5.1-2009, para identificar los sitios de ubicación más apropiados dentro del proceso, además de las señales y cableado hacia el sistema de adquisición de datos.

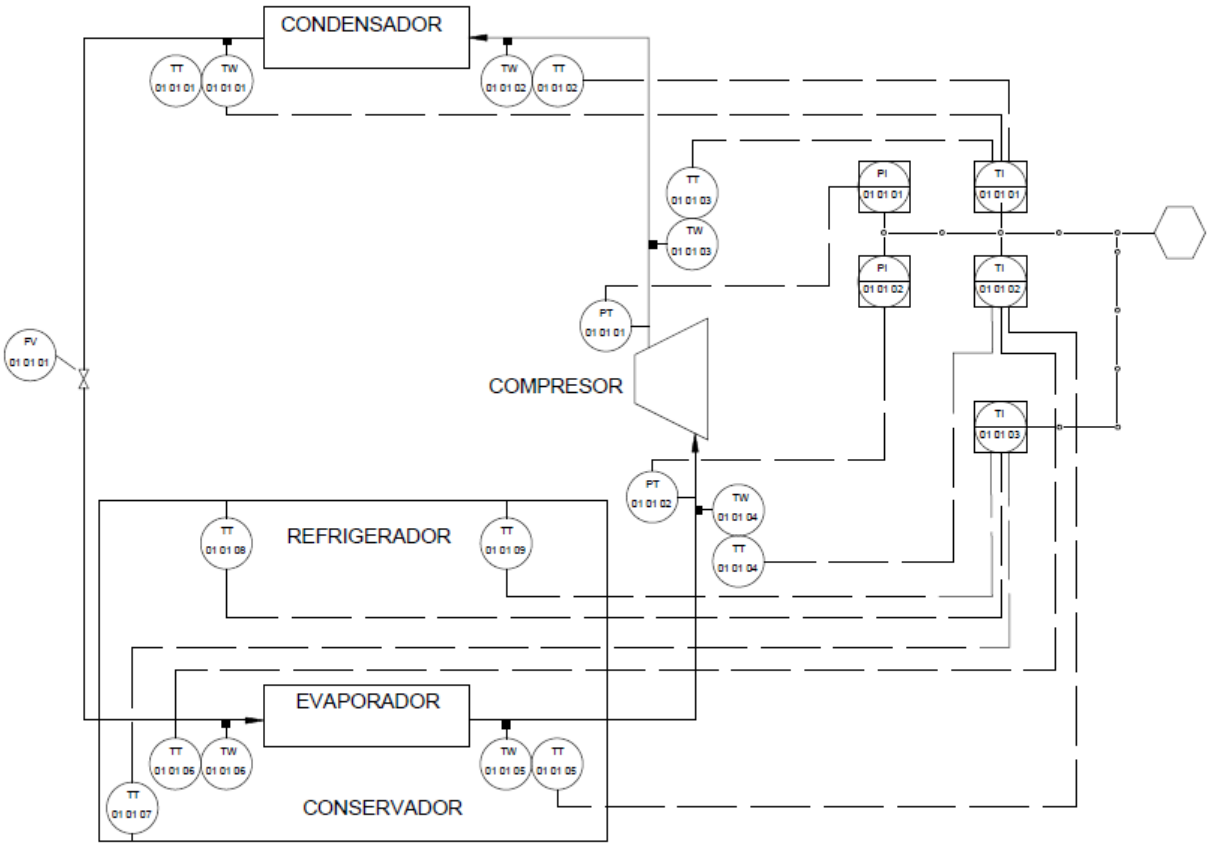


Figura 29. Diagrama de instrumentación y procesos. Hecha por los autores.

CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

Dentro del proceso de construcción del refrigerador didáctico, hay una serie de modificaciones a realizar, dichas modificaciones se presentan en el diagrama de la Figura 30 y también se listan en el orden en que se llevaron a cabo:

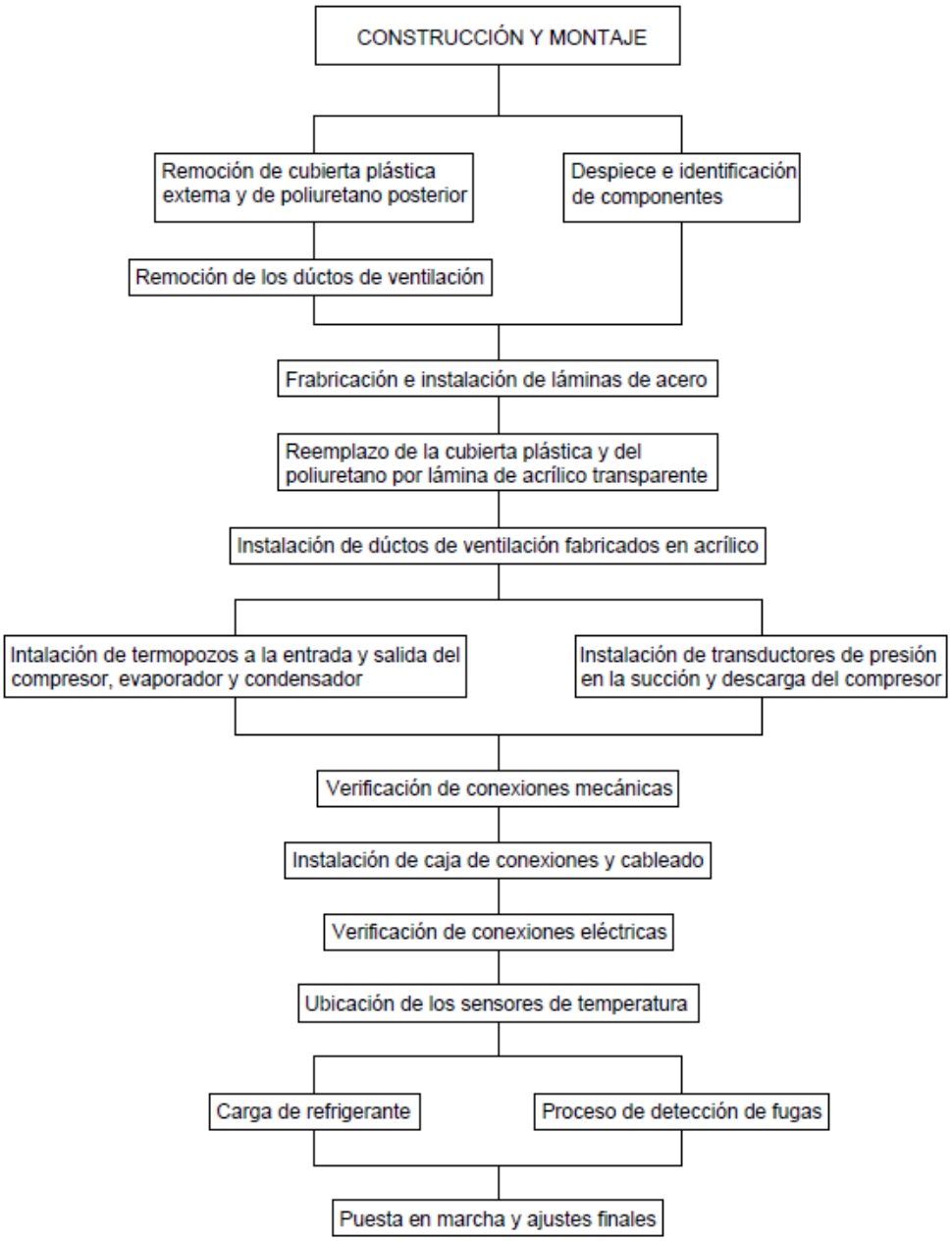


Figura 30. Diagrama de proceso de construcción y montaje del equipo didáctico. Hecho por los autores

- Retirar la capa de espuma de poliuretano de la parte posterior de la nevera, así como la cubierta de plástico del exterior de ésta.
- Instalación de láminas dobladas de acero en los bordes de la parte posterior de la nevera para dar soporte a las láminas de acrílico y cubrir la espuma de poliuretano que queda a la vista.
- Retirar la pared de plástico del interior del refrigerador.
- La espuma de poliuretano y las paredes del interior y exterior del refrigerador se reemplazan por láminas de acrílico transparente, de manera que se puedan observar los equipos que operan tanto en el ciclo de refrigeración, como en la distribución del aire al interior de la nevera (ventilador, ductos).
- Retirar los ductos de ventilación originales de la nevera y reemplazarlos por ductos fabricados en acrílico.
- Instalación de seis termopozos roscados para proteger los sensores de temperatura cuyas ubicaciones son: entrada y salida del condensador, evaporador y compresor.
- Instalación de dos transductores de presión, ubicados en la succión y descarga del compresor.
- Instalación de una caja de conexiones que contenga: tres termómetros digitales con comunicación serial, dos controladores digitales de presión (cabe anotar que dichos estos controladores solo se usaran como sistema de adquisición de datos, y no con fines de control), un interruptor que enciende o apaga el sistema de adquisición de datos, un interruptor que enciende o apaga el refrigerador, un interruptor para encender o apagar el ventilador del refrigerador de manera independiente al funcionamiento de la nevera (apaga el ventilador aunque la puerta del refrigerador esté cerrada), un interruptor que enciende o apaga las bombillas al interior de la nevera que al igual que el ventilador funciona de manera independiente (enciende las luces aunque las puertas del refrigerador estén cerradas), un testigo que se enciende cuando la resistencia de descongelamiento está en funcionamiento, breakers para proteger el sistema de adquisición de datos y el refrigerador de cambios bruscos en la alimentación eléctrica, una interfaz serial USB / RS – 485 que se encarga de transformar el estándar eléctrico

utilizado por un computador al estándar eléctrico RS-485 utilizado por los termómetros digitales y los controladores digitales de presión.

4.1 DESPIECE E IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES

El proceso de modificación del refrigerador doméstico comienza con el despiece del equipo y con la posterior identificación de los elementos que lo componen, tanto los componentes del ciclo termodinámico, como los elementos de control.

En Figura 31, se ve la parte frontal del refrigerador, en la Figura 32 se identifican partes como el evaporador, el tubo capilar, cableado correspondiente al ventilador y el sensor bimetálico del evaporador; además, se identifican en la parte inferior las ranuras de ventilación que es por donde retorna el aire y el orificio que conecta la ventilación del conservador y el refrigerador.

Figura 31. Nevera doméstica usada para la modificación, interior. Hecha por los autores.

Tabla 6. Descripción de componentes internos de la nevera, mostrados en la Figura 32.

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	Tubería de refrigerante
2	Ventilador
3	Evaporador
4	Cableado
5	Tubo capilar
6	Bimetálico
7	Ranuras de ventilación

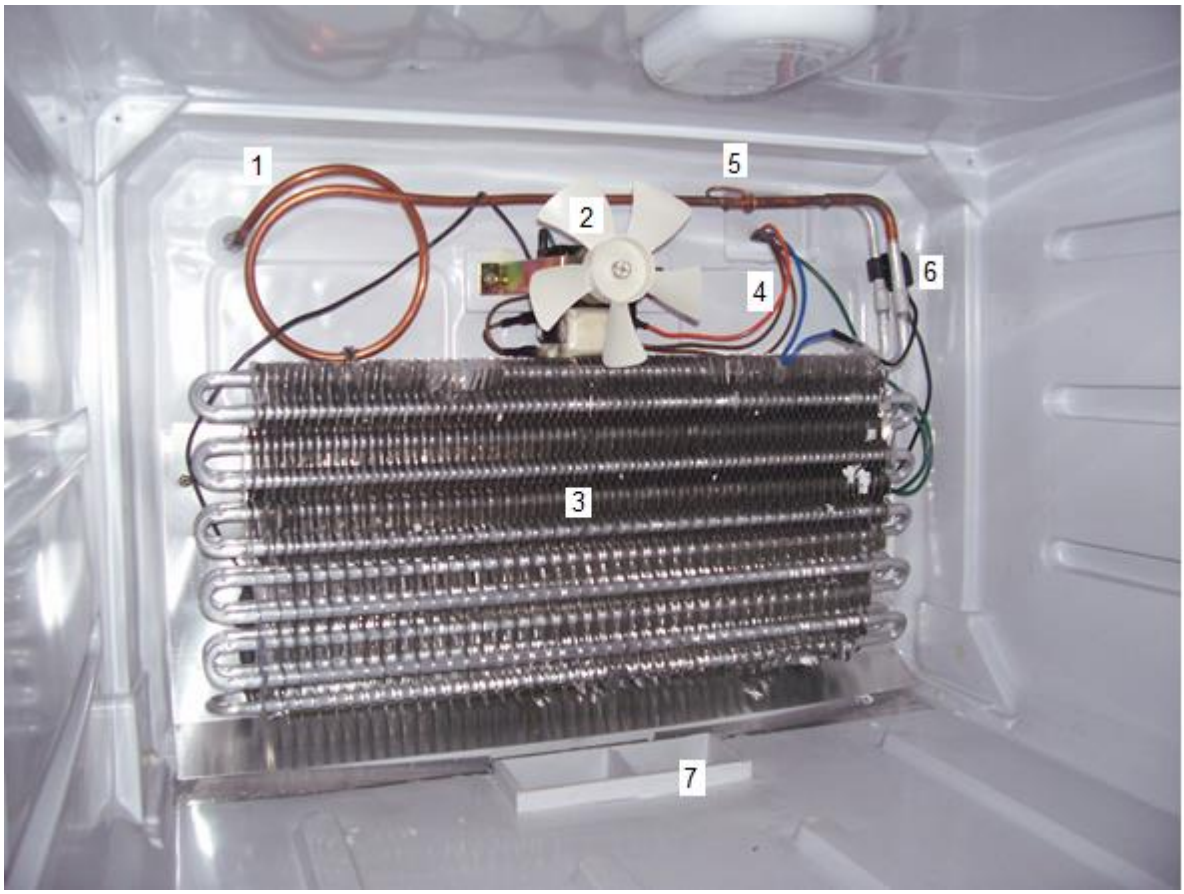


Figura 32. Evaporador de la nevera usada para la modificación. Hecha por los autores.

En la Figura 33, parte trasera del refrigerador, se encuentran el compresor, el condensador, el filtro secador y la parte inferior del drenaje de condensados, este deposita en la bandeja ubicada en la parte derecha y se evapora por medio del calor absorbido de la línea de descarga.

Figura 33. Nevera doméstica usada para la modificación, parte posterior. Hecha por los autores.

En la caja de control se encuentran el temporizador de la resistencia de descongelamiento, un interruptor mecánico, que enciende o apaga la iluminación con la apertura y el cierre de la puerta del conservador, el plafón para la bombilla del conservador, y por último, el termostato conectado directamente al bulbo ver Tabla 7 y Figura 34.

Tabla 7. Descripción de los componentes del panel de instrumentación.

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	Temporizador de descongelamiento
2	Interruptor de tope de la iluminación
3	Plafon de iluminación
4	Regulador del termostato

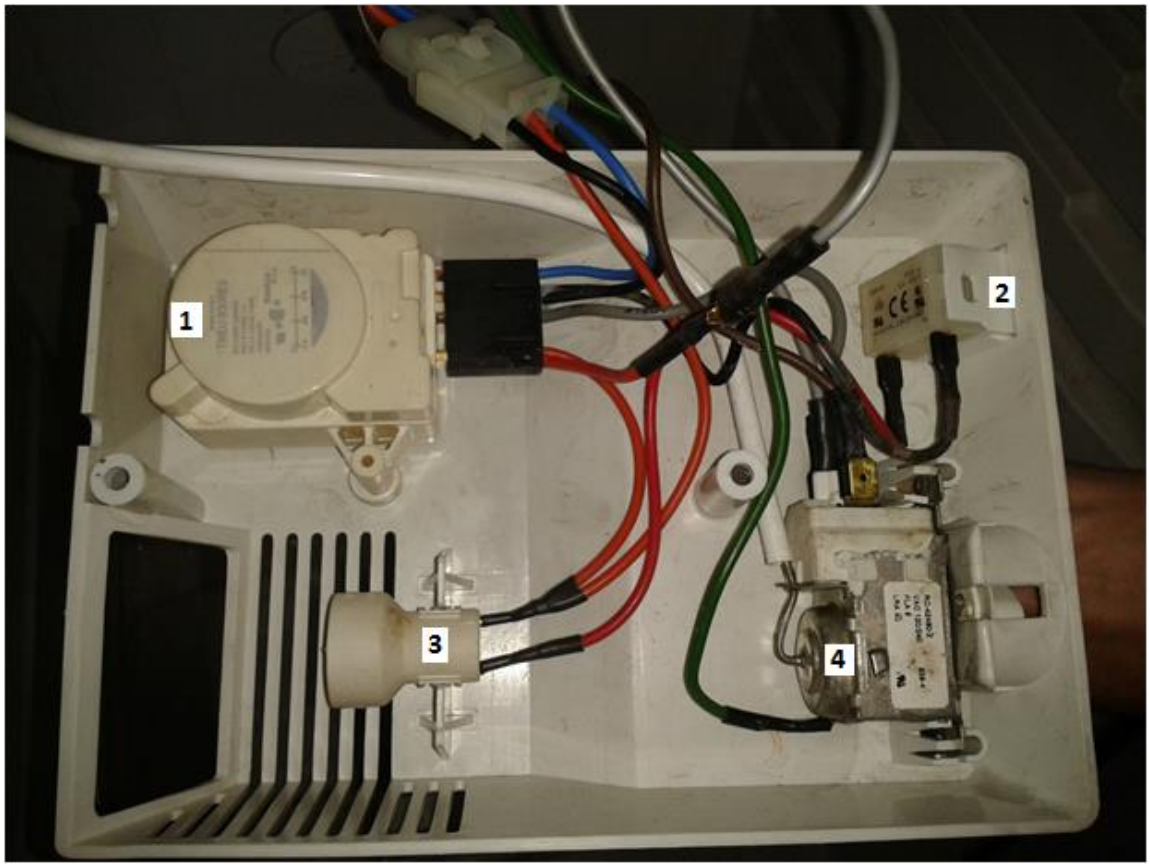


Figura 34. Caja de control de la nevera usada para la modificación. Hecha por los autores.

4.2 REMOCIÓN DE ESPUMA DE POLIURETANO Y PARED POSTERIOR DEL REFRIGERADOR

Se retira la gruesa capa de espuma de poliuretano y la pared exterior del refrigerador, quedando al descubierto la lámina plástica blanca que es la misma pared interior, también

se observa en la imagen el cableado y la tubería de condensado, así como los agujeros del ducto de ventilación del conservador.

Figura 35. Remoción de espuma de poliuretano de la nevera. Hecha por los autores.

4.3 INSTALACIÓN DE LÁMINAS DE ACERO EN LA PARTE POSTERIOR DEL REFRIGERADOR

Se instalan láminas de acero dobladas de manera que le den soporte a las láminas de acrílico y cubran las partes de espuma de poliuretano que quedan visibles.

Figura 36. Fabricación de elementos en chapa. Hechas por los autores.

4.4 DESMONTE DE LA PARED DE PLÁSTICO DEL INTERIOR DEL REFRIGERADOR

Se retira la pared plástica del interior del refrigerador que se desea reemplazar con acrílico, con esto se logra que los equipos que componen circuito de refrigeración queden visibles, al igual que el ventilador con sus respectivos ductos. Ver Figura 37

Figura 37. Remoción de recubrimiento plástico interior e instalación de elementos fabricados. Hecha por los autores.

4.5 INSTALACIÓN DE LÁMINAS DE ACRÍLICO

Se instalan las láminas de acrílico de 4 mm que fueron provistas por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y CALIDAD EN REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN, las cuales son (previamente cortadas mediante una cortador laser) soportadas por las láminas de acero, a las que se les aplica una capa de pintura negra

para darle uniformidad con el color del exterior del refrigerador. Con esta modificación, todas las partes que conforman el circuito de refrigeración son completamente visibles.

Figura 38. Instalación de acrílico y evaporador. Hechas por los autores.

4.6 INSTALACIÓN DE DUCTOS DE VENTILACIÓN EN ACRÍLICO

Una vez retirados los ductos de ventilación originales de la nevera durante el despiece, se procede con la instalación de los nuevos ductos de ventilación, que al igual que las láminas de acrílico, también fueron cortados por medio de un cortador láser como se observa en la Figura 39 y en la Figura 40.

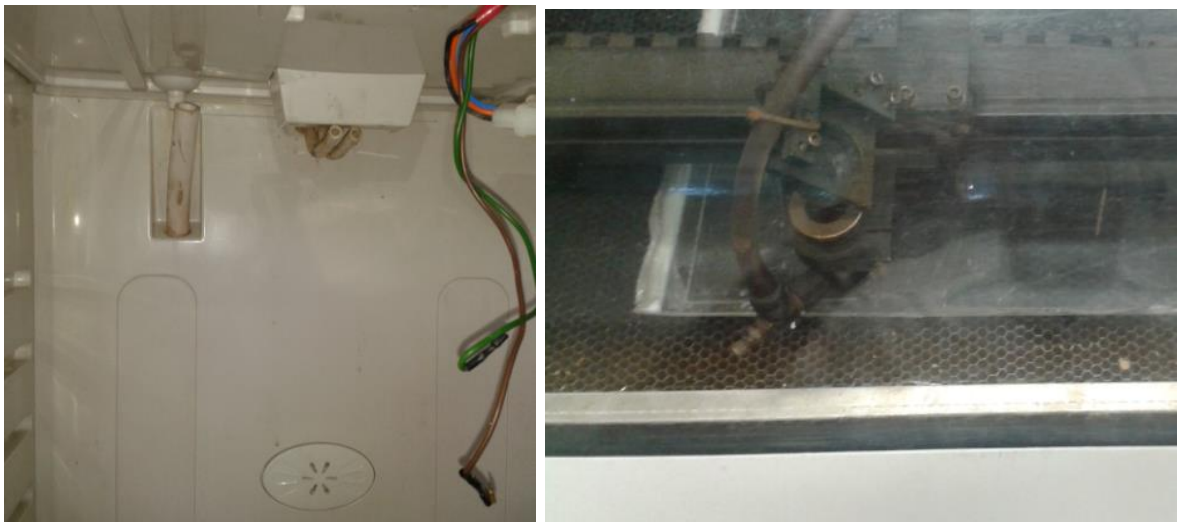


Figura 39. Fabricación en acrílico de ductos del conservador. Hechas por los autores.

Figura 40. Instalación de ductos del conservador. Hecha por los autores.

4.7 INSTALACIÓN DE TERMOPOZOS PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE

Con el fin de proteger el sensor de temperatura de las condiciones de trabajo del refrigerante, se instalan seis termopozos roscados a la entrada y a la salida del compresor (puntos 1 y 2 de la Figura 41) y del condensador (puntos 3 y 4 de la Figura 41). En la Figura 42, se tienen los termopozos a la salida y entrada del evaporador.

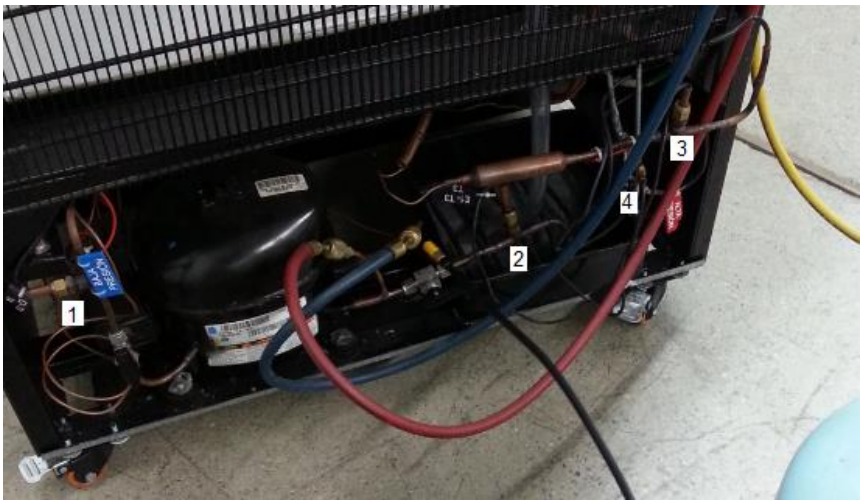


Figura 41. Termopozos para medición de temperatura en la parte posterior del equipo. Hecha por los autores.

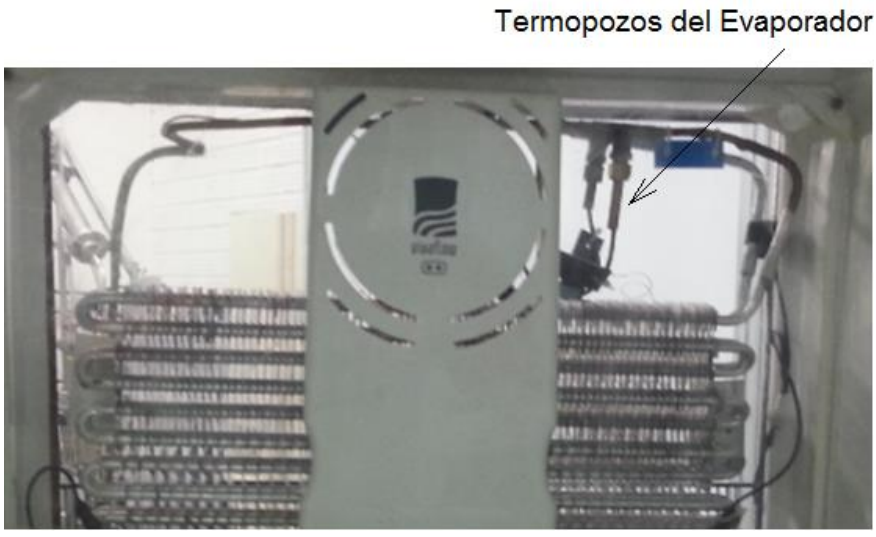


Figura 42. Termopozos para medición de temperatura en el evaporador. Hecha por los autores.

4.8 INSTALACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

Se instalan dos transductores de presión, uno en la succión y otro en la descarga del compresor. Ambos transductores están ubicados al costado izquierdo del compresor, soportados por una pequeña bandeja metálica, los sensores se conectan al sistema mediante pequeños tramos de tubo capilar.

Figura 43. Ubicación de los transmisores de presión. Hecha por los autores.

4.9 INSTALACIÓN CAJA DE CONEXIONES

Luego de tener el diseño del tablero del circuito de instrumentación, capítulo 3.2.3, se contrata la instalación del tablero con personal especialista en el tema.

La caja de conexiones contiene los termómetros digitales, los indicadores de presión, los interruptores, la interfaz que conecta al computador, el testigo de la resistencia de descongelamiento y elementos de protección del circuito eléctrico, todos los componentes se pueden ver en la Figura 44. Su función es agrupar conexiones eléctricas e indicadores en un solo lugar, al igual que sus conexiones.

Figura 44. Panel de instrumentación. Hechas por los autores.

Tabla 8. Descripción de los componentes del panel de instrumentación.

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	FULLGAUGE PCT 410Ri plus, controlador digital de presión
2	FULL GAUGE TI-33Ri, Termómetro digital
3	Interruptor de equipos de instrumentación
4	Interruptor del ventilador
5	Piloto de la resistencia de descongelamiento
6	Interruptor del compresor
7	Interruptor de la iluminación
8	Relés
9	Breakers de protección
10	Interfaz serial CONV32
11	Fuents de alimentación de los FULLGAUGE PCT 410Ri plus
12	Regletas de conexiones

4.10 DETECCIÓN DE FUGAS

El proceso de detección de fugas consta de dos etapas: la primera es llevando la tubería que compone el circuito de refrigeración al vacío mediante una bomba de vacío, este proceso de igual forma es necesario para eliminar el aire y su humedad del interior de las tuberías para posteriormente cargar el gas refrigerante. Una vez el sistema se encuentra en vacío, se deja en esta condición durante 24 horas; el sistema debe permanecer en vacío cuando pase este lapso de tiempo. La segunda etapa es un proceso de detección de fugas mediante un detector de gases refrigerantes cuando ya dicho gas se encuentre dentro del circuito de refrigeración; este equipo se posiciona cerca de puntos potenciales de fuga, como lo son las soldaduras, válvulas y termopozos.

Para el proceso de detección de fugas se utilizó un sistema de las siguientes características:

Detector de fugas CPS LS3000B

- **Tipo de sensor:** Diodo Catódico frio
- **Sensibilidad:** Selección automática, ≥ tasa de fuga de 3 g/año

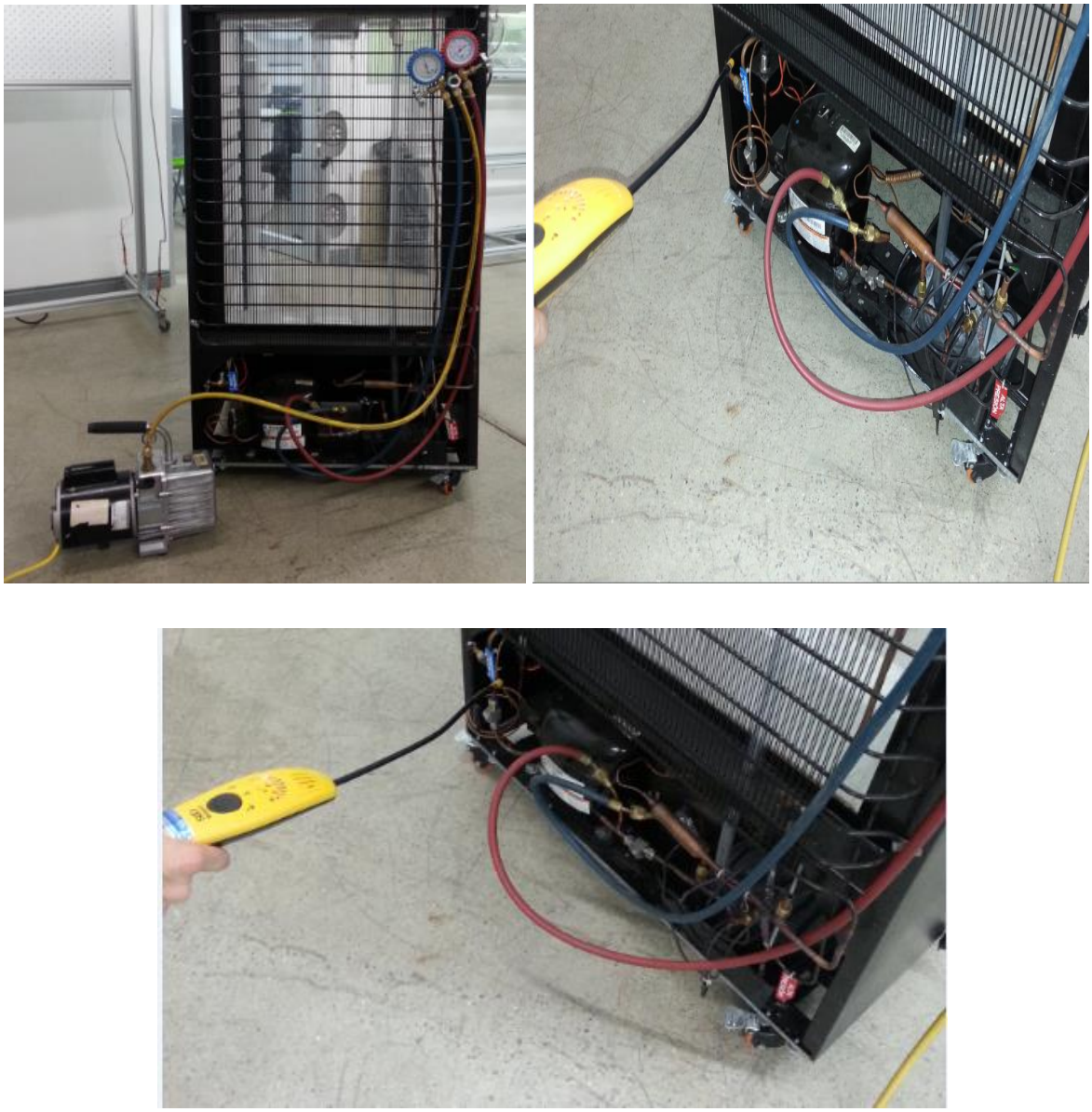


Figura 45. Proceso de detección de fugas.

4.11 CARGA DE REFRIGERANTE

El catálogo del compresor contiene una tabla del amperaje en el cual debe operar el compresor de acuerdo a las temperaturas de evaporación y condensación. Con base en esta tabla, se halla un valor de amperaje en el compresor para dichas temperaturas.

Los elementos con los cuales se carga el refrigerante en el sistema son una balanza, una válvula solenoide, un control retroalimentado por la balanza para la válvula solenoide y la pipeta de gas refrigerante R134a. La precisión y resolución de la balanza es 10 g, por tanto se programan 10 gramos en el control de la válvula, una vez programada dicha masa de refrigerante se abre la válvula solenoide permitiendo el flujo de refrigerante al circuito, cuando la pipeta tenga una masa de 10 gramos menos, la válvula solenoide se cierra interrumpiendo el flujo. Con esa cantidad de refrigerante en el sistema, el amperaje del compresor tiene cierto valor una vez el sistema se halla estabilizado (20 minutos aproximadamente). El proceso se repite hasta que el compresor alcance un valor de amperaje adecuado para las temperaturas de condensación y evaporación dadas.

Todos los elementos usados en el proceso de carga del refrigerante incluyendo el refrigerante R134a fueron facilitados por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y CALIDAD EN REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN, lo que representa un costo mínimo para el proceso de carga de refrigerante.

Figura 46. Proceso de carga de refrigerante

CAPÍTULO 5. GUIA DE REFRIGERACIÓN

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR Y REFRIGERACION DOMESTICA Y CALCULO DEL COP

OBJETIVOS

Objetivo general

Conocer el funcionamiento de un equipo de refrigeración doméstico mediante un ensayo bajo condiciones reales de trabajo.

Objetivos específicos

- Mostrar los principios del ciclo ideal de refrigeración.
- Identificar los componentes de un refrigerador doméstico y los procesos termodinámicos que se presentan en cada uno de ellos.
- Calcular el coeficiente de operación del equipo de refrigeración didáctico mediante dos métodos diferentes.

MARCO TEORICO

REFRIGERACION DOMÉSTICA: Estudios del consumo eléctrico en sector residencial realizados por Unidad de Planeación Minero Energética UPME muestra que para hogares que usan gas natural para la cocción de alimentos, la nevera es el electrodoméstico con mayor consumo eléctrico con un promedio levemente superior al 30%.

El ciclo de refrigeración más empleado en refrigeradores domésticos, es el ciclo por compresión de vapor, debido a la facilidad de los líquidos de absorber calor al momento de evaporarse, su facilidad de construcción y sobretodo su bajo costo. Los sistemas de refrigeración doméstica son sistemas de tamaño reducido y requieren de baja capacidad, es decir, equipos entre 1/20 hp y 1/2 hp (0.0373 kW y 0.373 kW).

CARGA TERMICA EN REFRIGERADORES DOMESTICOS: La carga térmica en refrigeradores domésticos se considera constante, sin embargo se identifican cuatro tipos de carga térmica y se dividen en función de la fuente de donde proviene dicha carga.

- Ganancia de calor a través de las paredes: es el calor que fluye desde la pared exterior hacia la pared inferior del refrigerador, la cual se encuentra a una menor temperatura.
- Carga térmica del producto: es la cantidad de calor que se le debe retirar a cierto producto con el fin de que alcance la temperatura de almacenamiento.
- Carga por cambio de aire: son debidas a infiltraciones de aire, pero en equipos domésticos, éstas son casi nulas debido a que las puertas están equipadas con empaques. Otro factor que influye en la carga térmica por cambio de aire, es la apertura de puertas, allí el aire caliente reemplaza al más frio y denso que se encuentra al interior, aumentando así la carga de refrigeración.
- Cargas varias: son provenientes de alumbrado y equipos eléctricos que funcionen en las inmediaciones del aire refrigerado, como motores eléctricos y ventiladores.

CICLO DE REFRIGERACION

Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor: El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, también llamado ciclo invertido de Carnot, parte del ciclo original de Carnot y es el resultado de cambiar una turbina por un dispositivo de expansión, (ver diagrama T vs s) trabajando de la siguiente manera:

- Proceso 4-3. Compresión isentrópica

El refrigerante entra al compresor como vapor saturado (4) y se comprime isentrópicamente hasta alcanzar la presión de condensación, durante ese proceso incrementa la temperatura del refrigerante hasta estar por encima de la de sus alrededores.

- Proceso 2-1. Rechazo de calor a presión constante

El refrigerante ingresa al condensador como vapor sobrecalentado (2), se condensa al intercambiar calor con los alrededores y sale como líquido saturado (1).

- Proceso 1-6. Expansión

Una vez sale del condensador, el refrigerante se expande en un dispositivo de estrangulamiento (por lo general es un tubo capilar en refrigeradores domésticos), producto de la expansión, la temperatura decrece hasta llegar por debajo de la temperatura del espacio refrigerado).

- Proceso 6-5. Absorción de calor a presión constante

El refrigerante entra al evaporador como mezcla liquido-vapor, allí se evapora completamente producto del intercambio de calor con el espacio refrigerado, permitiendo así, mantener una baja temperatura. El refrigerante sale como vapor saturado para dirigirse de nuevo al compresor.

Las diferencias entre un ciclo ideal y un ciclo real de refrigeración por compresión de vapor radican en las irreversibilidades del proceso. Para comenzar, en un ciclo real, el proceso de compresión no es isentrópico (es decir, no es adiabático ni internamente reversible) debido a la fricción y transferencia de calor en el compresor, por lo tanto la entropía puede aumentar o disminuir según las condiciones del proceso. Otro efecto que aparece en el ciclo real es que es muy difícil predecir si el refrigerante sale como líquido saturado del condensador, por lo tanto, es preferible diseñar el sistema para que salga ligeramente subenfriado (1), de igual manera, es difícil tener tal precisión en el sistema para asegurar que va salir del evaporador como vapor saturado, razón por la cual éste se diseña para que salga como vapor ligeramente sobrecalentado y evitar daños en el compresor (4). Por último, en sistemas de gran capacidad se consideran las pérdidas de presión producto de la fricción en las tuberías y caídas de presión en el evaporador y el condensador, que si bien son pequeñas, contribuyen a que el ciclo se aleje del modelo ideal, para sistemas de muy baja capacidad como refrigeradores domésticos, estas pérdidas son despreciables.

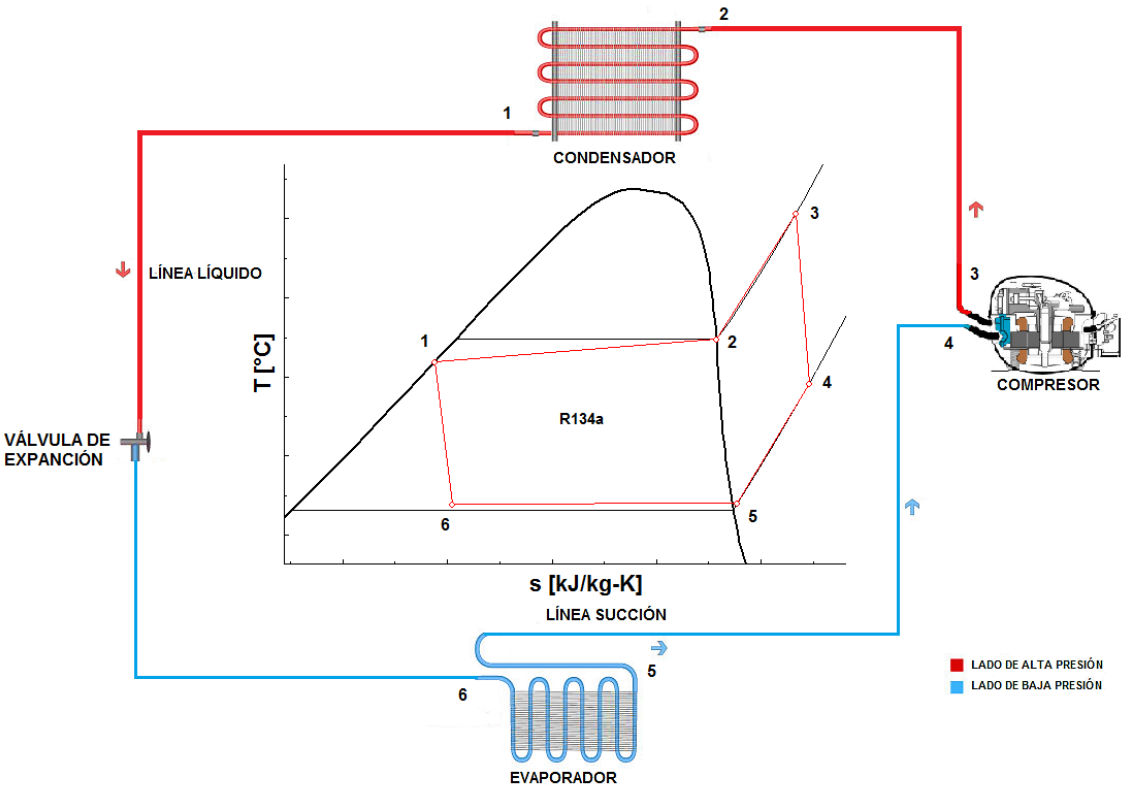


Diagrama esquemático y *T-S* para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.

COEFICIENTE DE OPERACIÓN (COP): El coeficiente de operación es un término análogo a la eficiencia energética en sistemas térmicos, representa el efecto deseado sobre la entrada requerida para lograr dicho efecto.

En refrigeración, el efecto deseado es refrigerar un espacio mediante un evaporador, y la entrada requerida es un trabajo eléctrico en un compresor.

Un criterio muy usado en refrigeración es que el COP mejora entre un 2 y 4 % por cada grado centígrado que incremente la temperatura de evaporación. De igual manera, el COP mejora entre un 2 y 4 % por cada grado centígrado que disminuya la temperatura de condensación [45].

INFORMACIÓN DE DESEMPEÑO DEL COMPRESOR: En refrigeración es común encontrar los datos de desempeño de los compresores tabulados en función de las temperaturas de evaporación y de condensación o también se encuentran ecuaciones

características que dependen igualmente de la temperatura de evaporación y de condensación y de constantes que varían según el parámetro que se quiera encontrar. Para el compresor TECUMSEH® TWB1380YLS instalado en el equipo didáctico la ecuación característica y los coeficientes para los diferentes parámetros se presentan a continuación:

$$\boldsymbol{valor = C_1 + C_2 * T_e + C_4 * T_e^2 + C_7 * T_e^3 + (C_3 + C_5 * T_e + C_8 * T_e^2) * T_c + (C_6 + C_9 * T_e) * T_c^2 + C_{10} * T_c^3}$$

Tabla 9. Coeficientes para el cálculo del rendimiento del compresor del refrigerador domestico

Coeficientes	Capacidad (Btu/h)	Potencia (Watt)	Corriente (Amperios)	Flujo Másico (Lb/h)
C1	3,22E+03	1,70E+02	1,92E+00	3,41E+01
C2	1,64E+02	7,93E+00	6,11E-02	1,79E+00
C3	-1,77E+00	5,02E+00	9,85E-02	1,15E-02
C4	3,65E+00	1,79E-01	2,07E-03	4,12E-02
C5	-4,21E-01	7,69E-03	1,87E-03	-3,21E-03
C6	-2,10E-01	-5,19E-02	-9,49E-04	-2,76E-03
C7	3,60E-02	2,66E-03	3,47E-05	4,25E-04
C8	-4,00E-03	9,18E-04	2,17E-05	-2,28E-05
C9	7,25E-04	1,05E-03	2,72E-06	5,87E-06
C10	1,20E-03	3,71E-04	5,55E-06	1,78E-05

MODELO DE CÁLCULO

- Método 1:

$$COP_1 = \frac{Calor\ absorbido\ en\ evaporador}{Trabajo\ en\ el\ compresor} = \frac{Q_L}{W_c} = \frac{\dot{m}\ (h_{Sal.\ Evap.} - h_{Ent.\ Evap.})}{W_c}$$

$$COP_1 = \frac{\dot{m}(h_6 - h_5)}{W_c}$$

El tubo capilar (dispositivo de expansión) es un dispositivo isoentálpico, por lo tanto la entalpia del refrigerante es igual a la entrada y a la salida, así:

$$h_{Sal.Cond} = h_{Ent.\ Cap} = h_{Sal.Cap} = h_{Ent.\ Evap.}$$

Por lo tanto;

$$h_{Ent.\ Evap} = h_{Sal.\ Cond.}$$

$$h_5 = h_1$$

$$COP_1 = \frac{\dot{m}(h_6 - h_1)}{W_c}$$

Cálculo del flujo másico $\dot{m}$:

El flujo másico se debe calcular de acuerdo a la ecuación característica y los coeficientes provistos por el fabricante que se encuentran en la

Tabla 9. Las temperaturas de evaporación y condensación T_e y T_c deben ingresarse en grados Celsius.

$$\dot{m}\ \left[\frac{lb}{h}\right] = C_1 + C_2 * T_e + C_4 * \mathrm{T_e^2} + \mathrm{C_7} * \mathrm{T_e^3} + (\mathrm{C_3} + \mathrm{C_5} * \mathrm{T_e} + \mathrm{C_8} * \mathrm{T_e^2}) * \mathrm{T_c} + (\mathrm{C_6} + \mathrm{C_9} * \mathrm{T_e}) * \mathrm{T_c^2} + \mathrm{C_{10}} * \mathrm{T_c^3}$$

Cálculo del trabajo del compresor W_c:

$$W_c = V_{medido} * I_{medida} * FP_{medido}$$

Según mediciones previas el FP está alrededor de 0,54.

- Método 2:

$$COP_2 = \frac{\dot{m}(h_{out\ evap} - h_{in\ evap})}{\dot{m}(h_{out\ comp} - h_{in\ comp})} = \frac{(h_6 - h_5)}{(h_3 - h_4)}$$

Como se menciona en el método uno, le entalpia tiene el mismo valor a la entrada y salida del tubo capilar, por lo tanto:

$$COP_2 = \frac{(h_6 - h_1)}{(h_3 - h_4)}$$

- Método 3:

De acuerdo a la ecuación y tablas de coeficientes del fabricante del compresor, se halla un valor de capacidad y de potencia consumida por el compresor en función de las temperaturas de evaporación y condensación. Ver ANEXO 2.

$$COP_3 = \frac{Capacidad}{Potencia}$$

$$T_{Evap} = T_{Sal.\ Evap.} = T_6$$

$$T_{Cond.} = T_{Sal.\ Cond.} = T_1$$

PROCEDIMIENTO

- El refrigerador didáctico debe estar encendido, desde ese momento se debe iniciar la toma de datos y registrarlos en el computador mediante el software SITRAD. (Ver ANEXO 2. Manual de uso del software SITRAD).
- Una vez terminada la toma de datos, analizar el comportamiento de las gráficas proporcionadas por el software SITRAD y calcular el COP por los tres métodos descritos en el modelo de cálculo.

DATOS Y RESULTADOS

- Presentar las gráficas de temperatura y presión en el tiempo tomadas con el software SITRAD® e identificar cada una de las variables medidas según la

siguiente tabla (para generar el informe gráfico y el informe de datos en formato ver el ANEXO 2):

TABLA CORRESPONDENCIA DE TEMPERATURAS Y PRESIONES			
Estación	**Temperatura en la estación**	**Temperatura dentro del ciclo**	**Ubicación del sensor**
Estación 1	Temperatura 1	T1	Temperatura Salida Condensador
	Temperatura 2	T2	Temperatura Entrada Condensador
	Temperatura 3	T3	Temperatura Salida Compresor
Estación 2	Temperatura 1	T4	Temperatura Entrada Compresor
	Temperatura 2	T5	Temperatura Salida Evaporador
	Temperatura 3	T6	Temperatura Entrada Evaporador
Estación 3	Temperatura 1	T7	Temperatura gabinete refrigeración
	Temperatura 2	T8	Temperatura gabinete congelación
	Temperatura 3	T9	Temperatura gabinete congelación
Estación 4	Presión Alta	-	Salida del compresor
Estación 5	Presión Baja	-	Entrada del compresor

- Tabular las siguientes propiedades termodinámicas tanto a la entrada como a la salida de los equipos que componen el ciclo de refrigeración (compresor, condensador, tubo capilar y evaporador) en un instante donde el cambio de las variables en el tiempo sea mínimo: Presión, Temperatura, Entalpía y Entropía.

  Se debe tener en cuenta que la presión en el condensador, la entrada del capilar y la salida del compresor se consideran iguales para este sistema de baja capacidad; de igual manera, la presión en el evaporador, la salida del capilar y la entrada del compresor se consideran las mismas.
- Calcular el COP por los tres métodos mencionados en el capítulo 3 y concluir de acuerdo a los resultados obtenidos.
- Graficar el diagrama T vs s y el diagrama P vs h en EES® con los datos obtenidos para el instante seleccionado.
- Hacer el análisis de resultados y conclusiones de la práctica de laboratorio.

MATERIALES Y EQUIPO

- Equipo de refrigeración doméstico, didáctico del centro de refrigeración y aire acondicionado.
- Computador equipado con el software SITRAD ®
- Pinza amperimetrica (analizador de redes).

Modelo de informe de laboratorio esperados de la práctica

En el Anexo 3 se puede encontrar un modelo del informe de laboratorio esperado para la práctica de refrigeración por compresión de vapor, como una guía de lo que debería entregar los alumnos cuando realizan práctica.

CONCLUSIONES

Se realiza la modificación de un refrigerador doméstico en un refrigerador didáctico partiendo de un diseño conceptual en el cual se seleccionan las variables de proceso que se desean medir y registrar en el equipo. Todas las modificaciones realizadas son modeladas previamente mediante CAD para posteriormente ser ejecutadas en el proceso de construcción; dichas modificaciones están orientadas a facilitar el proceso de aprendizaje en el tema de refrigeración por compresión de vapor y más específicamente en el ámbito doméstico, en el equipo se pueden observar elementos del circuito de refrigeración que no se pueden observar en un refrigerador domestico convencional; además, este equipo didáctico cuenta con un sistema de instrumentación que puede medir y registrar en un computador once variables de manera simultánea (nueve de temperatura y dos de presión) en tiempo real a través de la interfaz que provee el fabricante de la instrumentación.

El equipo dista de otros equipos didácticos, ya que no está montado sobre un banco de refrigeración, por el contrario, se conservan muchas de las configuraciones originales del equipo con el fin de que el estudiante conozca la ubicación de los mismos desde el proceso de fabricación.; además, cuenta con una interfaz que permite medir y registrar variables en tiempo real, dándole al estudiante una importante herramienta de análisis de las variables que intervienen en ciclo de refrigeración.

Se realiza una guía de laboratorio para el cálculo del coeficiente de operación para desarrollarla en el equipo de refrigeración didáctico, dicha guía incluye un manual de cómo realizar informes gráficos y de datos para dar una herramienta más de análisis durante y después de la práctica.

Por último, se entrega un modelo en CAD del refrigerador original y del refrigerador con sus modificaciones, con la posibilidad que se exporte a otro formato para realizar otro tipo de análisis como flujo de aire al interior de la nevera, cálculos de carga térmica, etc.

RECOMENDACIONES

El equipo didáctico basado en un refrigerador doméstico es útil en la función de enseñar a los alumnos los principios básicos de la refrigeración por compresión de vapor, pero puede ser muy útil para realizar otro tipo de prácticas en el CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y CALIDAD EN REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN por esto se hacen las siguientes recomendaciones con base en las posibilidades que abre este trabajo de grado.

- En el equipo se pueden realizar prácticas de carga y descarga de refrigerante, por lo que se sugiere que se elabore un guía práctica para el proceso de carga y descarga de refrigerante.
- Basados en el modelo en CAD del equipo se realicen estudios térmicos y de eficiencia con simulaciones computacionales.
- Se sugiere que se desarrollen prácticas de cálculos y mediciones de cargas térmicas en el equipo, las cuales puede facilitar a los estudiantes la compresión de este concepto y como afectan las eficiencias y el funcionamiento de los equipos de refrigeración.

REFERENCIAS

[1] "Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos para equipos domésticos de energía eléctrica y gas." [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/index.php/servicios-de-informacion/principales-indicadores.html.

[2] R. Chandra, *Refrigeration and air conditioning*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.

[3] "Early Days of Refrigeration." [Online]. Available: http://legacy.lclark.edu/~soan221/01wlc/AgTechnology/earlyfridge.html.

[4] "Historia del refrigerador." [Online]. Available: http://dam162.blogspot.com/2007/10/historia-del-refrigerador-datos.html.

[5] R. Aiza and N. Florez, "Diseño y montaje de una máquina productora de hielo en bloque para demostración del ciclo de refrigeración aplicado en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado," Universidad industrial de Santander, 2008.

[6] J. Martínez and C. Zambrano, "Diseño y construcción de un banco de pruebas para un sistema de refrigeración por compresión de vapor de 1HP de capacidad que usa refrigerante R404A, con variación del medio de transferencia de calor en el evaporador y del control de flujo de refrigerante," Escuela politécnica del ejército, 2011.

[7] C. D. Pérez-Segarra, J. Rigola, M. Sòria, and a. Oliva, "Detailed thermodynamic characterization of hermetic reciprocating compressors," *Int. J. Refrig.*, vol. 28, no. 4, pp. 579–593, Jun. 2005.

[8] C. Uribe, "Notas de clase (Uso racional de la energía)." Medellín, 2012.

[9] "La Fábrica del Frío." [Online]. Available: http://lafabricadelfrio.com/products/compresor-frigorifico-hermetico-tecumseh-r-404ar-507a-baja-temperatura-monofasicos-220240-v-50-hz-5238.aspx. [Accessed: 15-Apr-2015].

[10] B. Whitman, B. Johnson, J. Tomczyk, and E. Silberstein, *Tecnología de refrigeración y aire acondicionado*, 6th ed. Cengage Learning Editores, S.A., 2009.

[11] "MULTIFRIOS." [Online]. Available: http://multifriosenc.blogspot.com/2008_07_01_archive.html. [Accessed: 11-Jul-2015].

[12] B. Whitman, B. Johnson, J. Tomczyk, and E. Silberstein, *Refrigeration & Air Conditining Technology*, 6th ed. New York: Delmar Cengage Learning.

[13] “Sistemas de refrigeracíon.” [Online]. Available: www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r14190.DOC.

[14] “No Title.” [Online]. Available: http://www.lucas-nuelle.es/2274/pid/10710/apg/6036/Tubo-capilar-de-2,0m-enrollado-en-espiral----.htm. [Accessed: 14-Jul-2015].

[15] “Danfoss.” [Online]. Available: http://www.danfoss.com/Spain/Products/Categories/Group/RA/Electrically-Operated-Valves/AKVH-electric-expansion-valves-for-high-pressure-refrigerants/ef2b92e1-f4d3-4c0c-849d-adc36b242240.html. [Accessed: 11-Jul-2015].

[16] E. Pita, *Principios y Sistemas de Refrigeración*, 8th ed. Editorial Limusa, S.A.

[17] G. Eraso, “Refrigeración doméstica. Manual técnico.” [Online]. Available: http://www.emagister.com/curso-refrigeracion-domestica-manual-tecnico/evaporador-inundado-seco.

[18] “Esquema de evaporador de expansión seca.” [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Evaporador_de_expansi%C3%B3n_seca#/media/File:Esquema_evaporador_DX_1.jpg. [Accessed: 14-Jul-2015].

[19] R. Dossat, *Principios de Refigeración*, 2nd ed. Compañia Editorial Continental, S.A.

[20] Air Conditioning and Refrigeration Institute, *Refrigeration and Air Conditioning*. Prentice Hall, inc., 1979.

[21] “Club de la refrigeración.” .

[22] “Tech & House.” [Online]. Available: http://www.techandhouse.com/phs66ejsb.html. [Accessed: 19-Jul-2015].

[23] “Numbering Scheme for Ozone-Depleting Substances and their Substitutes.” [Online]. Available: http://www.epa.gov/ozone/geninfo/numbers.html. [Accessed: 14-Jun-2014].

[24] “Global Warming Potentials of ODS Substitutes.” [Online]. Available: http://www.epa.gov/ozone/geninfo/gwps.html. [Accessed: 14-Jun-2014].

[25] “DINAGAS, S.A.” [Online]. Available: http://www.dinagas.es/gases.htm. [Accessed: 12-Jul-2015].

[26] “NTC 4097. ARTEFACTOS REFRIGERADORES SIN ESCARCHA PARA USO DOMÉSTICO, REFRIGERADORES, REFRIGERADORES CON COMPARTIMIENTO PARA CONGELAR ALIMENTOS O ALMACENAR ALIMENTOS CONGELADOS, Y CONGELADORES DE ALIMENTOS QUE

UTILIZAN CIRCULACIÓN DE AIRE FORZADO. CARACTER.” Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, 2006.

[27] “EPICERE.” [Online]. Available: https://ephicere.wordpress.com/tag/residencial/. [Accessed: 12-Jul-2015].

[28] “No Title.” [Online]. Available: http://raa-beltran-munguia-bizmar.blogspot.com/2010/12/timer-o-temporizador.html. [Accessed: 14-Jul-2015].

[29] “Supco THE RIGHT CHICE.” [Online]. Available: http://www.supco.com/web/supco_live/products/SLT50.html. [Accessed: 28-Jun-2015].

[30] “WISEMOTION.” [Online]. Available: http://www.embraco.com/wisemotion/Default.aspx. [Accessed: 16-Jul-2015].

[31] C. R. Bradshaw, E. a. Groll, and S. V. Garimella, “Linear compressors for electronics cooling: Energy recovery and its benefits,” *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 7, pp. 2007–2013, 2013.

[32] Y. Liu, K. Chen, T. Xin, L. Cao, S. Chen, L. Chen, and W. Ma, “Experimental study on household refrigerator with diffuser pipe,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1468–1473, 2011.

[33] A. Borroto and I. Costa, “Incremento de eficiencia de los refrigeradores domésticos mediante mejoras en la transferencia de calor en el condensador,” 1999. [Online]. Available: http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo04.htm. [Accessed: 01-Jan-2001].

[34] W. J. Yoon, H. W. Jung, H. J. Chung, and Y. Kim, “Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer,” *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 1, pp. 216–224, 2011.

[35] M. . Söylemez and M. Ünsal, “Optimum insulation thickness for refrigeration applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 40, no. 1, pp. 13–21, 1999.

[36] W. J. Yoon, K. Seo, and Y. Kim, “Development of an optimization strategy for insulation thickness of a domestic refrigerator-freezer,” *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 3, pp. 1162–1172, 2013.

[37] R. W. Johnson, “The effect of blowing agent choice on energy use and global warming impact of a refrigerator,” *Int. J. Refrig.*, vol. 27, no. 7 SPEC. ISS., pp. 794–799, 2004.

[38] J. S. Kwon, C. H. Jang, H. Jung, and T. H. Song, “Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 23–24, pp. 5525–5532, 2009.

[39] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, and P. Chandrasekar, “Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 5, pp. 1036–1042, 2009.

[40] P. Binneberg, E. Kraus, and H. Quack, “Reduction In Power Consumption Of Household Refrigerators By Using Variable Speed Compressors.” International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2002.

[41] J. Choi, Y. Kim, and J. T. Chung, “An empirical correlation and rating charts for the performance of adiabatic capillary tubes with alternative refrigerants,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 29–41, 2004.

[42] J. Choi, Y. Kim, and H. Y. Kim, “A generlized correlation for refrigerant mass flow rate through adiabatic capillary tubes,” *Int. J. Refrig.*, vol. 26, no. 8, pp. 881–888, 2003.

[43] E. Björk and B. Palm, “Performance of a domestic refrigerator under influence of varied expansion device capacity, refrigerant charge and ambient temperature,” *Int. J. Refrig.*, vol. 29, no. 5, pp. 789–798, 2006.

[44] J. Boeng and C. Melo, “Mapping the energy consumption of household refrigerators by varying the refrigerant charge and the expansion restriction,” *Int. J. Refrig.*, vol. 41, pp. 37–44, 2014.

[45] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, 6th ed. Mc Graw Hill, 2009.

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DE LAS OPCIONES DE INSTRUMENTACIÓN EVALUADAS.

Opción 1. PROVEEDOR A

Temperatura

PT100

- Longitud del bulbo 1".
- Diámetro del bulbo 1/4", cable 2 m.
- Rango -50°C – 460°C

Presión

Transmisor de presión SIEMENS 7MF1565-3CB00-1GA1

- Rango 0-1600 kPa (0 – 16bar).
- Presión de sobrecarga 4000 kPa (40 bar).
- Salida digital 4-20 mA. Conexión a dos cables
- Conexión al proceso 1/2 ", 14 NPT macho.
- Fuente 7-33 VDC.

Transmisor de presión SIEMENS 7MF1565-3CA00-1GA1

- Rango 0-1000 kPa (0 – 10 bar).
- Presión de sobrecarga 2500 kPa 0- 25 bar).
- Salida digital 4-20 mA. Conexión a dos cables
- Conexión al proceso 1/2 ", 14 NPT macho.
- Fuente 7-33 VDC.

Sistema de adquisición de datos

PLC UNITRONICS V130-33-TR20

- 12 entradas digitales, 2 entradas análogas (corriente/voltaje) y 3 entradas HSC/Shaft enconder.
- 6 salidas de relé.
- 2 npn de alta velocidad (2 PTO).
- Display grafico LED.
- Puerto RS232/RS485 incorporado.
- Puerto opcional serial o Ethernet.
- Puerto opcional para comunicación CANbus
- Comunicación MODBUS maestro-esclavo.
- Fuente de 24 VDC.
- Módulo de expansión para 4 entradas PT100 IO-PT4.

Opción 2. PROVEEDOR B

Temperatura

PT 100. Fabricante: KELVIN. Cuatro unidades.

- Longitud del bulbo 1".
- Diámetro del bulbo 5/16", cable 2 m.
- Rango -50°C – 460°C.

Presión

Transmisor de presión HUBA Pressure Sensor 510. Dos unidades.

- Rango 0-2000 kPa (0 – 20 bar).
- Presión de sobrecarga 6000 kPa (60 bar).
- Salida digital 4-20 mA. Conexión a dos cables
- Conexión al proceso 1/4 ", NPT macho.
- Fuente 8-33 VDC.
- Temperatura de proceso -40°C – 85°C.

Sistema de adquisición de datos

NOVUS myPCLAB. Dos unidades.

- Dos entradas analógicas para termocuplas J,K,T,E,N,R,S,B,PT100, 0-10 VDC, 0-50 mVDC, 4-20 mA.
- Tasa de adquisición 8-128 muestras por segundo, dependiendo de la resolución.
- Una entrada digital: pulsos de tensión o contacto.
- Sensor interno de temperatura ambiente.
- Conexión USB, conector mini- B, protocolos ASCII y MODbus RTU.
- Software Windows para configuración, visualización, registro y exportación de datos. Permite comunicación simultánea con múltiples módulos myPCLAB.

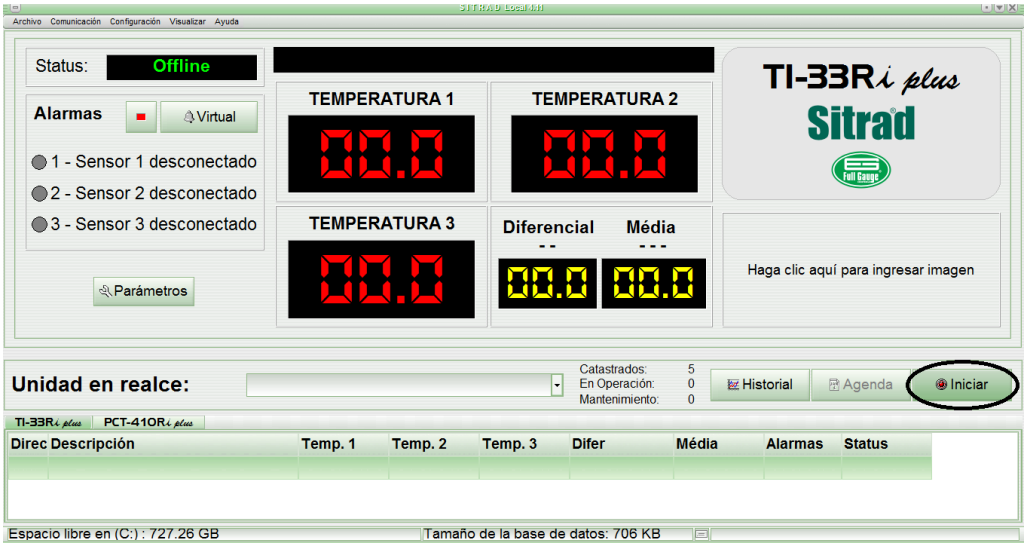
ANEXO 2

MANUAL DE USO DEL SOFTWARE SITRAD.

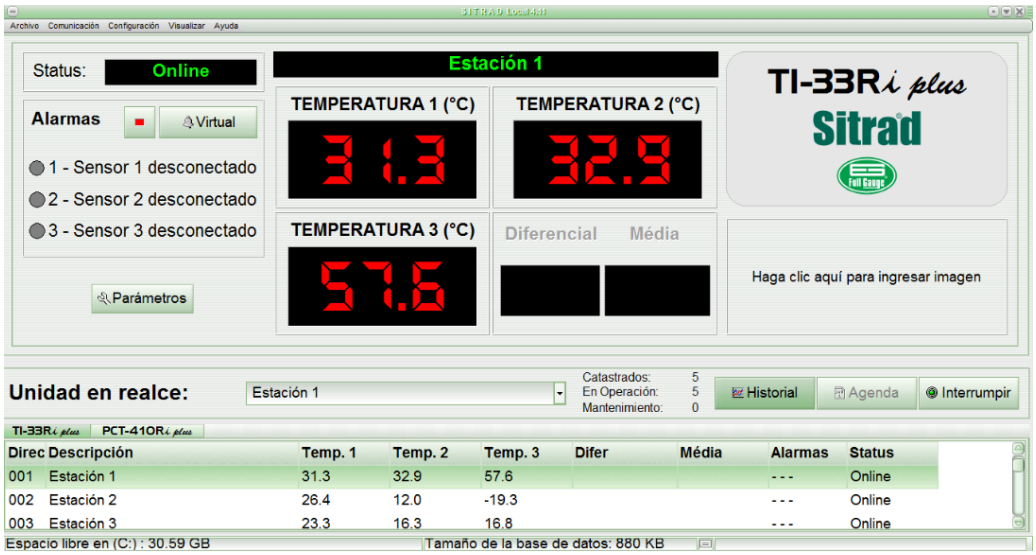
INICIACIÓN DEL SOFTWARE SITRAD LOCAL 4.11

Una vez instalado el software SITRAD LOCAL 4.11 de distribución gratuita (http://www.sitrad.com/es/atualizacao.asp?acao=cadastro&acao_d=atualizar&email=) en el computador, se debe conectar vía USB con el equipo INTERFAZ SERIAL CONV 32.

Al abrir el SITRAD, se encuentra la siguiente pantalla principal:



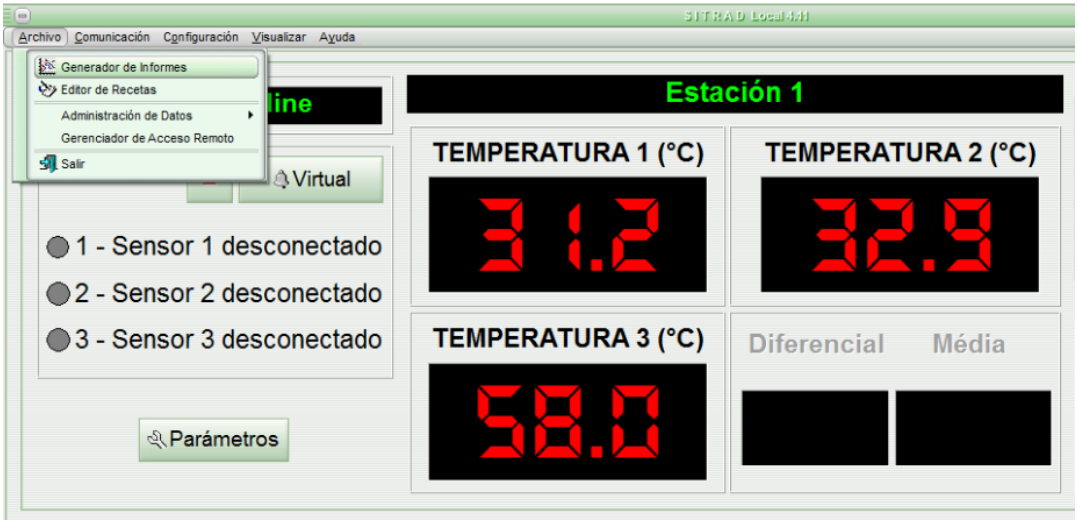
Se debe hacer clic sobre el botón iniciar para iniciar la visualización de las variables en la pantalla del computador, donde se muestran las 5 estaciones de trabajo y las mediciones correspondientes a cada estación.



GENERAR UN INFORME GRÁFICO

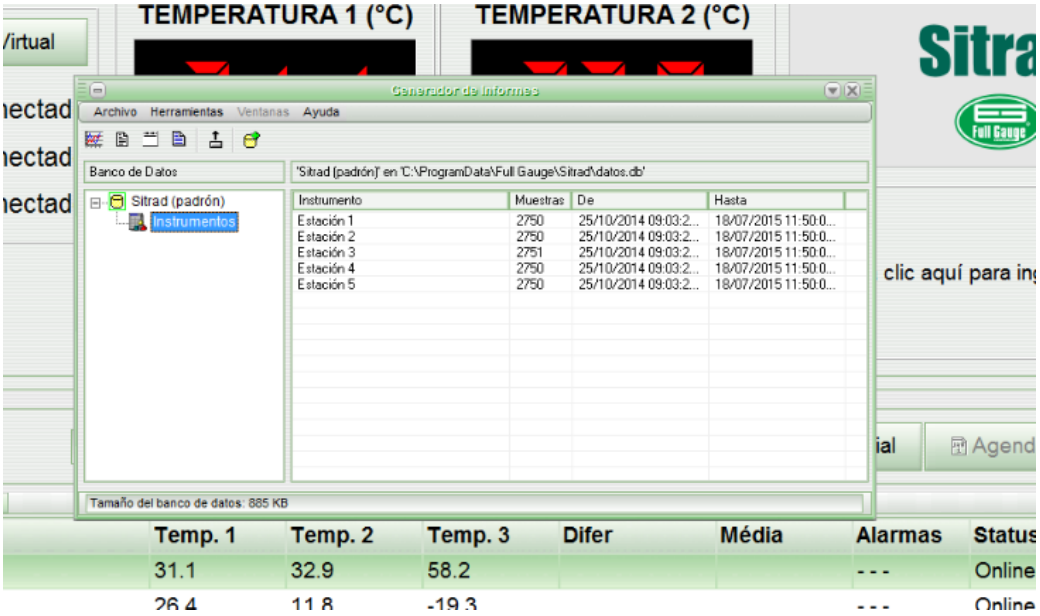
Para la visualización de todas las mediciones en una gráfica de manera simultánea se debe seguir el siguiente procedimiento que consiste en generar un informe gráfico:

1. Iniciar la visualización de variables en el SITRAD LOCAL 4.11 como se explica en el procedimiento inmediatamente anterior.
2. Hacer clic en la pestaña archivo y luego en la opción generador de informes.

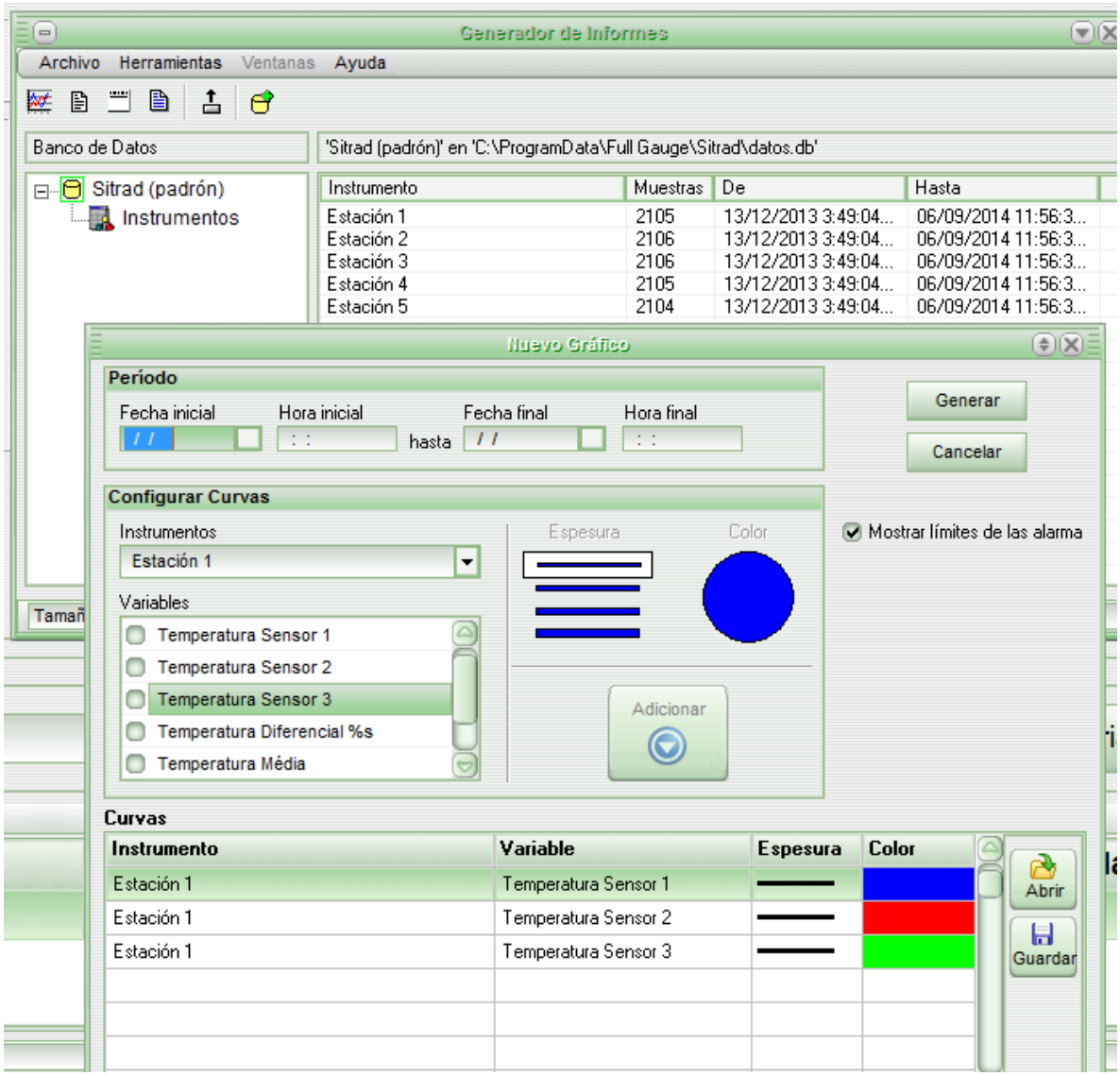


3. Al abrir la opción generador de informes, aparece una ventana flotante como que se muestra en la imagen. En dicha ventana se muestran las estaciones de

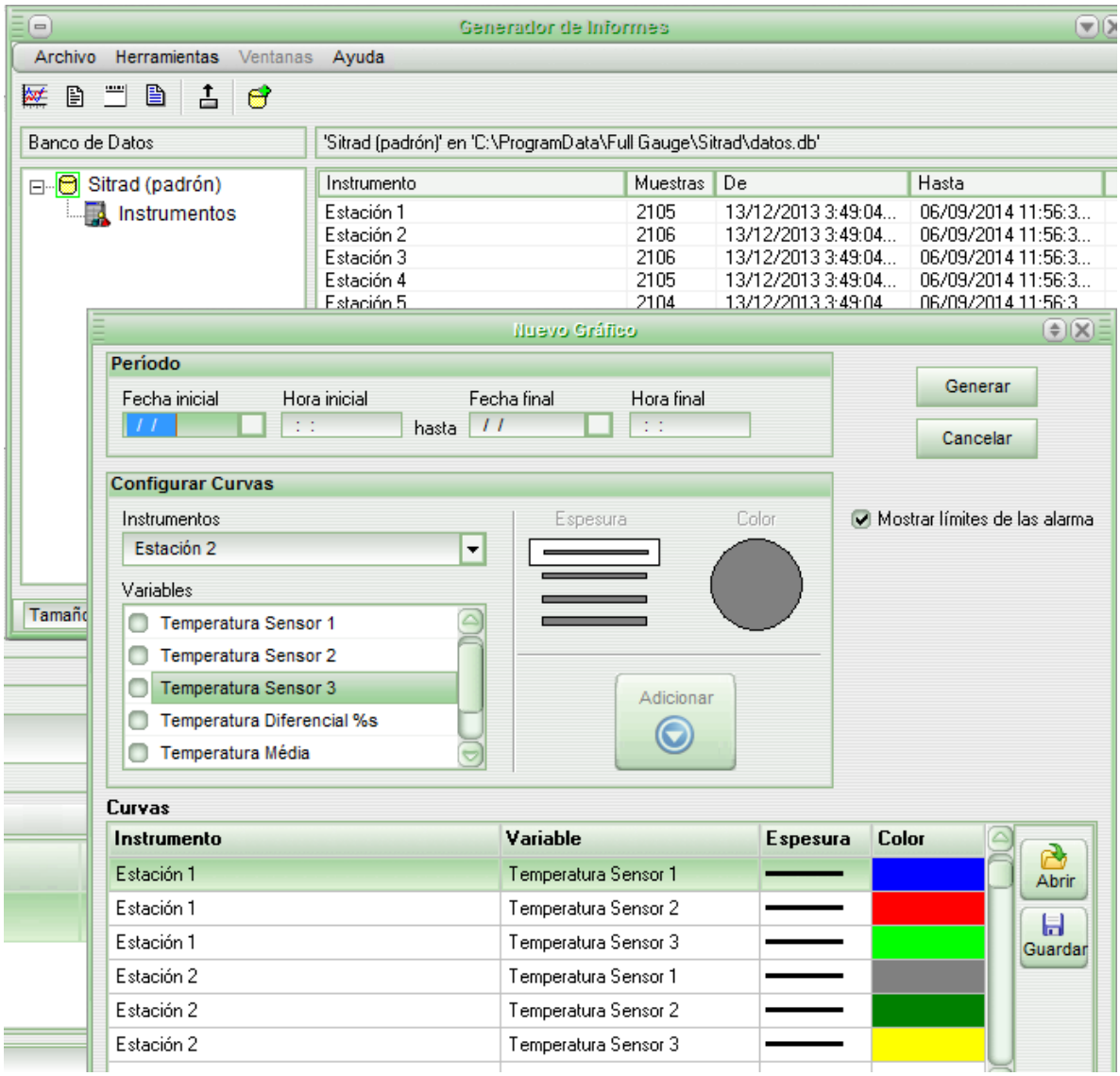
medición que actualmente están conectadas a la interfaz. Se debe adicionar una por una al generador de informes.



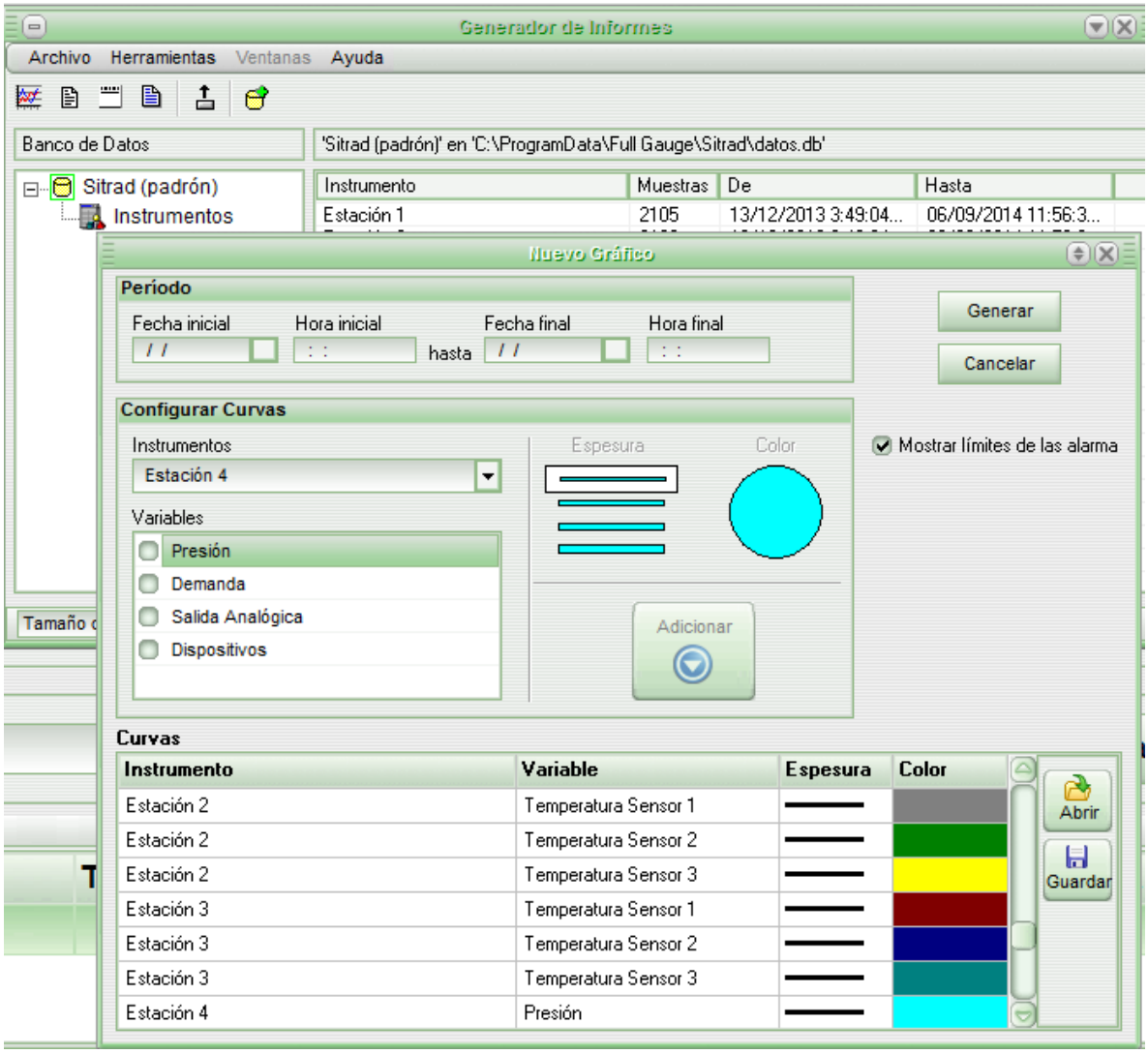
4. Adicionar la estación de medición uno (Estación 1) haciendo doble clic, al hacerlo se abre la siguiente ventana flotante. Allí se debe ingresar la fecha y hora inicial y final en cual se va a realizar la visualización de datos y la temperatura de sensor uno, dos y tres de dicha estación de medición. Una vez se hayan seleccionado, se hace clic sobre el botón adicionar.



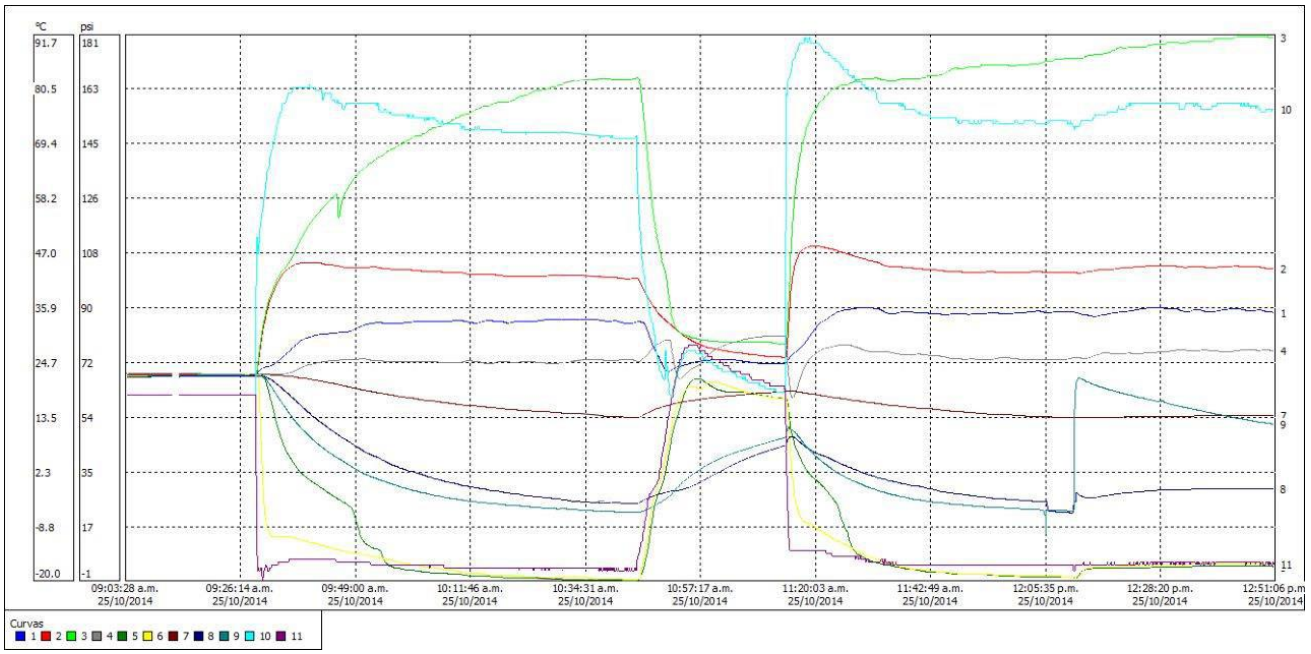
5. Una vez se haya adicionado la estación uno, se procede con la siguiente estación desplegando la pestaña de selección y seleccionando la estación dos (Estación 2). Se debe realizar el mismo procedimiento para la estación tres (Estación 3).



6. Las tres estaciones de medición de temperatura (correspondientes a la medición de nueve temperaturas) ya están adicionadas al informe. El siguiente procedimiento es adicionar las presiones (correspondientes a las estaciones 4 y 5). Se debe seleccionar la estación cuatro, y activar la opción presión del menú desplegable. Se debe realizar este mismo procedimiento para la estación de medición número cinco.



7. Cuando se tengan todas las estaciones de medición preparadas para el informe, así como los rangos de fecha y hora, se hace clic sobre el botón generar. Se va a abrir una ventana que contiene una gráfica donde se va a observar el comportamiento de cada una de las variables seleccionadas con respecto al tiempo. Dicha grafica se ve de la siguiente manera:



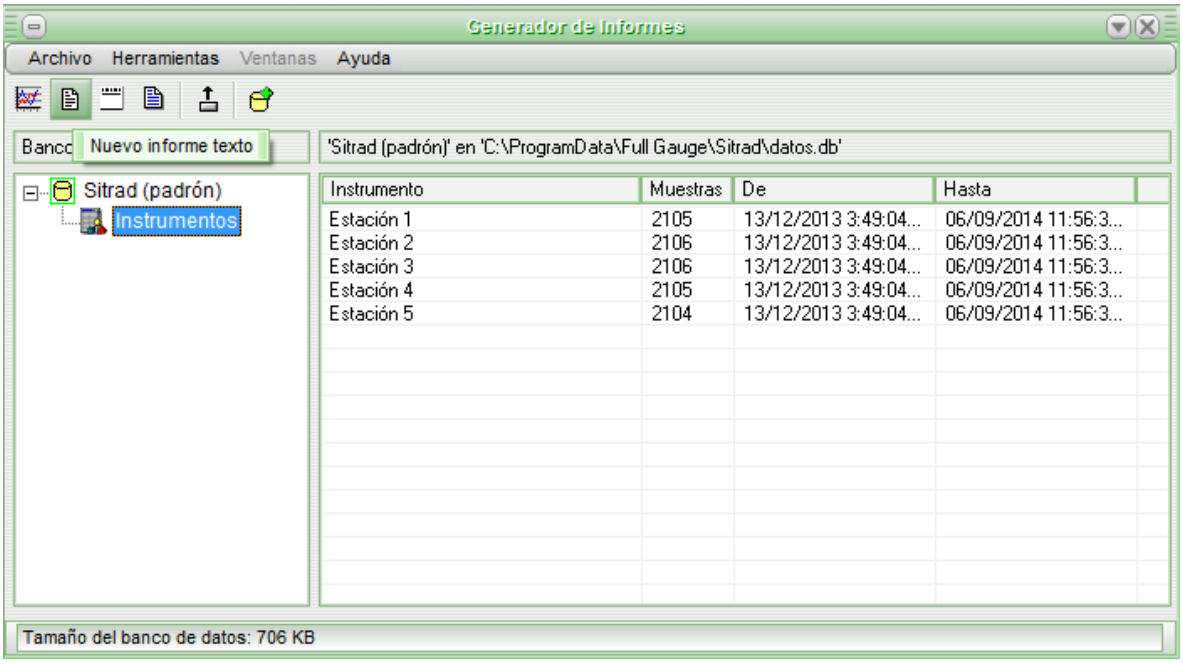
Las dos columnas de datos del lado izquierdo corresponden a las escalas de medición (Grados centígrados para la temperatura y PSI para la presión). La columna de números de la parte derecha de la gráfica corresponde a cada una de las variables que estamos midiendo (once en este caso, nueve temperaturas y dos presiones.)

GENERACION DE INFORME DE DATOS EN FORMATO .csv

Para la generacion de informe de datos en formato .CSV se debe realizar el siguiente procedimiento.

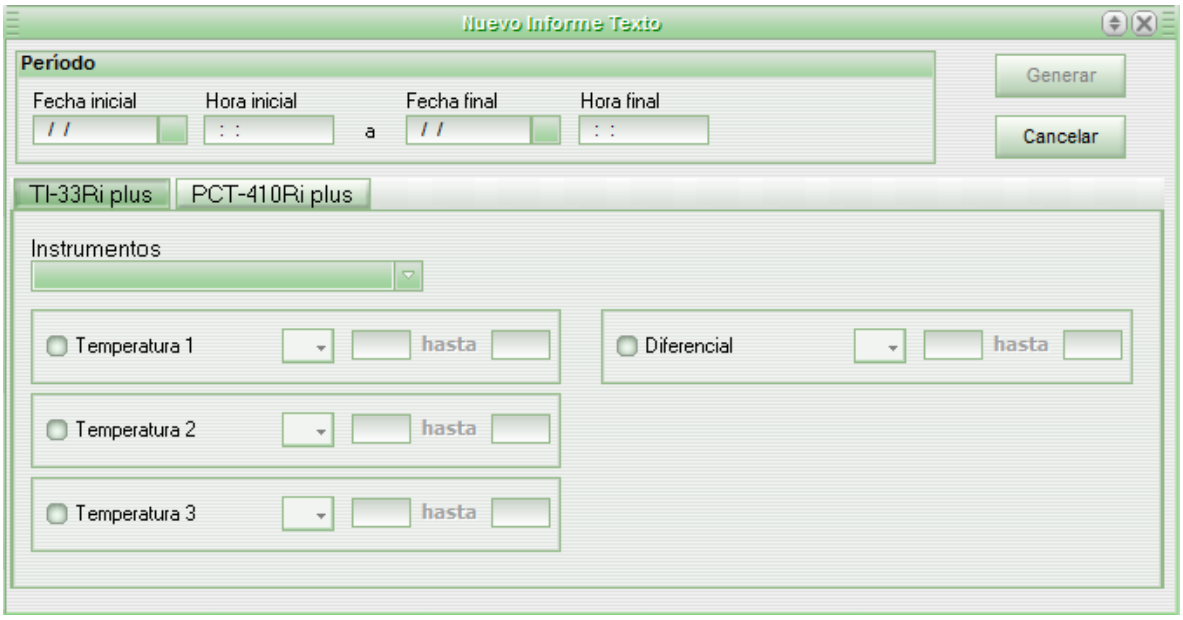
1. En la pestaña archivo seleccionamos la opcion generador de informes.

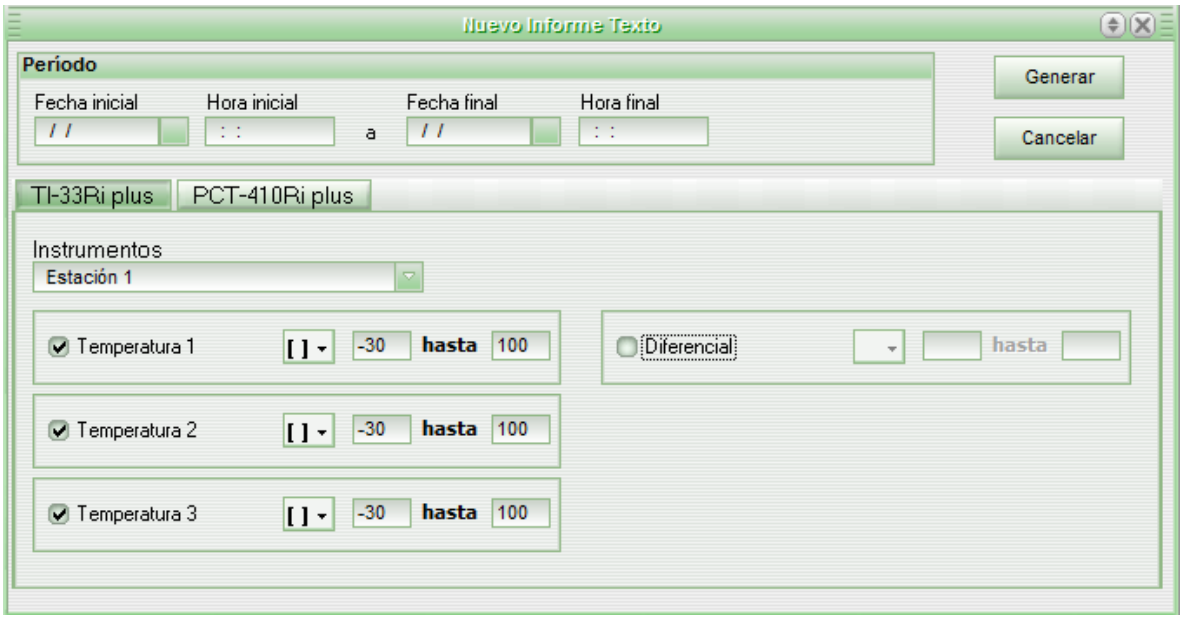
2. Al abrir el generador de informes, aparece una ventana flotante como la que se muestra en la imagen. Allí se selecciona la opción nuevo informe de texto.



3. En la ventana flotante del generador de informe de texto, lo primero que debemos ingresar es el rango de fecha y hora en el cual se va a general informe. Acto seguido se selecciona la estación de medición uno en pestaña desplegable

‘Instrumentos’ y se activan los mediciones de la temperatura uno, dos y tres de dicha estación. AL seleccionar las temperaturas, se habilitan los cuadros de los rangos de medición, para el caso de temperatura ingresamos un rango de -30°C hasta 100°C. Este procedimiento se repite para las estaciones de medición dos y tres.





4. Una vez seleccionadas las temperaturas para la generación del informe, se deben activar las presiones. Para ello, abrimos la pestaña ‘PCT – 410 Ri plus’. Se abre la estación cuatro en la pestaña desplegable ‘Instrumentos’ y se activa la medición de presión con un rango de -10 PSI hasta 200 PSI. Se realiza el mismo procedimiento para la estación de medición cinco.

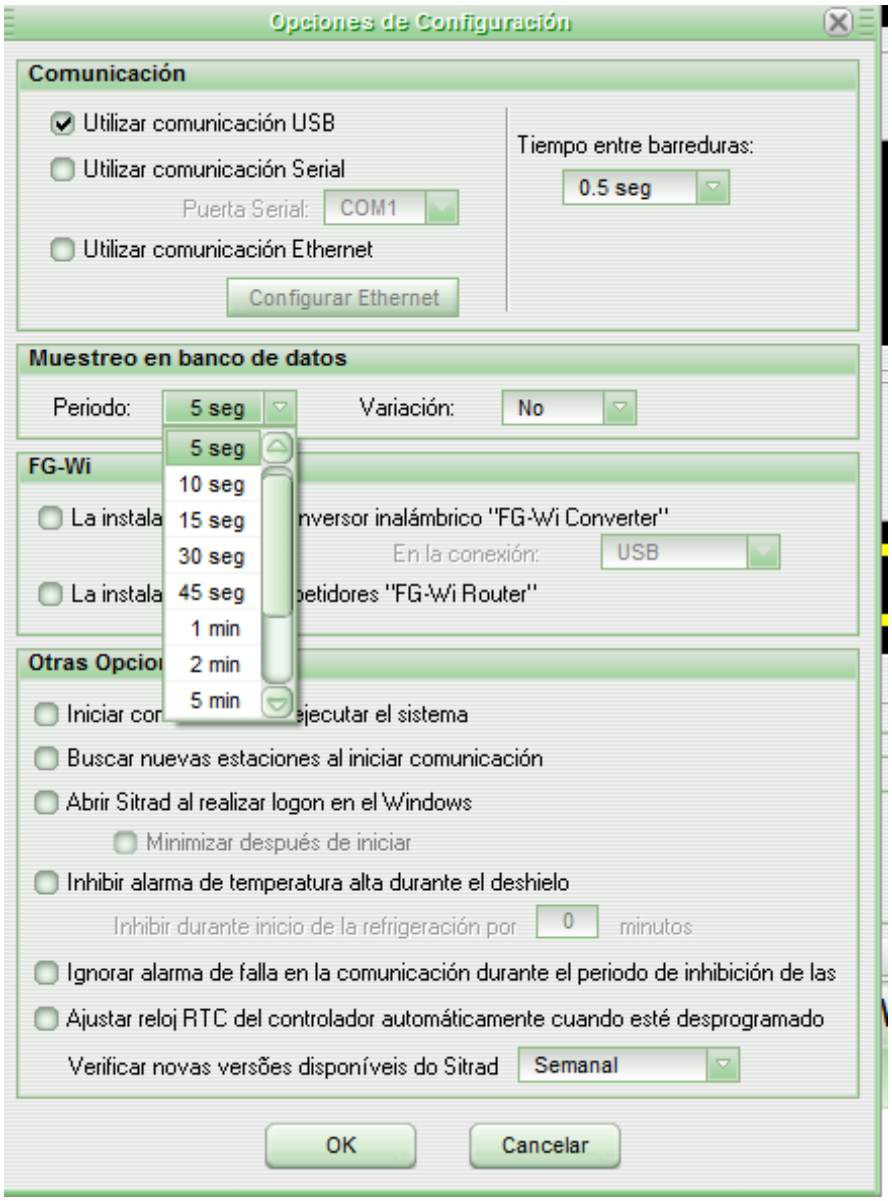
5. Una vez activas todas las estaciones, con sus respectivas mediciones y rangos, se da clic en el botón generar la ventana generador de informe de texto. Automáticamente se descarga un archivo en formato .CVS.

CAMBIAR EL PERIODO DE MUESTREO DE DATOS EN SITRAD LOCAL 4.11

Procedimiento para cambiar el periodo de muestreo de datos en SITRAD LOCAL 4.11

1. En la pantalla principal hacer clic sobre la pestaña ‘configuración’ y luego en la opción ‘opciones’.

2. En la opción periodo, se hacer clic en el menú desplegable y seleccionar un tiempo de muestreo. (El tiempo de muestreo recomendado para la práctica de laboratorio es cinco segundos).


Opciones de Configuración
Comunicación
Utilizar comunicación USB
Utilizar comunicación Serial
Puerta Serial:
COM1
Utilizar comunicación Ethernet
Configurar Ethernet
Tiempo entre barreduras:
0.5 seg
Muestreo en banco de datos
Periodo:
5 seg
Variación:
No
5 seg
10 seg
15 seg
30 seg
45 seg
1 min
2 min
5 min
FG-Wi
nversor inalámbrico "FG-Wi Converter"
En la conexión:
USB
etidores "FG-Wi Router"
Otras Opcio
ejecutar el sistema
Buscar nuevas estaciones al iniciar comunicación
Abrir Sitrad al realizar logon en el Windows
Minimizar después de iniciar
Inhibir alarma de temperatura alta durante el deshielo
Inhibir durante inicio de la refrigeración por
0
minutos
Ignorar alarma de falla en la comunicación durante el periodo de inhibición de las
Ajustar reloj RTC del controlador automáticamente cuando esté desprogramado
Verificar novas versões disponíveis do Sitrad
Semanal
OK
Cancelar

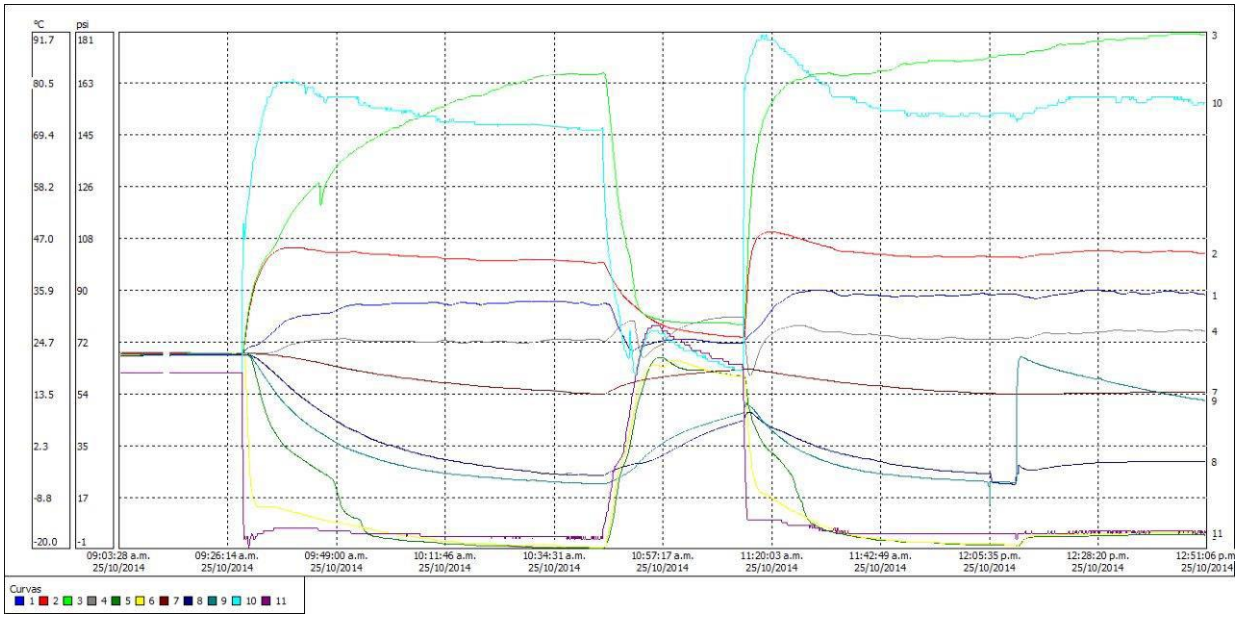
ANEXO 3

INFORME ESPERADO DE LA PRÁCTICA DE REFRIGERACIÓN.

INFORME DE LABORATORIO DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR Y REFRIGERACION DOMESTICA

Mediciones experimentales en estado estable.

Graficas de temperatura y presión en el tiempo



Se toma el instante 12:51:06p.m para el análisis del COP, ya que la mayoría de variables tienen un cambio mínimo respecto al tiempo.

Punto	Ubicación	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	Temperatura Salida Condensador	35,9	1136,0
2	Temperatura Entrada Condensador	44,3	1136,0
3	Temperatura Salida Compresor	92,0	1136,0
4	Temperatura Entrada Compresor	27,6	129,0
5	Temperatura Salida Evaporador	-18,0	129,0
6	Temperatura Entrada Evaporador	-18,4	129,0

Cálculo del COP por los métodos mencionados

Método 1: $\boldsymbol{COP = \frac{Calor\ absorbido\ en\ evaporador}{Trabajo\ en\ el\ compresor} = \frac{Q_L}{W_c}}$

$$COP = \frac{\dot{m}(h_5 - h_6)}{W_c}$$

Cálculo de entalpias:

$$h_5 = h\ @\ T_{Sal.\ Evap.}\ , P_{Baja}$$

$$h_5 = h\ @\ T = -18°C\ , P = 129\ kPa \qquad h_5 = 240{,}2\frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = \ h_1 = h\ \ @\ T_{Sal.\ Cond.}\ , P_{Alta}$$

$$h_6 = \ h_1 = h\ @\ T = 35{,}9°C\ , P = 1136\ kPA \qquad h_6 = h_1 = 102{,}2\frac{kJ}{kg}$$

Cálculo de flujo másico:

Del catálogo del compresor se obtiene la siguiente ecuación. Las temperaturas de evaporación y condensación T_e y T_c deben ingresarse en grados Celsius.

$$\dot{m}\ \left[\frac{lb}{h}\right] = C_1 + C_2 * T_e + C_4 * \mathrm{T_e^2} + \mathrm{C_7} * \mathrm{T_e^3} + (\mathrm{C_3} + \mathrm{C_5} * \mathrm{T_e} + \mathrm{C_8} * \mathrm{T_e^2}) * \mathrm{T_c} + (\mathrm{C_6} + \mathrm{C_9} * \mathrm{T_e}) * \mathrm{T_c^2} + \mathrm{C_{10}} *\ \mathrm{T_c^3}$$

Y se utilizan los siguientes coeficientes para el cálculo

C1	3,41E+01
C2	1,79E+00
C3	1,15E-02
C4	4,12E-02
C5	-3,21E-03
C6	-2,76E-03
C7	4,25E-04
C8	-2,28E-05
C9	5,87E-06
C10	1,78E-05

$$\dot{m} = 12{,}21\,\frac{lb}{h} = 0{,}00112\,\frac{kg}{s}$$

Cálculo del trabajo del compresor

$$W_c = V_{medido} * I_{medida} * FP_{medido}$$

$$W_c = 123{,}17\,V * 3{,}31\,A * 0{,}534 = 218\,W = 0{,}218\,k$$

$$COP = \frac{0{,}00112\,\frac{kg}{s} * \left(240{,}2\,\frac{kJ}{kg} - 102{,}2\,\frac{kJ}{kg}\right)}{0{,}218\,kW} = 0{,}72$$

Método 2: $\boldsymbol{COP = \frac{\dot{m}(h_{out\ evap} - h_{in\ evap})}{\dot{m}(h_{out\ comp} - h_{in\ comp})}}$

$$COP = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_3 - h_4)}$$

Cálculo de entalpias:

$$h_5 = h \ @ \ T_{Sal.\ Evap.}\ , P_{Baja}$$

$$h_5 = h \ @ \ T = -18{,}4°C\ , P = 129\ kPa \qquad h_5 = 240{,}2\frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = \ h_1 = h \ @ \ T_{Sal.\ Cond.}\ , P_{Alta}$$

$$h_6 = \ h_1 = h \ @ \ T = 35{,}9°C\ , P = 1136\ kPA \qquad h_6 = h_1 = 102{,}2\frac{kJ}{kg}$$

$$h_3 = h \ @ \ T_{Sal.\ Comp.}\ , P_{Alta}$$

$$h_3 = h \ @ \ T = 92°C\ , P = 1136\ kPa \qquad h_3 = 325\frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = h \ @ \ T_{Ent.\ Comp.}\ , P_{Baja}$$

$$h_4 = h \ @ \ T = 27{,}6C\ , P = 129\ kPA \qquad h_4 = 278{,}1\frac{kJ}{kg}$$

$$COP = \frac{\left(240{,}2\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 102{,}2\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{\left(325\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \ 278{,}1\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)} = 2{,}93$$

Método 3: $\boldsymbol{COP = \frac{Capacidad}{Potencia}}$

Datos:

$$T_{evaporacion} = \ -18{,}4°C$$

$$T_{condensacion} = 35{,}9°C$$

De acuerdo a las tablas y la ecuación que provee el fabricante del compresor, los valores de capacidad y potencia son:

$$Capacidad = 1149{,}25\frac{Btu}{h} = \ 0{,}337\ kW$$

$$Potencia = 179{,}55W = 0{,}179\ kW$$

$$COP = \frac{0{,}337\ kW}{0{,}179\ kW} = \ 1{,}88$$

Tabla de valores de temperatura, presión, entalpia y entropía a la entrada y salida de condensador, compresor y evaporador.

Punto	Ubicación	Temperatura [°C]	Presión [kPa]	Entalpia [kJ/kg]	Entropía [kJ/kg K]
1	Temperatura Salida Condensador	35,9	1136,0	102,2	0,375
2	Temperatura Entrada Condensador	44,3	1136,0	273,2	0,914
3	Temperatura Salida Compresor	92,0	1136,0	325,0	1,067
4	Temperatura Entrada Compresor	27,6	129,0	278,1	1,091
5	Temperatura Salida Evaporador	-18,0	129,0	240,2	0,955
6	Temperatura Entrada Evaporador	-18,4	129,0	102,2	0,408

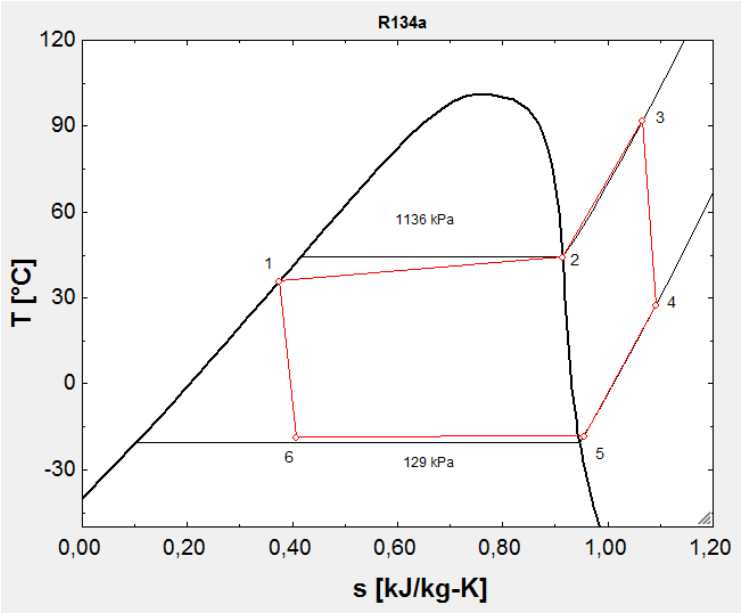


Diagrama T vs s elaborado en EES. Hecha por los autores.

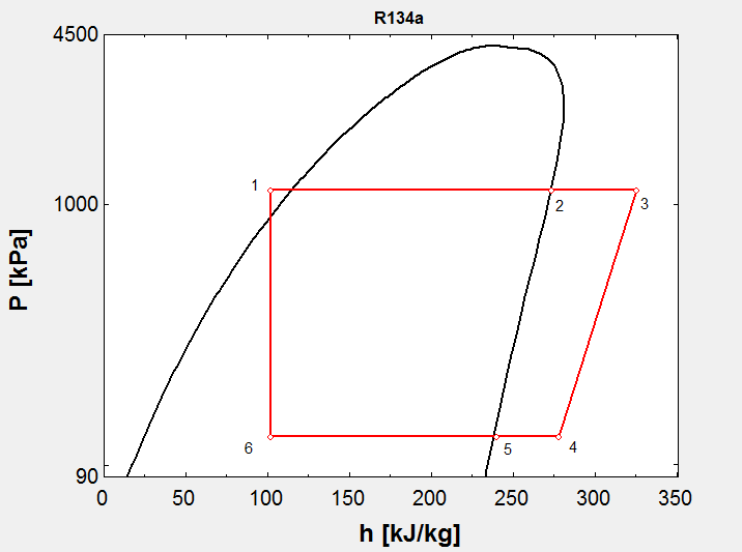


Diagrama P vs h elaborado en EES. Hecha por los autores.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- El método 1 para calcular el COP contempla la energía eléctrica total entregada al compresor antes de que una parte de la energía sea utilizada para mover el mecanismo interno y otra parte se disipe como calor, perdidas en el devanado del

motor eléctrico y perdidas mecánicas y de fricción, adicionalmente este método contempla la ganancia de calor del refrigerante en el evaporador.

- El cálculo del COP por el método 2 contempla los estados del agente refrigerante a la entrada y salida del compresor y del evaporado, por lo que las pérdidas de calor y fricción generadas por el compresor no son tenidas en cuenta el cálculo, lo que reduce la diferencia de entalpias en el compresor haciendo que el COP sea mayor.
- El método 3 para el COP contempla relaciones empíricas que son tomadas en laboratorios en condiciones controladas por parte del fabricante del compresor, con valores de sobrecalentamiento y subenfriamiento que pueden variar de los valores encontrados en la práctica, tampoco contempla el tipo de evaporador instalado en el sistema de refrigeración.
- En el diagrama T vs s se puede evidenciar que el sobrecalentamiento del refrigerante a la entrada del compresor es muy elevado y generara que el sistema sea menos eficiente.
- De los tres métodos de cálculo usados para el COP del refrigerador, el método 1 es el más acertado y cercano a la realidad porque contempla las pérdidas y ganancias de sistema de refrigeración.