

EVALUACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE UN FRIGOBAR COMERCIAL QUE OPERA MEDIANTE EL CICLO DE COMPRESIÓN DE VAPOR

De la O Ramírez, Diana Karina (1), Alfaro Ayala, Jorge Arturo (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | [katrina_delao_13@hotmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [ja.alfaroayala@ugto.mx]

Resumen

Los refrigeradores son equipos indispensables en nuestra vida diaria y su uso requiere las 24hrs del día, convirtiéndose en el electrodoméstico que más energía consume en un hogar, por lo tanto, es necesario comprender su comportamiento. En este trabajo se llevó a cabo la evaluación del desempeño real de un frigobar comercial mediante el análisis térmico y eléctrico de sus 7 niveles de enfriamiento, realizando las mediciones de temperatura y corriente con un sistema de adquisición de datos NI-CRio 9030 Compac RIO y un multímetro MUL 630, respectivamente. Los resultados muestran valores de COP normales para un sistema de refrigeración y un rango de temperaturas adecuado para la conservación de alimentos. La información obtenida en la realización del presente proyecto será utilizada para el desarrollo de modelos teóricos y numéricos para predecir el comportamiento de refrigeradores.

Abstract

The refrigerators are indispensable equipment in our daily life and their use require the 24 hours of the day, becoming the electrical appliance that consumes more energy in a home, therefore, it is necessary to understand its behavior. In this work, the evaluation of the real performance of a commercial mini-refrigerator was carried out by means of the thermal and electrical analysis of 7 levels of cooling, conducting the measurements of temperature and current with a data acquisition system NI-CRio 9030 Compac RIO and a Multi-meter MUL 630, respectively. The results are normal COP values for a refrigeration system and it has a suitable temperature range for food preservation. The information obtained in this project will be used for the development of theoretical and numerical models for the behavior of refrigerators.

Palabras Clave

Refrigeración; Compresión de vapor; COP; Comportamiento térmico.

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años hasta la actualidad, algunos estudios han demostrado que el electrodoméstico que consume más energía por día en un hogar es el refrigerador, ya que a pesar de existir equipos que tienen una mayor potencia, éste se encuentra en constante funcionamiento las 24hrs al día debido a la necesidad de preservar ciertos productos para su posterior uso y/o ingesta. La revista ABC.es economía [1] muestra la relación de los aparatos electrodomésticos que más energía consumen, quedando el refrigerador en el porcentaje más alto con un 30.6%, seguido del televisor con un 12.2% y la lavadora con un 11.8%, dejando a los demás aparatos con un porcentaje <10%, estos datos se obtuvieron a partir de estudios realizados por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de energía). SENER (Secretaría de energía) [2], reportó los porcentajes de consumo energético de equipos de uso residencial, quedando nuevamente en el valor más alto el refrigerador con un 39%.

El uso del refrigerador influye en dos de los problemas más grandes del planeta: el hambre y el deterioro del medio ambiente.

Actualmente, más de un tercio de los alimentos producidos a nivel mundial se pierden por desperdicio o descomposición [3], es por ello que el proceso de conservación o preservación de los alimentos es de vital importancia para erradicar el hambre en el mundo.

El deterioro del medio ambiente se ve afectado por el elevado consumo de energía de estos equipos. Las más utilizadas son las energías fósiles que producen dióxido de carbono debido a su combustión, el cual se está acumulando en la atmósfera generando el calentamiento global. Además, durante años estos aparatos han utilizado clorofluorocarbonos (CFC), compuestos que generan la disminución de la capa de ozono.

El análisis de los sistemas de refrigeración representa una herramienta muy valiosa, ya que ayuda a entender su comportamiento y de esta manera mejorar los equipos, reducir los efectos negativos, poder identificar fallas o la posibilidad de que éstas ocurran, diseñar maneras para incrementar el rendimiento, etc.

Actualmente existen varios trabajos de diferentes autores que han realizado análisis de sistemas de refrigeración, ya sean simulaciones, modelos teóricos o numéricos, comparaciones, etc. Zsembinszki et al. [4] desarrollaron una novedosa metodología para modelar un simple sistema de refrigeración por compresión que es capaz de detectar el malfuncionamiento de un sistema. Gill et al. [5] realizaron el análisis del rendimiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapor (RCV) con dos diferentes refrigerantes, R134a y R134a/LGP, mostrando éste último un mayor valor de COP. Roy et al. [6] analizaron termodinámicamente el desempeño de un sistema RCV modificado (combinación de dos sistemas convencionales a través de un intercambiador de calor) y realizaron la comparación con la combinación de efectos de los dos sistemas por separado, concluyendo que el sistema modificado presenta mejores resultados. Xu et al. [7] realizaron un método teórico de optimización global de un sistema RCV. Xing et al. [8] evaluaron el desempeño de un eyector en un ciclo de RCV, dando como resultado un mejor desempeño. Aphornratana et al. [9] analizaron un ciclo de refrigeración que combina el ciclo Rankine y el de compresión de vapor, obteniendo una gama más amplia de temperaturas de operación. Ding [10] analiza los recientes desarrollos en cuanto a técnicas de simulación de sistemas RCV. Dalkilic et al. [11] hace la comparación del desempeño de un sistema RCV con diferentes refrigerantes.

En la actualidad, el ciclo de refrigeración por compresión de vapor es ampliamente utilizado en los sistemas de refrigeración.

Refrigeración por compresión de vapor (RCV).

El ciclo incluye 4 componentes: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión (Imagen 1a). A grandes rasgos, el ciclo RCV consiste en que el refrigerante entra al compresor como vapor a baja presión y temperatura, y sale de éste como vapor pero a alta presión y temperatura, posteriormente ingresa al condensador para salir completamente líquido debido al calor extraído, después entra a la válvula de expansión la cual le disminuye la

presión y el refrigerante se evapora parcialmente por lo que sale de ésta como mezcla líquido-vapor (L-V) a baja presión y temperatura, para finalmente ingresar al evaporador donde removerá el calor del espacio refrigerado y se evaporará nuevamente el refrigerante para entrar al compresor y repetir el ciclo (Imagen 1b).

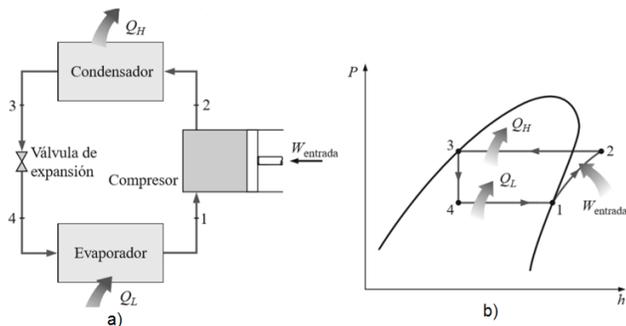


IMAGEN 1: a) Esquema de los equipos y b) Diagrama P-h para el ciclo RCV.

Este trabajo se enfoca en el análisis térmico y eléctrico de un sistema de refrigeración RCV a los 7 niveles de operación para poder evaluar su desempeño real, además de que esta información podría ser empleada posteriormente para el desarrollo de modelos teóricos que permitan predecir el comportamiento de refrigeradores, ya que como se mencionó anteriormente, son ampliamente utilizados y su consumo de energía es muy alto, generando indirectamente un daño al ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluó el frigobar comercial de la marca "Dometic Coolmatic" y modelo "CR-0065E" (Imagen 2). Las características del frigobar se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características del frigobar RCV.

Características	RCV
1. Refrigerante	R134a
2. Capacidad (L)	64
3. Congelador (L)	7.2

4. Dimensiones externas: Altura x Ancho x Profundidad (m)	0.448x0.525x0.545
5. Voltaje a CD (V)	12
6. Voltaje a CA (V)	120
7. Rango de Temperaturas en el espacio refrigerado	10°C a 0°C
8. Rango de temperaturas en el congelador.	0°C a -18°C



IMAGEN 2: Fotografías del frigobar comercial.

Evaluación térmica.

Los datos de temperaturas dentro del frigobar y la del ambiente a lo largo del tiempo de operación fueron obtenidos mediante un sistema de adquisición de datos NI-CRIO 9030 Compac RIO del fabricante National Instruments® con el módulo NI-9213, el cual tiene 16 canales para medir temperaturas con diferentes termopares y con una precisión de hasta $\pm 0.03^\circ\text{C}$. El software que se utilizó fue LabView versión 8 del mismo fabricante.

Se colocaron 9 termopares tipo K, 8 fueron distribuidos dentro del frigobar como se muestra en la Imagen 3, y 1 termopar por fuera del mismo para medir la temperatura ambiente (todos conectados al módulo en el sistema de adquisición de datos). Los datos de temperaturas fueron recolectados y guardados en un archivo

Excel con un muestreo constante en intervalos de 5 minutos. Cabe señalar que las mediciones de temperaturas y corriente se realizaron simultáneamente para cada uno de los 7 niveles de enfriamiento con un mismo tiempo de operación.

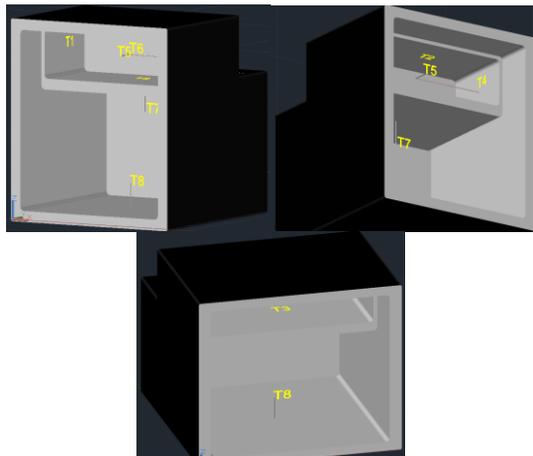


IMAGEN 3: Modelo 3D del frigobar comercial elaborado en Autocad

Evaluación eléctrica.

Los datos de corriente eléctrica a lo largo del tiempo de operación fueron medidos mediante un multímetro profesional RMS auto rango con interfaz USB (MUL 630). El software empleado fue DMM que viene con el multímetro.

Se instaló primeramente el programa a una computadora (laptop Hp), el multímetro se conectó al cable de corriente eléctrica del frigobar. Una vez realizado lo anterior, se programó dicho multímetro para la recolección de datos de CA en A, con una velocidad de 5 muestras por minuto ya que el mismo equipo tenía frecuencias de muestreo más altas que el de temperatura. El experimento comenzaba cuando se conectaba el cable al frigobar debido a que éste empezaba a trabajar. Únicamente se trabajó con CA.

Cálculos

Contando con los datos de temperaturas y corriente para cada uno de los 7 niveles de enfriamiento se prosiguió a realizar los cálculos respectivos para la evaluación del desempeño real del frigobar.

Primeramente, se calculó la potencia mediante la ecuación 1:

$$P = VI \quad (1)$$

donde P es la potencia eléctrica en W, V es el voltaje de CA con un valor de 120V e I es la corriente que se midió con el multímetro en mA.

Una vez obtenidos estos valores, se realizó una gráfica de Potencia-Temperatura vs Tiempo con cada nivel, para de esta manera, poder visualizar el comportamiento térmico y eléctrico en relación al tiempo de operación.

Posteriormente, se realizaron los cálculos del COP (Coeficiente de desempeño) para el congelador (COP_c), el espacio refrigerado debajo del mismo (COP_e) y para el espacio refrigerado total (COP), y se graficó contra el tiempo igualmente para cada uno de los niveles. Se realizó de esta manera debido a que las mediciones de la temperatura del aire fueron en dos lugares distintos como se puede ver en la Imagen 3, en el congelador (T5) y en el espacio debajo de éste (T8), por lo tanto, se evaluó el COP para cada uno y luego, obteniendo un promedio de las dos temperaturas, se evaluó el del espacio refrigerado total.

Los valores de COP se obtuvieron mediante la ecuación 2:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (2)$$

donde Q es el calor extraído del espacio refrigerado en kW y W es la potencia eléctrica calculada anteriormente en kW.

El valor de Q se calculó con la ecuación 3, para el congelador, el espacio refrigerado debajo del congelador y el espacio refrigerado total en un intervalo de 5min:

$$Q = \frac{m * C_v * (T_{amb} - T)}{\Delta t} \quad (3)$$

donde m es la masa del aire en kg, C_v es la capacidad calorífica del aire a temperatura ambiente en kJ/kg*K [12] a volumen constante, T es temperatura del aire en K y Δt es el intervalo de tiempo (300s).

La masa del aire fue obtenida mediante la ecuación 4:

$$m = \rho * Vol \quad (4)$$

donde ρ es la densidad del aire a temperatura ambiente en kg/m^3 y $Vol.$ es el volumen del congelador (0.0085044m^3), de la parte del espacio refrigerado (0.0464899m^3) o el espacio completo (0.07149826m^3) según sea el caso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de temperatura, potencia y COP que se muestran en las imágenes 4, 5 y 6 corresponden a los niveles 1, 4 y 7, es decir, primero, intermedio y final, ya que son los niveles que muestran cambios representativos.

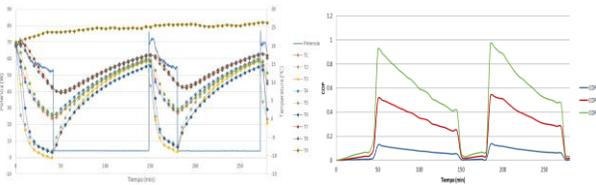


IMAGEN 4: Gráficas Potencia-Temperatura vs tiempo y COP vs tiempo del nivel 1

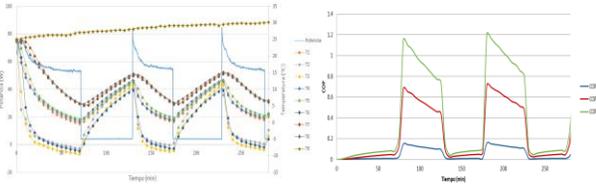


IMAGEN 5: Gráficas Potencia-Temperatura vs tiempo y COP vs tiempo del nivel 4

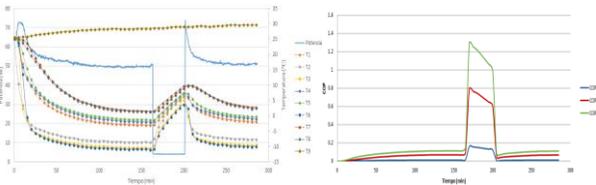


IMAGEN 6: Gráficas Potencia-Temperatura vs tiempo y COP vs tiempo del nivel 7

La primera gráfica de estas imágenes demuestra la congruencia existente entre el comportamiento térmico y eléctrico del frigobar, por ejemplo, cuando alcanza la temperatura más baja del nivel de operación, el equipo se apaga y el valor de la potencia disminuye drásticamente. Cabe destacar que dichas gráficas también son prueba de que

incluso cuando el equipo se encuentra apagado, la energía se continúa consumiendo, solo que en menores cantidades. Además, las temperaturas se dividen en 3 grupos, lo cual concuerda con su ubicación dentro del frigobar, ya que los dos termopares que alcanzan las temperaturas más altas son los del aire en la parte de abajo (T7 y T8), los 3 con las temperaturas intermedias son el del aire en el congelador (T5) y los de las paredes laterales del mismo (T1 y T4), y los 3 que alcanzan temperaturas más bajas son los del piso (T3), el techo (T2) y el fondo del congelador (T6), donde se podría asegurar que se encuentra ubicado el evaporador.

La gráfica de la derecha en las imágenes 4, 5 y 6, muestra el comportamiento del COP con respecto al tiempo de operación. Si se comparan las dos gráficas de cada imagen, el COP también coincide en cuanto a sus cambios significativos, solo que éste se eleva cuando el equipo se apaga, dejando en claro que su comportamiento es inverso al de la potencia.

Además, efectivamente a niveles más altos, la potencia de refrigeración es mayor, permitiendo alcanzar temperaturas menores, por largos periodos de tiempo, que requieren algunos productos, esto se verifica con el poco tiempo que dura apagado y el largo tiempo que dura encendido en comparación de los primeros niveles.

En cuanto al desempeño, el valor de COP promedio del nivel 1 fue 0.45, el del nivel 4 fue 0.39 y el del nivel 7 fue 0.22. Lo cual nos dice que, a pesar de la diferencia entre las temperaturas que alcanza el espacio refrigerado, la potencia es todavía mayor, permitiendo que el COP disminuya entre cada nivel. Los valores de COP se encuentran dentro de los normales reportados para refrigeradores [13] dejando en claro su adecuado funcionamiento, cabe señalar que éstos varían dependiendo de las características del refrigerador.

Con respecto a las temperaturas que alcanza, es importante destacar que cumple con las necesarias, por lo menos, para la preservación de los alimentos desde el nivel 1, como por ejemplo el pescado o la carne que ocupan de $0-3^{\circ}\text{C}$ hasta algunas frutas como la sandía de $10-15^{\circ}\text{C}$ [3,14].

La única mejora que se recomienda hacer es poner a trabajar el equipo a un mayor tiempo de operación para poder observar mínimo un segundo ciclo en el nivel 7.

CONCLUSIONES

La evaluación térmica y eléctrica realizada permitió llevar a cabo un adecuado análisis del desempeño real del frigobar comercial, en sus 7 niveles de enfriamiento a un tiempo de operación de 280 minutos por nivel, mediante el cálculo del COP y/o la comparación de las temperaturas del refrigerador y a las que debe trabajar. Además de permitir la ubicación del evaporador. Las imágenes 4, 5 y 6, corresponden solamente a los niveles 1, 4 y 7, ya que son los que muestran cambios representativos. Se observa que el equipo funciona adecuadamente, ya que cumple con los valores normales del COP para refrigeradores, con las temperaturas necesarias para la conservación de alimentos y es posible ubicar el evaporador por la visible separación de las temperaturas registradas por los termopares. El siguiente paso es el empleo de esta información para el desarrollo de modelos teóricos y/o numéricos para la predicción del comportamiento de los refrigeradores.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al que alguna vez fue mi profesor, el Dr. Jorge Arturo Alfaro Ayala por su apoyo en el desarrollo de este proyecto, por siempre estar al pendiente y resolver cualquier duda que surgiera. A la Universidad de Guanajuato por brindarme la oportunidad de vivir esta experiencia. A mi familia por su apoyo incondicional de toda la vida. A mi hermana que siempre ha estado para mí, mostrándome su alegría que la caracteriza que me impide rendirme. Y finalmente, a mi pareja por siempre creer en mí e impulsarme a seguir adelante.

REFERENCIAS

[1] Zamora, I. (2012). Los electrodomésticos que más consumen y todo lo que puedes hacer para evitarlo. Día de consulta: 29/05/2017.

Recuperado de <http://www.abc.es/20120312/economia/abci-trucos-ahorro-energia-201203090920.html>

[2] Fernández, X. (2011). Indicadores de eficiencia energética en el sector residencial. Día de consulta: 29/05/2017. Recuperado de http://www.energia.gob.mx/taller/res/1859/2_Ximena%20_Fernandez%28SENER%29_Indicadores_Sector_Residencial.pdf

[3] Aste, N., Del Pero, C. & Leonforte, F. (2017). Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Doi: 10.1016/j.seta.2017.02.014

[4] Zsembinski, G., de Gracia, A., Moreno, P., Rovira, R., González, M. A., & Cabeza, L. F. (2016). A novel numerical methodology for modelling simple vapour compression refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*. 115, 188-200. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.059

[5] Gill, J. & Singh, J. (2017). Performance analysis of vapor compression refrigeration system using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Refrigeration*. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.06.019

[6] Roy, R. & Mandal, B. K. (2016). Thermodynamic Analysis of Modified Vapour Compression Refrigeration System using R-134a. *Energy Procedia*. 109, 227-234. Doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.050

[7] Xu, Y. & Chen, Q. (2013). A theoretical global optimization method for vapor-compression refrigeration systems based on entransy theory. *Energy*. 60, 464-473. Doi: 10.1016/j.energy.2013.08.016

[8] Xing, M., Yan, G. & Yu, J. (2015). Performance evaluation of an ejector subcooled vapor-compression refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*. 92, 431-436. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.091

[9] Aphornratana, S. & Sriveerakul, T. (2010). Analysis of a combined Rankine-vapour-compression refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*. 51, 2557-2564. Doi: 10.1016/j.enconman.2010.04.016

[10] Ding, G. (2007). Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*. 30, 1119-1133. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.02.001

[11] Dalkilic, A. S. & Wongwises, S. (2010). A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37, 1340-1349. Doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.006

[12] Cengel, Y. A. & Boles, M. A. *Termodinámica* (6ta ed.). Mc Graw-Hill.

[13] Souza, L. M. P., Scalón V. L. & Padilha, A. (2012). Coeficiente de Operación de un Sistema formado por un Refrigerador Doméstico acoplado a un acumulador de agua caliente para la recuperación de energía. *Información Tecnológica*. 23(2), 141-150. Doi: 10.4067/S0718-07642012000200016

[14] Profeco. Calidad de refrigeradores, Revista del Consumidor No.279. Día de consulta: 27/05/2017. Recuperado de https://www.profeco.gob.mx/revista/pdf/est_00/refrigerado1.pdf