

Instrumentación de un Refrigerador Doméstico para El Análisis del Comportamiento de las Variables de Presión y Temperatura de Operación

Instrumentation of a household refrigerator for behavior analysis for the variables pressure and temperature of operation

Nelson Jara¹, Fran Reinoso¹, Cesar Isaza², Lourdes Jara³, Álvaro Aguinaga⁴, Telmo Moreno⁵

1 Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación Optimización y Toma de Decisiones GID-STD, Universidad Politécnica Salesiana, njara@ups.edu.ec, freinoso@ups.edu.ec

2 Grupo de Investigación en Refrigeración y Aire Acondicionado, Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, cesar.isaza@upb.edu.co

3 Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, lourdes.jara@ucuenca.edu.ec

4 Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

5 Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica del Chimborazo, tmoreno@epoch.edu.ec

Recibido: 21-06-2017. Aceptado después de revisión: 12-09-2017

Resumen: Por el alto consumo de energía eléctrica que representa el uso de un refrigerador doméstico en los hogares, debido fundamentalmente a una de sus partes principales como es el compresor, se estableció la necesidad de analizar el comportamiento termodinámico a fin de conocer sus condiciones de operación, por lo que en este artículo se presentan los resultados del comportamiento de la presión a la salida del compresor y de la temperatura del compartimiento de congelación de un sistema de refrigeración doméstico, obtenidos en base a la medición minutil de dichas variables durante un periodo de operación de 6 horas. Esto se ha conseguido a través de la instrumentación de un refrigerador/congelador de 234 litros de volumen total que trabaja con refrigerante R134a. Además se ha analizado la influencia de la condición on/off del compresor en las variables de presión y temperatura medidas. Se ha verificado que una vez que el compresor se enciende, la temperatura del congelador desciende hasta un mínimo de -20.7°C en 90 minutos, temperatura a la que el compresor se apaga. El tiempo promedio para un nuevo encendido del compresor es de 7 min. En cuanto a los valores de presión a la salida del compresor se observa una variación entre 0.9 y 14.67 bar, los cuales están influenciados por el estado on/off del compresor. Concluyendo que el consumo energético del refrigerador está en función directa del de los rangos de temperatura de operación, carga térmica y la frecuencia de apertura y cierre de las puertas del refrigerador.

Palabras claves: Instrumentación, Refrigerador doméstico, Sistema de compresión de vapor.

Abstract: Due to the high consumption of electric energy that represent the use of a domestic refrigerator in homes, due mainly to one of its main parts such as the compressor, it was established the need to analyze the thermodynamic behavior in order to know its operating conditions, so in this article presents mainly the results of the temperature behavior of the freezing compartment and the pressure at the compressor outlet of a domestic refrigeration system, obtained on the basis of the minutil measurement of said variables during a period of operation of 6 hours. This has been achieved through the instrumentation of a 234 liter total volume refrigerator / freezer that works with R134a refrigerant. In addition, the influence of the on / off condition of the compressor on the measured temperature and pressure variables has been analyzed. It has been verified that once the compressor is switched on, the freezer temperature drops to -20.7°C in 90 minutes, at which temperature the compressor switches off. The average time for restarting the compressor is 7 min. As for the pressure values at the output of the compressor, a variation between 0.9 and 14.67 bar is observed, which are influenced by the on / off state of the compressor. Concluding that the energy consumption of the refrigerator is a direct function of the operating temperature ranges, thermal load and the frequency of opening and closing refrigerator doors.

Keywords: Instrumentation, Domestic refrigerator, Vapor Compression System.

1. Introducción

Para conservar los alimentos en condiciones óptimas para el consumo humano, se debe considerar principalmente dos factores, el primero hace relación al tiempo de almacenamiento, mismo que podría ser motivo de investigación para países como el Ecuador a fin de elaborar normas generales que podrían utilizarse tanto para el almacenamiento como para la congelación de alimentos de acuerdo a las condiciones ambientales que posea y el producto a conservar [1] y el segundo se refiere a la temperatura adecuada, por lo que analizar datos sobre las temperaturas de los refrigeradores domésticos en cada uno de sus compartimentos es esencial, valores que pueden ser determinados mediante una medición directa en cada uno de los espacios del refrigerador a través de una instrumentación, que permita establecer la distribución real de temperaturas del refrigerador doméstico.

Por otro lado el refrigerador doméstico al ser un equipo de uso continuo representa un alto consumo a nivel domiciliario, por lo que ha sido preocupación de varios países en implementar planes y programas que lleven a la población a utilizar equipos más eficientes [2].

En la literatura se puede encontrar muchos estudios en torno a la mejora de la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración doméstica, en donde se plantean propuestas que perfeccionan su funcionalidad, llevándolos a presentar disminuciones en el consumo de energía eléctrica a través de la optimización de sus componentes y la utilización de refrigerantes amigables con el medio ambiente principalmente [3]. Con respecto a la optimización de los componentes, uno de los estudios analizados presenta un nuevo ciclo de refrigeración que utiliza un eyector, con el que se ha podido reducir las pérdidas termodinámicas consiguiendo una reducción del consumo energético del 5,45% [4], por otro lado, la utilización de un método adaptativo para descongelar el evaporador de un sistema de refrigeración doméstica, presenta una reducción del consumo de energía hasta un 13% [5]; desde el punto de vista medio ambiental, operar un refrigerador con refrigerantes hidrocarburos como el HC 600a, como sustitutos del HFC 134a, ha registrado ligeros ahorros de energía y una mejora en la capacidad de enfriamiento y carga del refrigerante [6] [7].

Es importante considerar también que con una correcta utilización de estos electrodomésticos se puede conseguir ahorros en el consumo de energía, ya que por los intercambios de calor propios del funcionamiento se ven afectados por la temperatura ambiente en donde operan, la posición inadecuada en la cocina, por la excesiva apertura y cierre de las puertas y una regulación inadecuada del termostato, se ha verificado incrementos considerables en el consumo eléctrico [8].

En términos generales, los resultados de las investigaciones antes mencionadas, mostraron una disminución en el consumo de energía, cuidado al medio ambiente y una estabilización en los valores de temperatura de los compartimentos, para ello se ha recurrido a la determinación de la presión y temperatura como variables principales del funcionamiento del sistema de refrigeración a través de su instrumentación.

1.1 Variables termodinámicas

Es importante indicar que los refrigeradores domésticos están compuestos por dos compartimentos aislados uno de enfriamiento y otro de congelación en el que se manejan temperaturas de 3°C y -18°C respectivamente; para lograr estas temperaturas, el refrigerador doméstico utiliza un sistema de refrigeración por compresión de vapor [9].

Las variables termodinámicas que se consideran en este estudio, son de tipo intensivas las cuales no dependen de la cantidad de sustancia o del tamaño del sistema, por lo que cuyo valor permanece inalterable al subdividir el sistema inicial en varios subsistemas, dado este concepto las propiedades termodinámicas a ser estudiadas son la presión y la temperatura [10].

En un refrigerador doméstico es común encontrar diferentes compartimentos para conservar o congelar los productos. Dichos compartimentos y por lo tanto, los refrigeradores se clasifican en función de las temperaturas que puedan alcanzar. Para el caso de las temperaturas de almacenamiento de alimentos congelados, se clasifican de acuerdo a su valor (ver Tabla 1) [11].

Tabla 1 Clasificación de los refrigeradores por la temperatura del compartimento de congelación [11]

Compartimiento	Temperatura (°C)
*	- 6
**	- 12
***	- 18

La temperatura típica de operación del evaporador de tubo liso con aletas, que se relaciona con una temperatura del espacio refrigerado de -15°C está entre -23°C y -25°C , para el caso de una construcción de tiro forzado, la temperatura en el evaporador se encuentra entre -20°C y -23°C [12].

La temperatura típica de operación del condensador, especialmente los de tiro natural, están diseñados para condensar el refrigerante entre 10°C a 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 [12].

La temperatura típica de operación del compresor, varía de acuerdo a su capacidad y el tipo de refrigerante, generalmente opera a temperaturas superiores a los 43°C [12].

Para el caso de la presión en sistemas de refrigeración domésticos, básicamente se presentan dos tipos de presión, una hace referencia a la línea de alta presión que va desde la descarga del compresor hasta el dispositivo de expansión y la otra se refiere a 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 las partes constitutivas del sistema de refrigeración, muchas veces se asume que la presión es constante en cada línea [12].

La presión típica de operación del evaporador para alcanzar temperaturas del ambiente refrigerado del orden de -15°C , para el caso de un evaporador de tubos con aletas, es de 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 [12].

Cave recalcar que las presiones en el evaporador varían según el tipo de refrigerante y las temperaturas del ambiente refrigerado.

La presión típica de operación del 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 [12].

El sistema de refrigeración por compresión de vapor está constituido principalmente por el compresor, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador (ver Figura 1).

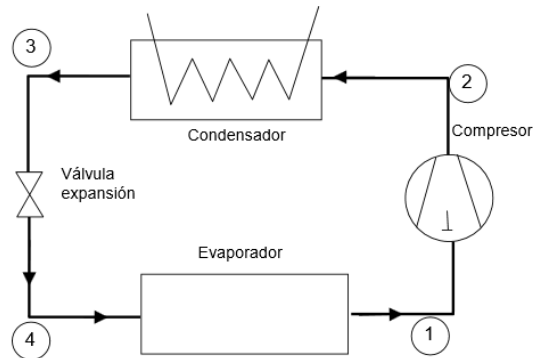


Figura 1. Ciclo de compresión de vapor [10].

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor está conformado por 4 procesos, (ver Figura 2), los cuales se explican a continuación:

- Proceso 1-2, el refrigerante entra al compresor como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador en el estado 1, la temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica, hasta un valor bastante superior a la temperatura del medio circundante, después el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado en el estado 2.
- Proceso 2-3, el refrigerante en estado de vapor-sobrecalentado entra en el condensador en el proceso 2 y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores, la temperatura del refrigerante en este estado se mantendrá por encima de la temperatura de los alrededores.
- Proceso 3-4, el refrigerante líquido saturado en el estado 3 se estrangula hasta la presión del evaporador al pasarlo por una válvula de expansión o por un tubo capilar, la temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso.
- Proceso 4-1, en el estado 4 el refrigerante entra al evaporador como un vapor húmedo de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado, el refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, completando el ciclo [10].

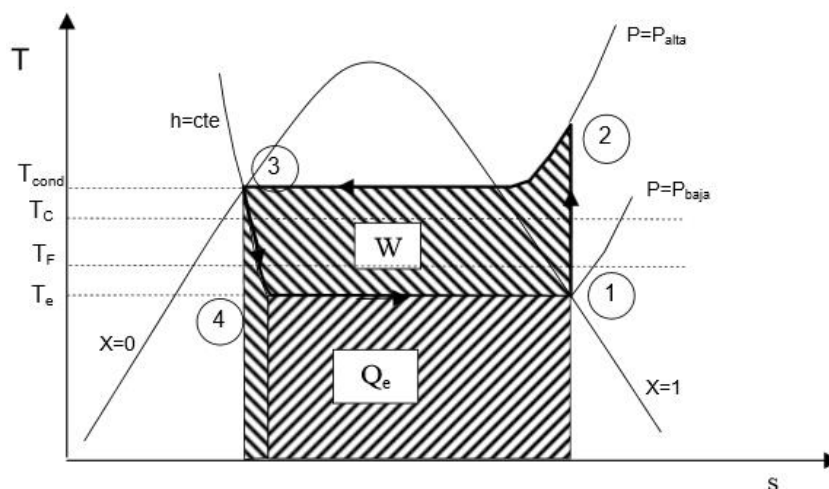


Figura 2. Diagrama T-s del ciclo de compresión de vapor [10].

El ciclo de compresión de vapor real presenta pérdidas de presión en el condensador y el evaporador, la entrada al compresor puede estar por encima de la temperatura de vapor saturado, la salida del condensador puede estar por debajo de la temperatura de líquido saturado, en la Figura 3 se puede observar estas particularidades.

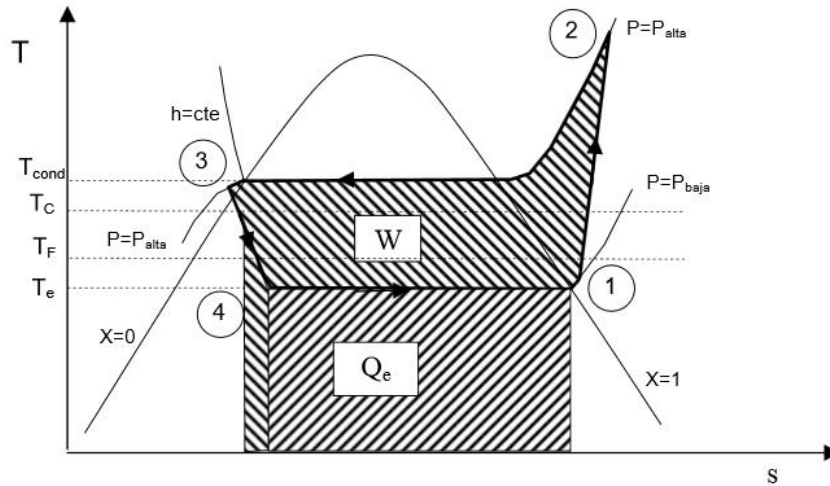


Figura 3. Diagrama real T-s del ciclo de compresión de vapor [10].

1.2 Estado del arte

Instrumentar un sistema de refrigeración permite monitorear, llevar registro y hasta controlar las diferentes variables, como la presión y la temperatura que intervienen en el proceso; en este sentido, un trabajo de investigación analizado, en el que de manera experimental obtienen el rendimiento del sistema de refrigeración en términos de capacidad de refrigeración, trabajo del compresor y coeficiente de operación (COP), mediante la medición de la temperatura, presión y caudal del refrigerante. Para la construcción del banco de pruebas en referencia al trabajo mencionado, se consideró la ubicación adecuada de 8 sensores de temperatura, 4 de presión y uno para medir frecuencia [13].

En la Figura 4 se puede observar la ubicación de cada uno de los sensores en el sistema de refrigeración doméstico instrumentado.

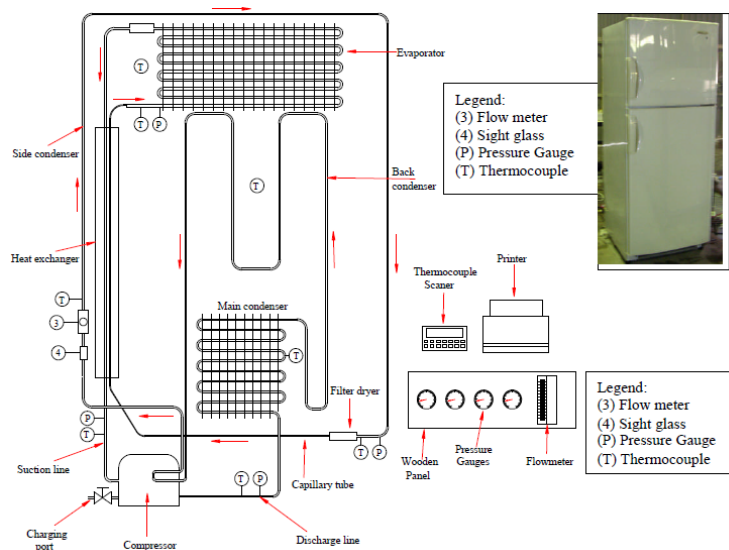


Figura 4. Esquema de la ubicación de los sensores utilizados en la instrumentación del refrigerador doméstico [13].

Por otro lado en otra investigación, se ha verificado los resultados sobre la utilización de nuevos refrigerantes en refrigeración doméstica [14], dicha investigación se centran en someter el nano-refrigerante TiO₂-R600a en un refrigerador domestico que utiliza R600a. El aparato experimental fue construido de acuerdo con la Norma Nacional de China (GB / T 8059.1-3-1995), y fue sometida a prueba, para ello el refrigerador fue colocado en un ambiente con temperatura controlada de 25°C ± 0,5°C y una velocidad de flujo de aire menor a 0,25 m/s, como se aprecia en la Figura 5.

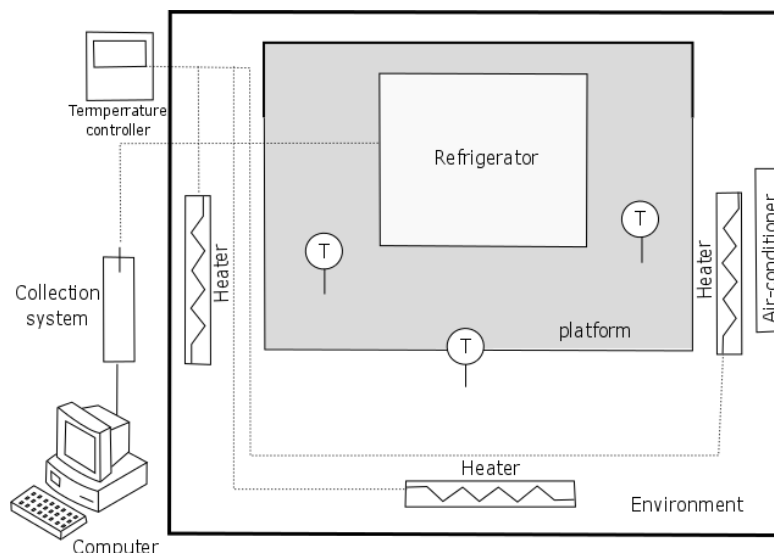


Figura 5. Esquema de banco de pruebas para para determinar el rendimiento de un refrigerador doméstico [14].

Para la medición de las variables termodinámicas los autores optaron por conectar 19 termopares y 3 transductores de presión, que fueron colocados en el evaporador, condensador, salida e ingreso del motor y los dispositivos de expansión, la disposición detallada de la instrumentación se ilustran en la Figura 6 [14].

Los resultados indicaron que el TiO₂-R600a representa un mejor rendimiento para el refrigerador doméstico en comparación con aquel que utilice refrigerante R600a en estado puro, esto se demostró mediante la variación de la cantidad de fluido de trabajo, estableciendo valores de 0.1 y 0.5 g/l de TiO₂-R600a, con los que se consiguió ahorros de 5,94% y 9,60% en el consumo de energía respectivamente y además se consiguió elevar la velocidad de congelación del sistema [14].

Otros trabajos realizados en el área de la refrigeración doméstica, que involucran en sus desarrollos experimentales la instrumentación de algunas partes del sistema, han sido claves para la demostración de distintas hipótesis, como es el caso de un trabajo en el que se demuestra que los coeficientes de transferencia de calor de condensación disminuyen con la reducción de la calidad de vapor que manejan y se incrementan con el aumento del flujo másico utilizando una calidad de vapor constante [15]. En otro trabajo se demuestra que la mezcla de refrigerantes hidrocarburos propano/butano en cantidades de 60%/40% es la mejor alternativa para sustituir al refrigerante R134a, para ello se instrumenta al refrigerador para obtener fundamentalmente los valores de las temperaturas y presión del refrigerante a la entrada y salida del compresor [16]. Así mismo en otra investigación se demuestra una disminución en el consumo de energía eléctrica de un refrigerador doméstico, al utilizar un tubo difusor en el sistema de refrigeración [17].

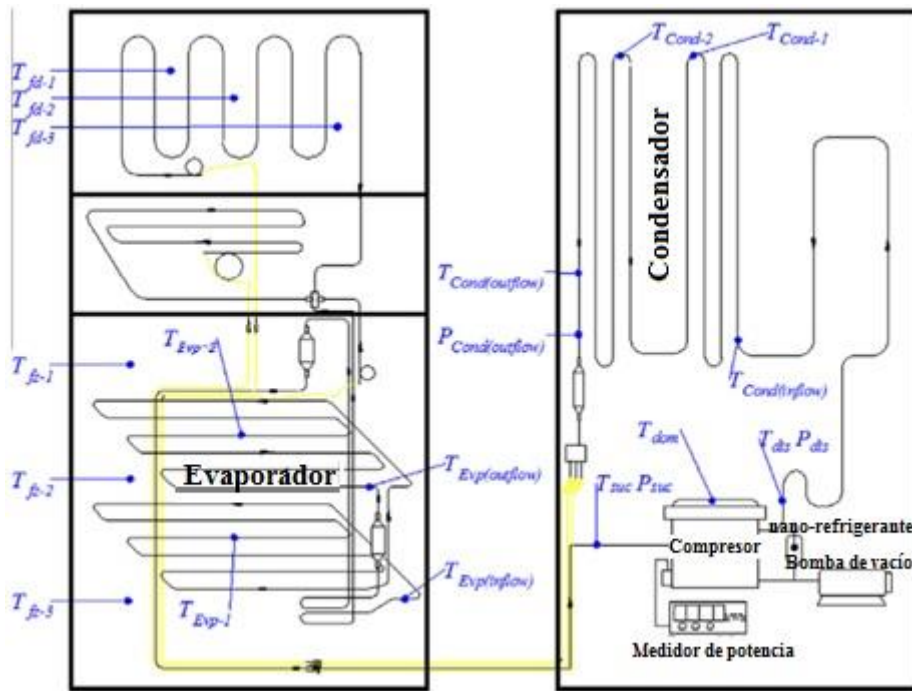


Figura 6. Esquema de refrigerador domestico instrumentado [14].

2. Materiales y métodos

2.1 Refrigerador doméstico a instrumentar.

En la Figura 7 se puede observar el refrigerador domestico que se instrumentó, mismo que es de la marca Ecasa, modelo Boreal 212 y tiene un volumen de 234 L. En la Tabla 2 se explica las características generales del equipo.

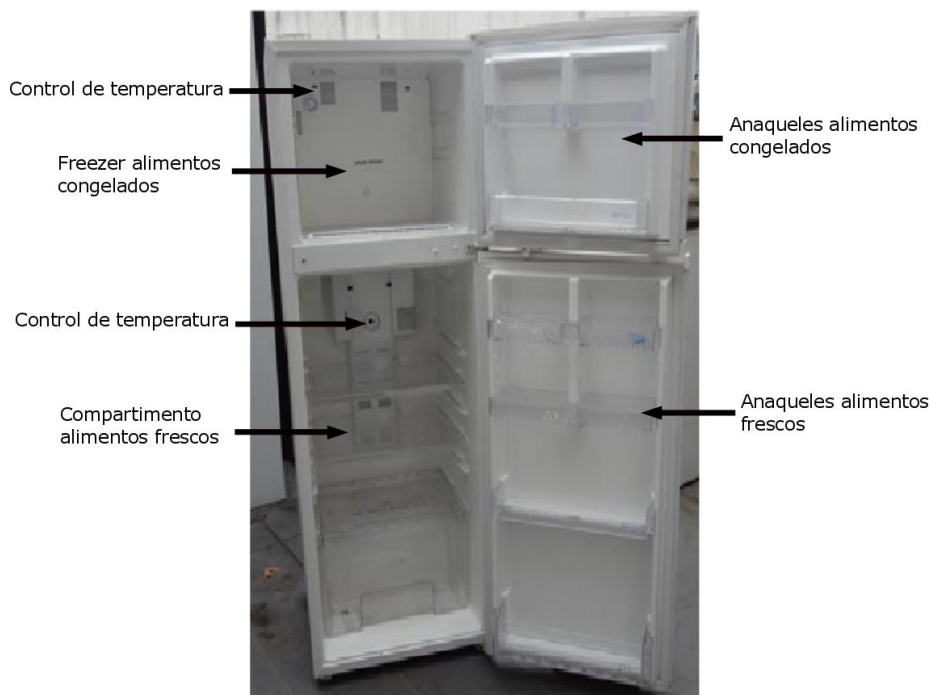


Figura 7. Refrigerador domestico a instrumentar. Fuente Autor

Tabla 2 Características del refrigerador BOREAL 212 [18].

Artefacto:	Refrigerador No frost
Volumen total:	234 litros
Consumo de energía:	335kWh/año
Cap. de Congelamiento:	4.3kg/24h
Refrigerante:	125gr de R134a
Dimensiones:	1562x550x620 mm
Consumo de Energía:	Tipo A
Clase de clima:	Subtropical

2.2 Instrumentación del refrigerador doméstico.

Para la posterior instalación de los sensores en la línea de proceso del ciclo de refrigeración se construyó el diagrama de instrumentación y proceso (ver Figura 8), 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 [19].

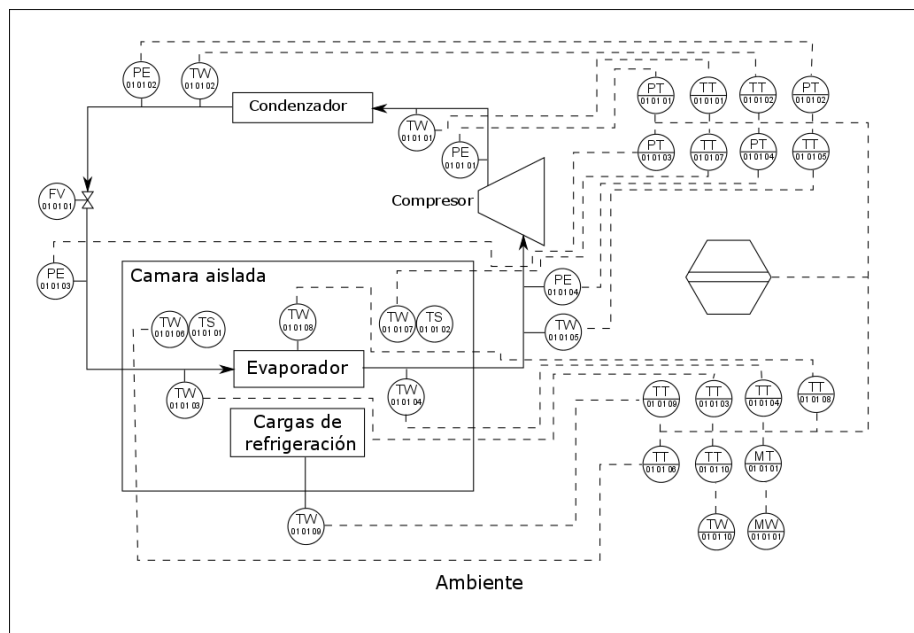


Figura 8. Diagramas P&ID de la instrumentación del refrigerador doméstico. Fuente Autor.

Una vez establecido el diagrama de instrumentación y determinado los rangos de presión y temperatura que se medirán en cada uno de los componentes del sistema de refrigeración, se procedió a seleccionar cada uno de los sensores.

Para la selección de los sensores de presión se analizó diferentes marcas bajo los siguientes criterios:

- Campo de aplicación
- Rango de medida
- Señales de intensidad y tensión
- Alimentación
- Temperatura de operación

En función de lo mencionado se seleccionó el transductor de presión JUMO “Midas C08”, de acuerdo a los datos técnicos de la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones técnicas transductor de presión JUMO “Midas C08” Adaptado de [20].

Datos Técnicos	
Campo de aplicación	de Líquido, gas
Principio de medición	de Célula de medida piezorresistiva (membrana cerámica)
Rango de medida	-1...15 bar
Señal de intensidad	de 4...20 mA
Señal de tensión	1...5 VDC
Alimentación	8...30 VDC
Temp. de operación	-20...+125°C

Para la búsqueda y selección de la mejor opción en el instrumento de medida de temperatura, primero se identificó dos tipos de sondas, las que nos permite la instalación directa en la red del sistema, y las de instalación en las cargas térmicas, para ello se analizaron diferentes marcas bajo los siguientes criterios:

- Rango de temperatura del refrigerante
- Rango de temperatura de las cargas térmicas

En función de lo mencionado se seleccionó el sensor de temperatura para el refrigerante R-134a, al termo resistor JUMO 902550, que trabaja en un rango de temperaturas de -50 a 260 °C y cuenta con una tecnología de termo resistencia; de igual manera se seleccionó al termo resistor JUMO 902830, que trabaja en un rango de temperaturas de -50 a 200 °C y cuenta con una tecnología de termo resistencia. Estos sensores se pueden montar en cada uno de los puntos por contacto directo.

Para el proceso de adquisición de datos de los sensores de presión y temperatura, se procedió con la selección de la Tarjeta “DAQ”, tomando en cuenta los requerimientos de los instrumentos.

Considerando las alternativas que nos presenta el mercado en la actualidad sobre este tipo de tarjetas y considerando los parámetros que se solicita, además del costo, la mejor alternativa es el sistema de adquisición de datos arduino, ya que brinda una interfaz de programación amigable con la PC y una velocidad alta en la transferencia de datos, similares a PLC’s de alta tecnología, en la Figura 9 se puede observar esta tarjeta.



Figura 9. DAQ MEGA 2560 [21].

Otro de los aspectos técnicos, que se requiere para la instrumentación, es contar con un medidor de humedad relativa del aire y temperatura, el mismo que representa las condiciones en las cuales los datos de los sensores fueron obtenidos, y sobre todo permite obtener una referencia patrón para los sensores de temperatura.

Considerando la funcionalidad que nos brinda el dispositivo, se procedió con la selección del transductor, que de acuerdo con los requerimientos fue seleccionado el transductor higrotérmico 00656969 de la marca JUMO (ver Figura 10).



Figura 10. Transductor higrotérmico 907020 [22].

2.3 Montaje del sistema

Para la instalación de los sensores de presión (ver Figura 11), se realizó un corte en las líneas que distribuyen el refrigerante R134a del ciclo de refrigeración y mediante acoples tipo “T” con rosca NPT 1/2”, montados mediante soldadura, se colocaron dichos sensores [19].

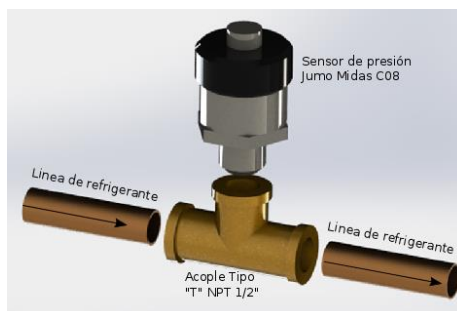


Figura 11. Acople para instalación de los sensores de presión Fuente Autores

En la Figura 12 se puede observar una fotografía de la instalación de varios sensores de presión en el refrigerador doméstico [19].

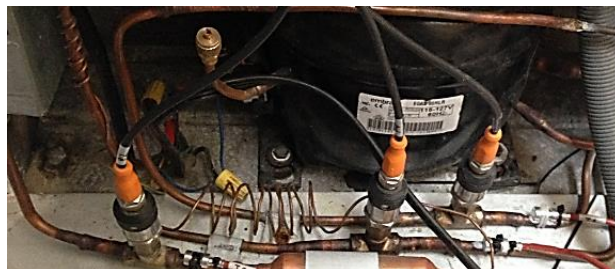


Figura 12. Disposición de los sensores instalados en el refrigerador Boreal Fuente: Autores.

Una vez realizada la instalación completa de cada sensor de presión, se procedió a inyectar nitrógeno en las líneas de tuberías, lo que garantiza una limpieza y al mismo

tiempo la identificación de posibles fugas existentes; luego de vaciar el nitrógeno se realizó la carga del refrigerante R134a.

De acuerdo a la distribución establecida para los sensores de temperatura, se procedió con la colocación, utilizando para ello pasta térmica, que sirve para obtener una mejor transferencia de calor entre la sonda y la tubería (Figura 13) y se las sujeta mediante correas plásticas.



Figura 13. Instalación y montaje de termoresistores externos Fuente: Autores

Para los termoresistores a ser ubicados en los dispositivos de control, como el bulbo del compartimiento de congelación, bulbo del compartimiento de refrigeración y en la tubería de ingreso al condensador, se procedió a taladrar la parte superior del refrigerador, para el ingreso de los sensores, mismos que fueron montados en el sistema de acuerdo a lo establecido en el párrafo anterior (ver Figura 14).

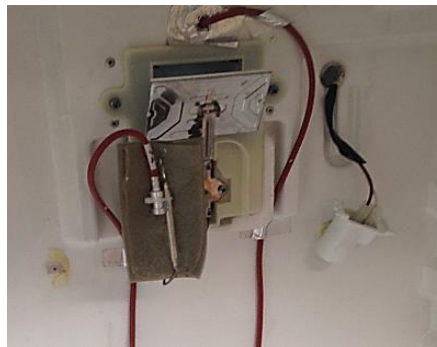


Figura 14. Montaje de termoresistores internos Fuente: Autores

En la Figura 15 se puede observar el resultado final del montaje de todos los sensores y las modificaciones realizadas en el refrigerador domésticos.



Figura 15. Refrigerador instrumentado. Fuente: Autores

2.4 Plataforma gráfica de comunicación de los sensores con el PC.

Existen varias alternativas de lenguajes de programación que permiten realizar una comunicación e interfaz gráfica compatibles con la tarjeta de adquisición de datos Arduino y la PC, por lo que se escogió el Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW de National Instruments, mismo que se especializa en instrumentación industrial y cuenta con lenguaje de programación SCADA.

Con este software se realizó la programación correspondiente para establecer la lectura de pines analógicos del Arduino, de la misma manera a las señales de salida se realizó la conversión analógica digital, señales que también fueron conectadas a un indicador para su visualización en la interfaz gráfica. Se consideró limitar el tiempo de censado, mediante la incorporación de un timer en la programación, a fin de poder grabar los datos en un vector, mismo que es transpuesto para su posterior visualización en una matriz [19].

En la Figura 16 se puede observar la interfaz gráfica desarrollada.

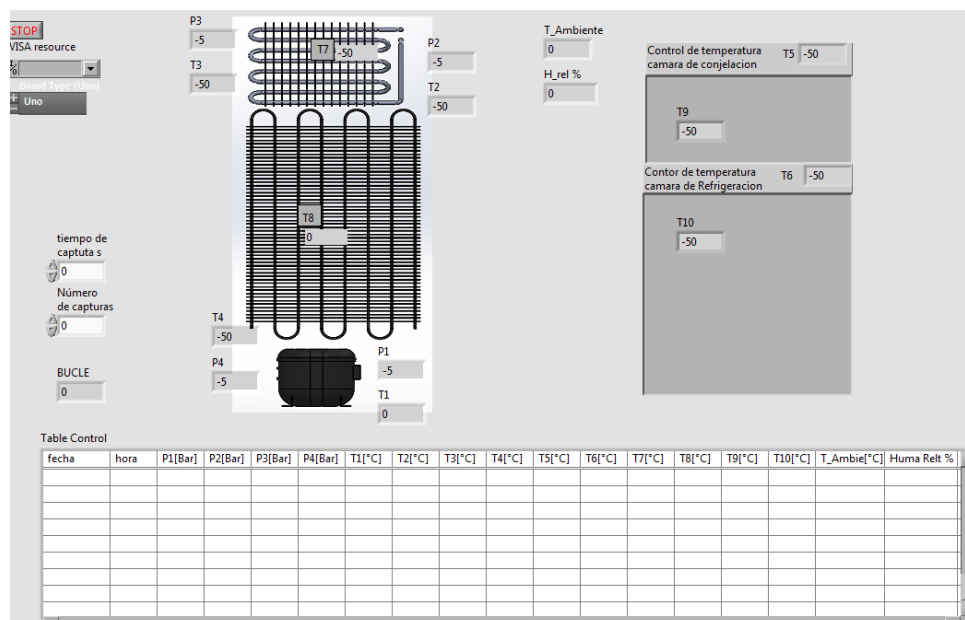


Figura 16. Interfaz gráfica del programa para la captura de datos Fuente: Autor

3. Resultados y discusión

Los primeros datos obtenidos se censaron durante un periodo de tiempo de una hora en intervalos de 1 minuto con el refrigerador recién encendido y con el control de temperatura a nivel medio. De acuerdo al programa desarrollado, en la Figura 17 se puede observar los distintos puntos del sistema de refrigeración en los que se ha instrumentado para medir tanto presión como temperatura.

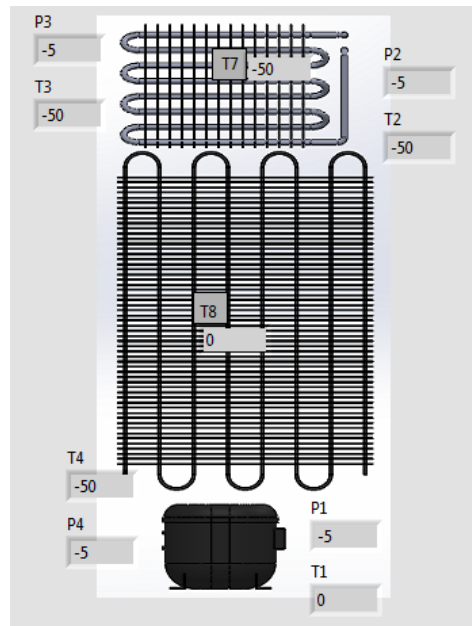


Figura 17. Interfaz de medición de valores de presión y temperatura del sistema de refrigeración.
Fuente: Autores.

En la Tabla 4 se pueden observar un extracto de los datos obtenidos de los sensores colocados en los distintos puntos del refrigerador doméstico, estos datos apenas corresponden a 4 minutos de tiempo en el que el compresor se encuentra trabajando. Se cuenta con la información correspondiente a un ciclo total de 24 horas de operación del refrigerador doméstico instrumentado.

Tabla 4. Base de datos obtenida con software de monitoreo, tomados durante 4 minutos con frecuencia de 1 minuto. Fuente Autor.

Fecha	22/07/2016	22/07/2016	22/07/2016	22/07/2016
Hora	15:39	15:40	15:41	15:42
P1[Bar]	12,797	12,758	12,895	12,895
P2[Bar]	12,699	12,64	12,718	12,777
P3[Bar]	0,351	0,39	0,429	0,39
P4[Bar]	0,312	0,312	0,272	0,331
T1[°C]	55,9	56,4	57,1	57,8
T2[°C]	36,7	36,7	36,9	37
T3[°C]	-4,1	-4,4	-4	-3,8
T4[°C]	8,8	7,4	6,9	7,7
T5[°C]	-13,5	-14,1	-14,2	-14,4
T6[°C]	19,6	18,6	17,8	17,4
T7[°C]	-20,2	-20,5	-20,3	-20,3
T8[°C]	45,5	45,4	45,5	45,7
T9[°C]	12,1	11,6	12,4	12,7
T10[°C]	-10,3	-10,6	11,7	0,5
Temperatura Ambiente				
[°C]	18,4	18,4	18,1	18,4

Con todos los datos almacenados en una base, mismos que se han obtenido considerando intervalos de tiempo de 1 minuto, se ha conseguido establecer las condiciones de operación del equipo.

En la Figura 18 se muestra la variación de las temperaturas en el congelador (sensor T5) desde el momento del encendido del equipo versus los instantes en que el compresor se enciende o apague, para ello se ha identificado como estados del compresor en valores de 1 para el encendido y 0 para el apagado. En este sentido se puede observar que cuando el compresor se enciende la temperatura del congelador empieza a descender hasta un mínimo de -20.7°C , temperatura a la que el control desactiva el compresor, este proceso tarda 90 minutos hasta llegar a un estado de estabilidad, desde este instante el compresor emplea un promedio de tiempo de 7 min entre apagado y encendido.

Este estado de estabilidad se consigue ubicando al control de temperatura en su posición mínima. Cabe indicar que dicho estado puede ser fácilmente alterado al someterle al equipo a situaciones externas como a diversas aperturas y cierres de la puerta del congelador y la variación de la carga de congelación. En la gráfica también se puede observar que entre el minuto 200 y 211, en el que se abrió la puerta del congelador, el compresor tardó más tiempo para alcanzar la temperatura de trabajo.

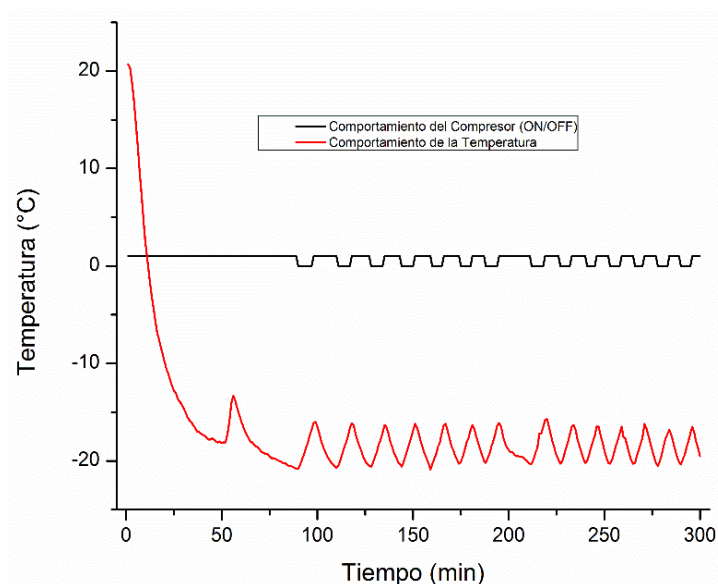


Figura 18. Comportamiento de los valores de temperatura del compartimento de congelación vs el estado del compresor (sensor T5). Fuente: Autores.

En la figura 19 se muestra la variación de la presión a la salida del compresor para una muestra de 6 horas alcanzando una presión mínima de 0.9 bares y un máximo de 14.67 bares influenciados por el estado del compresor.

Las estrategias establecidas para la instrumentación del refrigerador doméstico, fueron implementadas en función de las experiencias adoptadas en los trabajos presentados en el estado del arte y los resultados tienen mucha pertinencia a los criterios de operación de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, utilizado de manera general por los equipos de refrigeración doméstica producidos y comercializados en varios países de Latinoamérica.

Desde el punto de vista del consumo de energía eléctrica, la posibilidad de identificar el performance del compresor ha permitido vincular el comportamiento de la variable temperatura en distintos componentes del equipo de refrigeración con el on/off de dicho compresor durante el ciclo de análisis, esto posibilita el cálculo del consumo eléctrico del refrigerador y sobre todo permite plantear estrategias de uso adecuado, ya que al ser un sistema térmico está sujeto a pérdidas por apertura y cierre de puertas y por las cargas térmicas (alimentos) que se coloquen para la conservación y/o congelación.

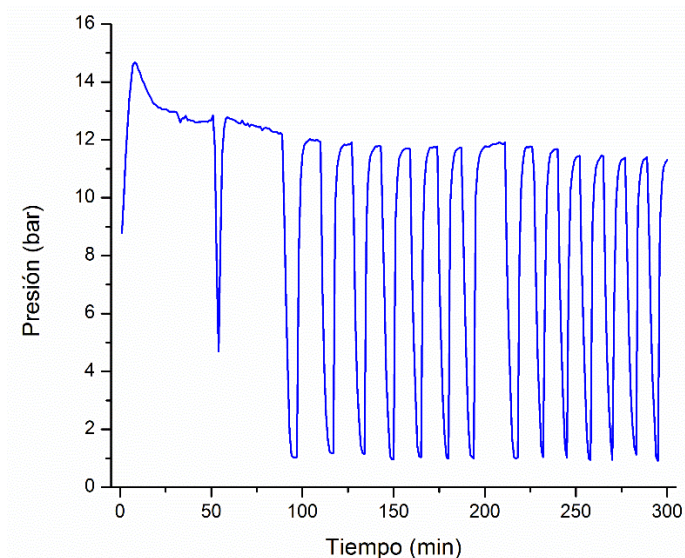


Figura 19. Comportamiento de los valores de presión, medida a la salida del compresor (sensor P1).
Fuente: Autores.

4. Conclusiones

Los diferentes instrumentos de medición instalados en las partes principales del refrigerador doméstico permiten obtener los valores de las variables de temperatura y presión, con los cuales se pueden establecer los cálculos pertinentes para analizar el ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión de vapor y sus respectivos procesos.

Para la instrumentación se implementaron 4 sensores de presión y 5 de temperatura, mismos que se instalaron principalmente en el evaporador, condensador y compresor del refrigerador doméstico.

Para estudiar la carga térmica del refrigerador, se recomienda la utilización de 9 termoresistencias, que deberán ser distribuidas en los distintos compartimientos de almacenamiento y de refrigeración y sus cargas térmicas que simulan alimentos frescos. Según el diagrama de ciclo ideal de compresión de vapor existe un incremento de temperatura y presión en la etapa de compresión (proceso 1-2), por lo que luego de instrumentar la entrada y salida del compresor, se determinaron dichas variaciones.

Analizando el proceso 2-3, en la etapa de condensado, teóricamente existe un cambio de temperatura a presión constante sin embargo debido a pérdidas esta presión puede variar por lo que a la salida del condensador se debe colocar sensores de presión y temperatura.

Para el proceso 3-4, específicamente en la etapa de expansión, existe un cambio de presión y temperatura, por lo que se procedió con la instrumentación correspondiente, tanto a la salida del tubo capilar como la entrada del evaporador.

Para la proceso 4-1, que representa la fase de evaporación, en donde dicho proceso ocurre a presión y temperatura constante, se instrumentó en el enlace evaporador y compresor, con la finalidad de determinar pérdidas de temperatura en el trayecto.

Para la disposición de los sensores en el sistema de control del refrigerador, se toma en cuenta el parámetro del control on-off en los que intervienen los bulbos de refrigeración y congelación por lo tanto se usa 2 sensores de contacto (termoresistencia) y uno en el control no-frost.

La base de datos de las variables de temperatura y presión obtenidas a través de la instrumentación del refrigerador doméstico, son el insumo principal para plantear modificaciones en las partes principales del refrigerador doméstico a fin de conseguir una mejora en la eficiencia energética.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, la Universidad de Cuenca, la Escuela Politécnica Nacional y la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, por el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto de investigación "Laboratorio Remoto de Instrumentación Virtual de Código Libre" y en especial a la Fundación Consorcio Ecuatoriano para el Desarrollo de Internet Avanzado RED CEDIA, por su aporte económico y disponibilidad de su plataforma virtual.

Referencias

- [1] A. Roccató, M. Uyttendaele, y J.-M. Membré, «Analysis of domestic refrigerator temperatures and home storage time distributions for shelf-life studies and food safety risk assessment», *Food Research International*, vol. 96, pp. 171–181, 2017.
- [2] N. G. Jara, F. Z. Reinoso, C. Isaza-Roldán, y J. L. Espinoza, «Impacts on the consumption of electric power by the use of efficient refrigerators - Ecuador case», *Ingenius*, vol. 0, n.º 18, pp. 53-63, jul. 2017.
- [3] E. Corte, C. Flores, N. Jara, y C. Isaza, «Sistemas de refrigeración doméstica-Estado del arte de las mejoras en la eficiencia energética», *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, n.º 9, pp. 29-40, 2014.
- [4] X. Wang y J. Yu, «An experimental investigation on a novel ejector enhanced refrigeration cycle applied in the domestic refrigerator-freezer», *Energy*, vol. 93, pp. 202–209, 2015.
- [5] F. G. Modarres, M. Rasti, M. M. Joybari, M. R. F. Nasrabadi, y O. Nematollahi, «Experimental investigation of energy consumption and environmental impact of adaptive defrost in domestic refrigerators», *Measurement*, vol. 92, pp. 391–399, 2016.
- [6] C. Aprea, A. Greco, y A. Maiorino, «An experimental investigation on the substitution of HFC134a with HFO1234yf in a domestic refrigerator», *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp. 959–967, 2016.
- [7] N. Agrawal, S. Patil, y P. Nanda, «Experimental Studies of a Domestic Refrigerator Using R290/R600a Zeotropic Blends», *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 425–430, 2017.
- [8] M. Ouali, M. A. Djebiret, R. Ouali, M. Mokrane, N. K. Merzouk, y A. Bouabdallah, «Thermal control influence on energy efficiency in domestic refrigerator powered by photovoltaic», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n.º 13, pp. 8955–8961, 2017.
- [9] J. K. Kim y J. H. Jeong, «Performance characteristics of a capacity-modulated linear compressor for home refrigerators», *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, n.º 3, pp. 776–785, 2013.
- [10] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima Edición. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2012.
- [11] INEN, *NTE INEN 2206: Artefactos de refrigeración domésticos con o sin escarcha. Refrigeradores con o sin compartimiento de baja temperatura. Requisitos e inspección*. 2011, pp. 1-94.
- [12] W. C. Whitman y W. M. Johnson, *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado*, vol. 3. Editorial Paraninfo, 2000.
- [13] M. Y. Taib, A. Abd Aziz, y A. B. S. Alias, «Performance Analysis of a Domestic Refrigerator», presentado en National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Students, Malaysia, 2010, pp. 582-591.
- [14] S. Bi, K. Guo, Z. Liu, y J. Wu, «Performance of a domestic refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid», *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n.º 1, pp. 733–737, 2011.
- [15] Ö. Ağra y İ. Teke, «Experimental investigation of condensation of hydrocarbon refrigerants (R600a) in a horizontal smooth tube», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, n.º 9, pp. 1165-1171, nov. 2008.
- [16] S. Wongwises y N. Chimres, «Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator», *Energy Conversion and Management*, vol. 46, n.º 1, pp. 85-100, Enero 2005.
- [17] Y. Liu *et al.*, «Experimental study on household refrigerator with diffuser pipe», *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, n.º 8–9, pp. 1468-1473, jun. 2011.

- [18] B. F. Castillo Cabrera, F. G. Puente Rodríguez, y N. G. Jara, «Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no frost con R600a», Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2014.
- [19] I. M. Morocho Cajamarca, B. A. Ruiz Jaramillo, y N. G. Jara Cobos, «Instrumentación de un refrigerador doméstico para la toma de datos de presión y temperatura», B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2016.
- [20] JUMO, «JUMO MIDAS C08 OEM Pressure Transmitter – Basic». JUMO Instrument Co. Ltd.
- [21] ARDUINO, «Arduino MEGA 2560». 2016.
- [22] JUMO, «Hygro and Hygrothermal Transducers (Capacitive) for Air Conditioning Applications.» 2016.