

Análisis del comportamiento eléctrico en un compresor recíprocante hermético monofásico a la modificación de las variables termodinámicas en la refrigeración

Analysis of the electrical behavior in a monophasic hermetic reciprocating compressor to the modification of the thermodynamic variables in the refrigeration

AGUILAR-ANASTACIO, José Carlos†*, PEREZ-LULE, Salvador y MUÑOZ-FLORES, Luis David

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

ID 1^{er} Autor: *José Carlos Aguilar-Anastacio* / ORC ID: 0000-0001-9466-6935, Researcher ID Thomson: G-3853-2018, CVU CONACYT ID: 235122

ID 1^{er} Coautor: *Salvador, Pérez-Lule* / ORC ID: 0000-0003-3928-5368, Researcher ID Thomson: F-4294-2018, CVU CONACYT ID: 775589

ID 2^{do} Coautor: *Luis David, Muñoz-Flores* / ORC ID: 0000-0002-4975-428X, Researcher ID Thomson: F-4291-2018, CVU CONACYT ID: 898565

Recibido 08 Enero, 2018; Aceptado 12 Marzo, 2018

Resumen

Este artículo presenta el análisis del comportamiento eléctrico del compresor hermético en alimentación monofásica cuando ocurre la modificación de temperatura de congelación, tal efecto modifica todas las variables termodinámicas presentes en el sistema de refrigeración que se reflejan en el comportamiento del consumo eléctrico del compresor, ante esta situación según la *Comisión Federal de Electricidad (CFE)*, los sistemas de refrigeración son considerados uno de los mayores consumidores de energía eléctrica en el hogar y en la industria. El análisis tiene por objetivo identificar los picos de consumo eléctrico que representan una gran demanda en un intervalo de temperaturas de -10 a -20°C . La metodología consiste en el análisis termodinámico del sistema de refrigeración, aplicando leyes de la termodinámica para la obtención de las variables que influyen en el comportamiento del sistema, se aplicará el análisis fasorial y de Euler para obtener los modelos que describen las variables eléctricas dentro de un motor de inducción. La contribución de este trabajo es la obtención de un modelo matemático del comportamiento de un compresor recíprocante hermético monofásico en función de las temperaturas de congelación que puedan influir en la disminución del consumo eléctrico del sistema.

Compresor hermético, Variables térmicas, Potencia eléctrica

Abstract

This article presents the analysis of the electrical behavior of the hermetic reciprocating compressor in single-phase power supply when the freezing temperature changes, this effect modifies all thermodynamic variables present in the refrigeration system, which is reflected in the behavior of the compressor's electrical consumption, In view of this situation, according to the Federal Electricity Commission (CFE), refrigeration systems are considered one of the largest consumers of electricity in the home and in industry. The objective of the analysis is to identify the peaks of the electrical consumption that represent a great demand in a temperature range of -10 to -20°C . The methodology consists in the thermodynamic analysis of the cooling system, applying laws of thermodynamics to obtain the variables that influences the behavior of the system, the fasor analysis and Euler will be applied to obtain the models that describe the electrical variables within an induction motor. The contribution of this work is to obtain a mathematical model of the behavior of a single-phase hermetic reciprocating compressor as a function of the freezing temperatures that may influence the decrease in the electrical consumption of system.

Hermetic compressor, Thermal variables, Electric power

Citación: AGUILAR-ANASTACIO, José Carlos, PEREZ-LULE, Salvador y MUÑOZ-FLORES, Luis David. Análisis del comportamiento eléctrico en un compresor recíprocante hermético monofásico a la modificación de las variables termodinámicas en la refrigeración. *Revista de Ingeniería Mecánica*. 2018. 2-5: 23-33.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jcaguilar@tese.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En los últimos años el costo de la energía eléctrica ha reflejado un incremento substancial en México a consecuencia de los incrementos en el precio y la caída de producción de los combustibles, según el último reporte del balance nacional de energía 2016. (Sener, 2016) Esto ha despertado interés en ciertos sectores de la sociedad como el académico e industrial en la búsqueda de nuevas alternativas para mejorar el aprovechamiento del consumo eléctrico en la industrial y del hogar, particularmente en los equipos de refrigeración y aire acondicionado, es decir se busca obtener la mayor eficiencia en el aprovechamiento del consumo eléctrico en los sistemas de refrigeración durante su funcionamiento.

Según la Comisión Federal de Electricidad (CFE) los sistemas de refrigeración son uno de los electrodomésticos de mayor consumo eléctrico en el hogar y la industrial, por su continuo funcionamiento durante las 24 Hrs del día en todo el año, con el propósito de disminuir y mantener la temperatura por debajo de la temperatura ambiente para la conservación almacenamiento y prolongación de tiempo de los alimentos de consumo, así como la producción de hielo en pequeñas porciones. Adicionalmente, si se agrega el mal funcionamiento del sistema por filtraciones, puertas abiertas, desajuste del termostato, entre otros factores, el consumo eléctrico se incrementará y como consecuencia el costo por concepto de gasto de energía puede ser considerablemente mayor.

Dada su importancia en la sociedad moderna las investigaciones referentes a la disminución del consumo de energía en los sistemas de refrigeración, están enfocadas en tres líneas como son: *Control* donde se lleva a cabo el monitoreo de las variables de temperatura y presión para el control de las válvulas de expansión y refrigerante, *Compresor* regulación de par-velocidad con técnicas eléctricas o electrónicas, *Refrigerantes* mejoramiento en las propiedades de los agentes refrigerantes biodegradables que no atenten con la sustentabilidad del medio ambiente y la capa de ozono. (Ibrahim, 2010).

Este artículo presenta el análisis del comportamiento de la demanda de energía eléctrica en alimentación monofásica de un compresor hermético recíprocante en un sistema de refrigeración con temperaturas de congelación en un rango de -10 a -20°C. El objetivo de este análisis es obtener un modelo matemático que demuestre la influencia del cambio de las temperaturas de refrigeración en el consumo eléctrico del compresor.

Los resultados esperados en este análisis serán un marco de referencia para demostrar las afectaciones que producen la modificación de las temperaturas de congelación en cualquier sistema de refrigeración, dar a conocer en qué momentos se tiene una mayor demanda de energía eléctrica que se puede traducir en altos costos para el usuario.

La contribución de este trabajo es el desarrollo de un modelo que puede tener aplicaciones en el aprovechamiento del consumo eléctrico, la búsqueda de nuevas técnicas de control de velocidad del compresor para la optimización de energía en los sistemas de refrigeración.

Descripción del sistema de refrigeración

Un sistema de refrigeración es una máquina que a través de un compresor realiza la acción de incrementar la presión de un fluido refrigerante, una diferencia de presiones dentro de un circuito cerrado modifica las propiedades del fluido que son aprovechadas para la extracción de calor, en objetos o sustancias alojados en espacios cerrados donde se concentra una temperatura igual o mayor a la temperatura ambiente, el calor es transportado hacia otro punto donde es extraído o disipado por convección natural o forzada, el resultado de este proceso es la disminución de temperatura por debajo de la temperatura ambiente o incluso por debajo de los cero grados Celsius (punto de congelación).

Estos sistemas básicamente se componen de cuatro elementos principales: *compresor*, *condensador*, *expansión* y *evaporador*, cada uno interconectado para realizar el ciclo de trabajo en los siguientes procesos:

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

La interconexión y el sentido del flujo del refrigerante se muestran en la figura 1.

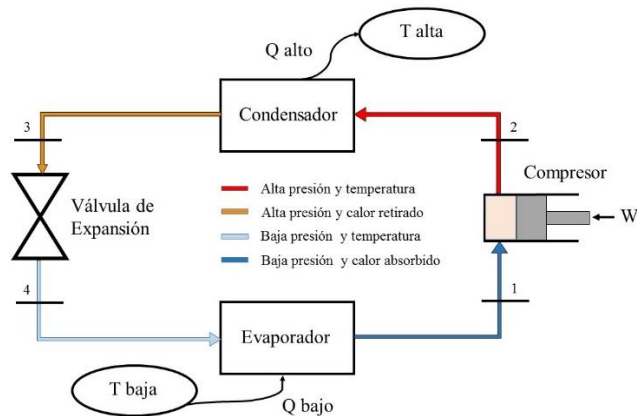


Figura 1 Elementos del sistema de refrigeración
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 1, se observa cuatro colores diferentes que denotan las condiciones de los estados del fluido a través del circuito de refrigeración. El proceso inicia en la compresión (Estados 1-2), se lleva a cabo con el compresor y el agente refrigerante, en el estado 2 el fluido se encuentra completamente gaseoso a una mayor presión y temperatura, el calor absorbido por el refrigerante es removido en el condensador (Estados 2-3) por convección natural o forzada según el caso, en el estado 3 el refrigerante mantiene alta presión con una reducción de calor a medida que el fluido recorre el condensador realiza el cambio de fase de un estado gaseoso a líquido, la válvula de expansión básicamente es una diferencia de diámetros de tubería, tiene la función de reducir la presión dentro del circuito, en el estado 4 a medida que el refrigerante circula por el evaporador las condiciones del fluido son modificadas manteniendo una baja presión y temperatura, en esta situación el fluido realiza un cambio de fase del estado líquido a vapor, en el estado 1 el fluido se encuentra completamente en estado gaseoso por el calor absorbido de los objetos del evaporador y es succionado por el compresor. Este proceso se llama *ciclo de trabajo* (w) (Shan, 2001), (Pita, 2008).

Componentes del compresor recíprocante

Uno de los elementos causantes del *ciclo de trabajo* dentro del circuito de refrigeración es el compresor, este es un elemento electromecánico cerrado que puede ser de tipo hermético, semihermético o abierto.

Está compuesto por un motor eléctrico de corriente alterna en contacto con el refrigerante y lubricante, mecanismos internos como: pistones, bielas, ejes de transmisión, válvulas de expulsión y succión, etc. El motor eléctrico utilizado en los sistemas de refrigeración se compone de dos partes principales *estator* y *rotor*, donde se generan campos magnéticos rotatorios en velocidades distintas por el efecto del voltaje inducido en el rotor, por este principio de funcionamiento a estos motores se les conoce como motor *jaula de ardilla* o motores de inducción. En la figura 2, se presentan las partes internas del compresor recíprocante.

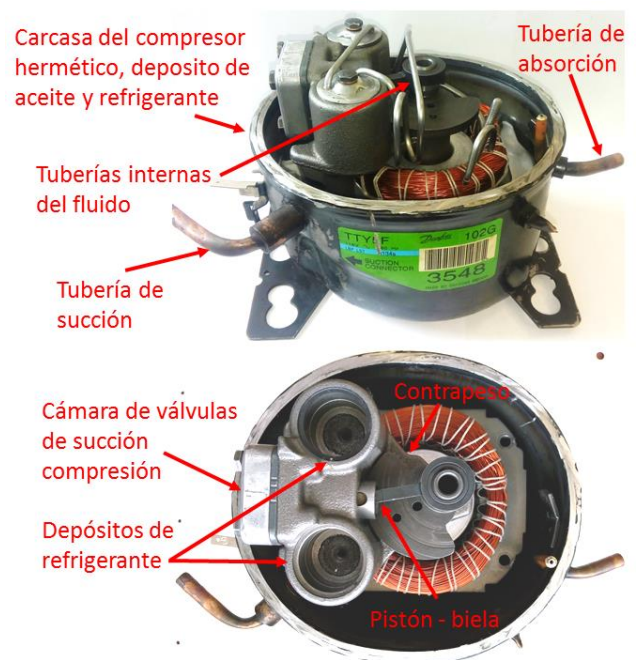


Figura 2 Partes principales del compresor recíprocante
Fuente: Elaboración Propia

De forma general este tipo de compresores son capaces de generar potencias desde 1/8 hasta 5HP, con una alimentación de 115V hasta 440V en CA, con una frecuencia de 60 Hz. Existe una clasificación de compresores en dos grupos desplazamiento *positivo* y *dinámicos*. (William, 2006).

Partes del motor jaula de ardilla

Estos motores se construyen a partir de un rotor tipo jaula de ardilla que consta de una serie de barras conductoras introducidas en ranuras formadas en el interior del núcleo del rotor, los extremos del núcleo son colocados en corto circuito por medio de anillos conductores formando una jaula de ardilla en su interior.

La parte fija del motor llamada *estator* consiste de un núcleo con características especiales donde se forman dos devanados *principal* y *auxiliar*, estos son colocados en el núcleo perpendicularmente entre ellos formando un ángulo de 90° , este arreglo se conoce como *motor de fase partida*, ver figura 3, esto permite crea un desfaseamiento entre la corriente y voltaje en ambas bobinas principio de funcionamiento del motor. (Saenz, 2002).

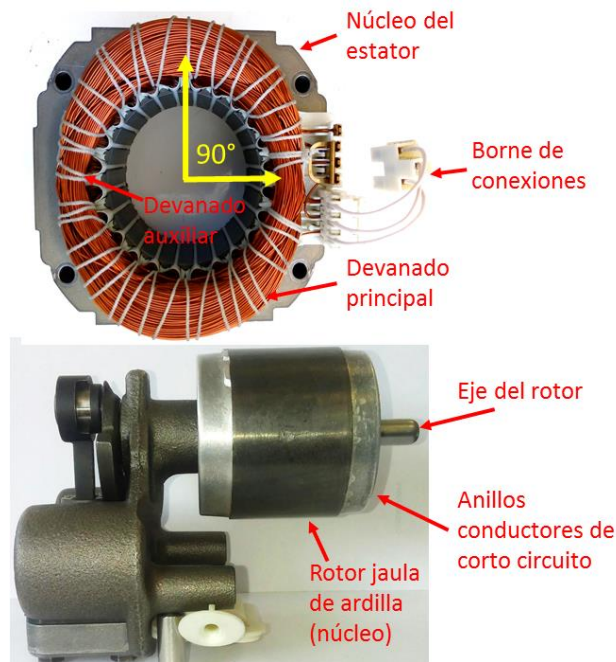


Figura 3 Partes principales del motor del compresor
Fuente: Elaboración Propia

Fasor de una función alterna

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), suministra energía eléctrica en un rango entre 115 a 120 Volts en corriente alterna (CA) con una frecuencia de 60 Hertz, como fuente de alimentación para los aparatos eléctricos o electrónicos del hogar en toda la República Mexicana. En su forma natural el voltaje tiene un comportamiento alterno que proporciona una corriente en función del tiempo de tipo senoidal o cosenoidal, en esta condición se puede representar de forma *vectorial* o *fasorial* (*magnitud* y *sentido*), lo que permite facilitar el análisis de modelos eléctricos en función de la frecuencia, particularmente motores eléctricos que tienen comportamiento de tipo Resistivo - Inductivo (*RL*). (Chapman, 2012).

Metodología

El trabajo se desarrolla con el análisis termodinámico del sistema a partir de las temperaturas de congelación y de condensador de un refrigerador doméstico, para calcular la demanda de potencia mecánica del sistema, estos datos en conjunto con el análisis eléctrico del motor del compresor se aplicarán para obtener el comportamiento de la demanda de potencia del compresor en función de la temperatura y entalpías, los datos obtenidos de las corrientes se representarán de forma vectorial para verificar el incremento de la potencia, se graficarán para obtener los resultados y conclusiones finales del proyecto.

Análisis termodinámico del sistema de refrigeración

Para el análisis termodinámico se debe tomar en cuenta la variación de la calidad del vapor refrigerante en el evaporador, (*entendiendo como calidad del vapor refrigerante (X) el cambio de fase de líquido a vapor*) y la válvula de expansión cuando se modifica la presión y temperatura de congelación, para el análisis se utiliza el refrigerante HFC-134a por ser de mayor aplicación en los sistemas de refrigeración doméstico y comercial.

Los datos utilizados en el análisis termodinámico se muestran en la tabla 1, son lecturas obtenidas de un refrigerador doméstico.

| Evaporador (°C) | Condensador (°C) |
|-----------------|------------------|
| -10 | 40 |
| -15 | 40 |
| -20 | 40 |

Tabla 1 Temperaturas en el evaporador y condensador
Fuente: Elaboración Propia

En el diagrama Temperatura - Entalpía (*T-h*) gráfico 1, se representa el comportamiento de los cuatro estados que se llevan a cabo en el sistema al realizar el ciclo de trabajo del fluido durante la refrigeración, a medida que circula el refrigerante del punto 4 al 1, la calidad del refrigerante (*X*) se modifica de líquido a vapor por el retiro de calor presente en el evaporador y sus alrededores, llevándose a cabo el efecto de refrigeración.

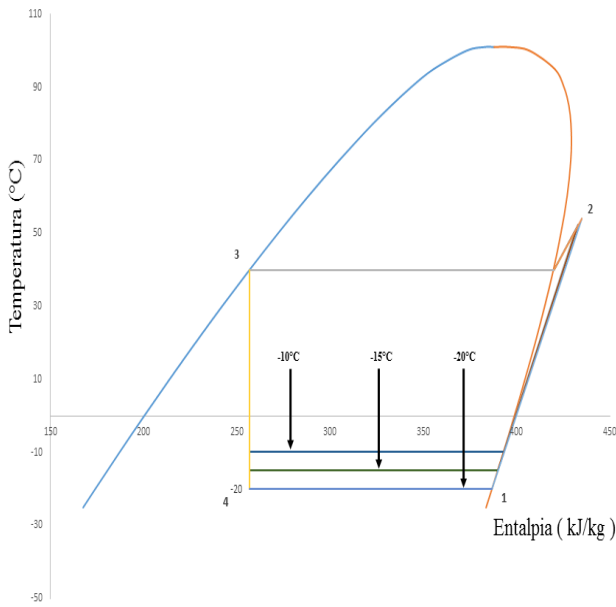


Gráfico 1 Comportamiento Temperatura-Entalpía (T-h) del refrigerante HF-134a

Fuente: *Elaboración Propia*

En los puntos 1 y 2, el compresor realiza el trabajo de compresión, en este proceso se tiene la mayor demanda de potencial eléctrico por la acción del incremento de presión y temperatura.

Variables de estado termodinámico estado 1 (Evaporador – Compresor)

La temperatura (T) del evaporador y compresor marcan los puntos de referencia para calcular las propiedades del refrigerante como: la entalpía (h), entropía (s), volumen (v), calidad (x) y presión (P) del refrigerante en el punto 1. En la Tabla 2, se resumen los datos calculados de las propiedades del refrigerante en la succión del compresor.

| Estado | T (°C) | P (bar) | s (kJ/Kg°K) | h (kJ/Kg) | v (m³/kg) | Calidad (x) |
|--------|--------|---------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | -10 | 2.01 | 1.7341 | 392.9 | 0.0996 | 1 |

Tabla 2 Propiedades del refrigerante en el evaporador a temperatura de -10°C

Fuente: *Elaboración Propia*

Variables de estado termodinámico estado 2 (Compresor – Condensador)

Una vez que el refrigerante se introduce al compresor por la succión, se comprime por el lado de alta presión hasta la región de vapor sobrecalentado del punto 2 al 3, el proceso se considera *isobárico* e *isoentrópico*, es decir la presión y entropía se consideran constantes (P₂ = P₃) y (s₂=s₁).

En este proceso inicia el retiro de calor a medida que el refrigerante circula por el condensador, en estas condiciones se obtiene las propiedades térmicas del refrigerante mostradas en la Tabla 3.

| Estado | T (°C) | P (bar) | s (kJ/Kg°K) | h (kJ/Kg) | v (m³/kg) | Calidad (x) |
|--------|--------|---------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| 2 | 50.4 | 10.1 | 1.7485 | 431.36 | 0.0215 | VSC |

Tabla 3 Propiedades del refrigerante en la salida del compresor

Fuente: *Elaboración Propia*

Variables de estado termodinámico estado 3 (Condensador – Válvula de expansión)

En el estado 3, la presión permanece constante desde el estado 2, (P₂ = P₃), en este punto a medida que el fluido circula por el serpentín del condensador se realiza el proceso de disipación de calor, condición para que el fluido entre en condensación o cambio de *fase de vapor a líquido*, en esta condición la calidad del refrigerante es igual a cero (x = 0), es decir el refrigerante se encuentra completamente en estado líquido a una temperatura ligeramente superior a la temperatura ambiente.

Variables de estado termodinámico estado 4 (Válvula de expansión – Intercambiador de calor)

La calidad del refrigerante es un porcentaje de la cantidad del líquido que se transforma en gas, la entalpía del estado 3 se mantiene hasta el punto 4, (h_{f3} = h₄) en este punto el refrigerante se encuentra en estado líquido expandiéndose de manera isoentálpica desde la presión P₃ hasta la presión de evaporación P₄, el refrigerante al entrar a la válvula capilar el refrigerante tiende a cambiar su calidad de estado de vapor a líquido, la ecuación que describe la modificación de cambio de estado o su calidad se muestra en la ecuación 1. Los datos de la ecuación 1, se obtienen de las entalpías h_f y h_g a temperatura de saturación (T_{sat} = 40 + T_{amb}), con temperatura de congelación T₄=T₁=-10°C, a una presión de P₄ = P₁ = 2 bar.

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{f4}}{h_{g4} - h_{f4}} \times 100\% \tag{1}$$

$$x_4 = \frac{256.6 - 186.7}{392.9 - 186.7} \times 100\%$$

$$x_4 = 34\%$$

El resultado de x_4 indica que el 34% del fluido refrigerante es vapor y el 66% líquido cuando entra al evaporador a un volumen específico (v) que se obtiene de la ecuación (2).

$$v_4 = (v_{g4} - v_{f4}) (x_4) + v_{f4} \quad (2)$$

$$v_4 = (0.0996 - 0.0007535) (0.34) + 0.0007535$$

$$v_4 = 0.0343 \frac{m^3}{kg}$$

La entropía (s) del refrigerante es calculada con la ecuación (3)

$$s_4 = (s_{g4} - s_{f4}) (x_4) + s_{f4} \quad (3)$$

$$s_4 = (1.7341 - 0.9507) (0.34) + 0.9507$$

$$s_4 = 1.2163 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Los datos para el cálculo del volumen específico (v_{g4} y v_{f4}) y la entropía (s_{g4} y s_{f4}) se obtienen en tablas de propiedades del refrigerante HFC- 134a, con temperatura de saturación (T_{sat}) en el estado 4. (Moran, 2005), [Tabla A.12].

Los cálculos anteriores se repiten para obtener las propiedades del refrigerante en los cuatro estados de las temperaturas de -15 y -20°C.

En las Tablas 4, 5 y 6 se resumen los datos obtenidos en cada uno de los estados de las temperaturas de congelación -10, -15 y -20°C respectivamente.

| Estado | T (°C) | P (bar) | s (kJ/Kg°K) | h (kJ/Kg) | v (m³/kg) | Calidad (x) |
|--------|--------|---------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | -10 | 2.01 | 1.7341 | 392.9 | 0.0996 | 1 |
| 2 | 50.49 | 10.18 | 1.7485 | 431.36 | 0.0215 | VSC |
| 3 | 40 | 10.18 | 1.1912 | 256.6 | 0.0009 | 0 |
| 4 | -10 | 2.01 | 1.2163 | 256.6 | 0.0343 | 0.34 |

Tabla 4 Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración a -10°C en el evaporado

Fuente: *Elaboración Propia*

| Estado | T (°C) | P (bar) | s (kJ/Kg°K) | h (kJ/Kg) | v (m³/kg) | Calidad (x) |
|--------|--------|---------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | -15 | 1.64 | 1.7379 | 389.8 | 0.1207 | 1 |
| 2 | 52.19 | 10.18 | 1.7541 | 433.17 | 0.0217 | VSC |
| 3 | 40 | 10.18 | 1.1912 | 256.6 | 0.0009 | 0 |
| 4 | -15 | 1.64 | 1.2218 | 256.6 | 0.0445 | 0.36 |

Tabla 5 Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración a -15°C en el evaporador

Fuente: *Elaboración Propia*

| Estado | T (°C) | P (bar) | s (kJ/Kg°K) | h (kJ/Kg) | v (m³/kg) | Calidad (x) |
|--------|--------|---------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | -20 | 1.33 | 1.7422 | 386.8 | 0.1474 | 1 |
| 2 | 54.04 | 10.18 | 1.7601 | 435.14 | 0.0219 | VSC |
| 3 | 40 | 10.18 | 1.1912 | 256.6 | 0.0009 | 0 |
| 4 | -20 | 1.33 | 1.2279 | 256.6 | 0.0578 | 0.39 |

Tabla 6 Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración a -20°C en el evaporador

Fuente: *Elaboración Propia*

Potencia mecánica del ciclo de refrigeración

El ajuste a cierta temperatura de refrigeración o congelación provoca que las propiedades del refrigerante se modifiquen, en las tablas 4, 5 y 6 se pueden ver las modificaciones de las variables del ciclo de refrigeración a diferentes temperaturas de congelación. Para calcular la potencia mecánica del compresor se considera un sistema adiabático y estacionario, en esta condición se aplica la ecuación (4)

$$w_c = (h_2 - h_1) \dot{m} \quad (4)$$

Donde: w_c es la potencia mecánica desarrollada por el compresor h_2 entalpía en el estado 2, en este estado se desarrolla presión por parte del compresor, h_1 entalpía en el estado 1 absorción del refrigerante en el compresor, \dot{m} flujo másico del refrigerante que atraviesa el compresor.

En la tabla 7, se presenta un resumen de la variación de la entalpía cuando se modifican las temperaturas de congelación, extraídas de las tablas 4, 5 y 6.

| T (°C) Temperatura de Congelación evaporador | T (°C) Temperatura de Condensador | h2 (kJ/Kg) | h1 (kJ/Kg) |
|--|-----------------------------------|------------|------------|
| -10 | 40 | 431.36 | 392.9 |
| -15 | 40 | 433.17 | 389.8 |
| -20 | 40 | 435.14 | 386.8 |

Tabla 7 Variación de entalpía a diferentes temperaturas en el evaporador

Fuente: *Elaboración Propia*

En los sistemas de refrigeración el coeficiente operacional (COP) describe la cantidad de energía en forma de calor retirado por cada watt mecánico del compresor ecuación (5).

$$COP = \frac{Q_B}{w_c} \quad (5)$$

El calor retirado en el evaporador (Q_B) y su vecindad se obtiene a partir de la ecuación (6) a medida que el refrigerante circula desde el estado 4 al 1.

$$Q_B = (h_1 - h_4)\dot{m} \quad (6)$$

Donde: Q_B calor retirado en el evaporador, h_1 entalpía en el estado 1, succión del compresor con ganancia de calor en el refrigerante al pasar por el evaporador, h_4 refrigerante sin calor absorbido.

En la tabla 8 se presentan datos calculados de la potencia mecánica (w_c), la diferencia de entalpías de la ecuación (4) y el COP desarrollado por el compresor al modificarse las temperaturas de congelación, en la columna 4 se observa el incremento de la potencia mecánica a medida que decrece la temperatura columna 1.

| T Congelación el Evaporador (°C) | Flujo másico en (\dot{m}) (Kg/s) | (h_2-h_1) (kJ/kg) | W_c (Watts) | COP |
|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|------|
| -10 | 1.127×10^{-3} | 38.46 | 43.37 | 3.5 |
| -15 | 1.153×10^{-3} | 43.37 | 50.00 | 3.07 |
| -20 | 1.180×10^{-3} | 48.34 | 57.00 | 2.7 |

Tabla 8 Variación de la potencia del compresor en función de la temperatura de congelación

Fuente: Elaboración Propia

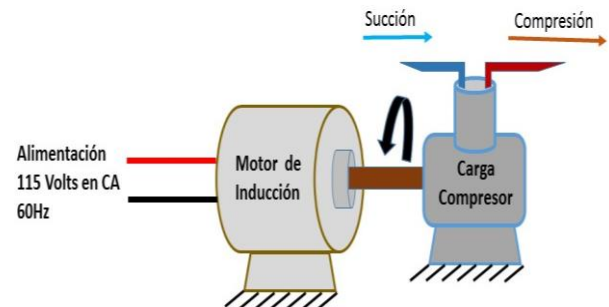
La capacidad de retiro de calor en los tres casos es de 0.1537 kJ/s, cantidad calculada para un refrigerador doméstico de 9 a 14 ft³, donde se almacena productos lácteos, carne, bebidas y vegetales.

Eficiencia del motor eléctrico

La distribución de energía eléctrica por CFE dentro del hogar es una alimentación de una sola fase en un rango de variación de 110 a 120 volts rms en corriente alterna (CA) a 60Hz, la demanda de corriente del motor dependerá directamente del funcionamiento propio y la carga conectada en la flecha del motor, es decir la compresión del refrigerante. En la figura 4 se observa la potencia desarrollada en el motor y compresor para mantener la presión y temperatura en el circuito de refrigeración, la alimentación al motor se traduce en potencia eléctrica para cubrir la potencia de funcionamiento del motor más la potencia mecánica del compresor con las variables térmicas del sistema de refrigeración. La potencia de entrada que el motor demanda de la línea de alimentación se expresa en la ecuación (7).

$$P = V \angle \theta \cdot I \angle \alpha \quad (7)$$

Donde: V voltaje de alimentación de la red eléctrica, θ ángulo de desfase de la onda de voltaje, I corriente que demanda el motor, α ángulo de desfase de la onda de corriente, P potencia promedio absorbida por el motor durante el funcionamiento.



$$\text{Potencia de Entrada} = \text{Potencia de Motor} + \text{Potencia de Carga}$$

Figura 4 Representación del motor físico y desarrollo de potencia en el motor y compresor.

Fuente: Elaboración Propia

Las máquinas eléctricas por naturaleza durante su funcionamiento tienen pérdidas de energía en sus diferentes tipos: calor, fricción mecánica, campos electromagnéticos, etc. Las pérdidas se pueden contemplar dentro del factor de potencia (η), dada por la ecuación (8).

$$\eta = \frac{P_{re}}{P_{ap}} \quad (8)$$

Donde: Potencia aparente (P_{ap}) es la potencia suministrada al compresor desde la toma eléctrica. Potencia real (P_{re}) es la potencia mecánica que demanda el compresor cuando es sometido a la carga dada por las variables de estado W_c , ecuación (4).

Los motores eléctricos cuando son de adquisición reciente su eficiencia ronda entre un 85 a 90 %. (Theodore, 2007).

Diagrama eléctrico del compresor e impedancia del motor

Los motores eléctricos utilizados para la fabricación de compresores de refrigeración y aire acondicionado son motores de inducción conocidos como tipo *jaula de ardilla* o de *fase partida*, ofrecen ventajas en la construcción y su funcionamiento, la representación simbólica del motor en un compresor se muestra en la figura 5.

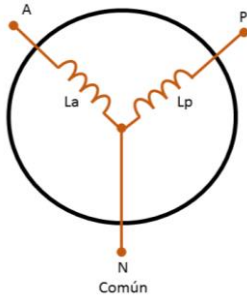


Figura 5 Símbolo del motor eléctrico en un compresor
Fuente: *Elaboración Propia*

El motor eléctrico consta de dos bobinas llamadas devanado *principal* (L_p) y *auxiliar* (L_a), en los puntos A y P se conecta la misma fase de alimentación con un circuito auxiliar que consta de un relevador para la desconexión del devanado auxiliar y mantener en conexión el devanado L_p . Sus características principales de las bobinas son el número de espiras y el diámetro diferente de los conductores de ambas bobinas.

La finalidad de los diferentes devanados consiste en la creación de dos campos magnéticos desfasados aproximadamente $\pi/9$ entre las corrientes de cada devanado L_a y L_p y aproximadamente $\pi/2$ con respecto al voltaje, para la producción de un impulso giratorio en el rotor, una vez que se ha alcanzado la velocidad suficiente en el rotor, la corriente disminuirá gradualmente hasta la desconexión del devanado auxiliar, manteniéndose en funcionamiento únicamente el devanado principal una vez que se mantenga la velocidad y la corriente nominal (I_t). (Alexander, 2006). En la figura 6, se representa el diagrama completo del motor de inducción.

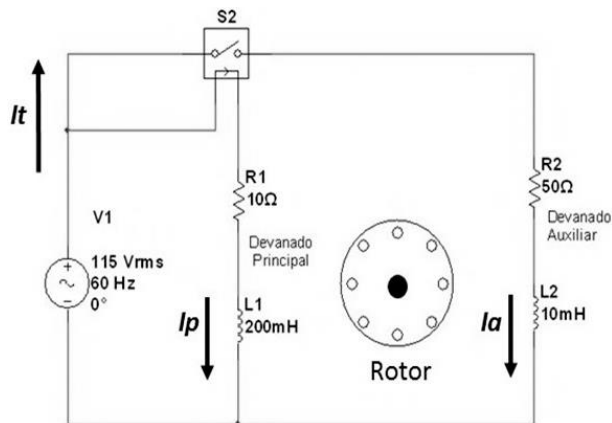


Figura 6 Representación del motor de inducción con alimentación
Fuente: *Elaboración Propia*

Se observa el devanado auxiliar conectado al interruptor (s_2) del relevador, cuando la bobina del relevador se alimenta a través del devanado principal del compresor durante el arranque se demanda grandes cantidades de corriente que provoca la conexión de la bobina auxiliar, generando las corrientes de los devanados *principal* (I_p) y *auxiliar* (I_a) respectivamente. La corriente total (I_t) que demanda el compresor en el arranque se representa en la ecuación (9).

$$I_t = I_a + I_p \tag{9}$$

Donde: I_t es la corriente total que demanda el motor, I_a corriente del devanado auxiliar e I_p corriente del devanado principal. La figura 7 representa el diagrama equivalente del motor de inducción de un compresor, con los valores respectivos de la inductancia y resistencia de cada una de las bobinas.

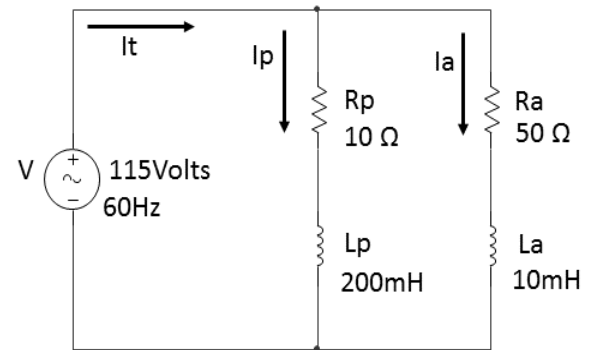


Figura 7 Diagrama de las corrientes y devanados del motor
Fuente: *Elaboración Propia*

La impedancia de cada devanado del motor se muestra en la configuración paralela de la figura 8, las expresiones (10) y (11) son valores reales de los devanados Z_a y Z_p Las unidades de las impedancias se expresan en ohms (Ω).

$$Z_p = 10 + 75.4j \tag{10}$$

$$Z_a = 50 + 3.77j \tag{11}$$

En su forma vectorial se expresan en las ecuaciones (12) y (13)

$$Z_p = 76.06 \angle 82.44^\circ \tag{12}$$

$$Z_p = 50.14 \angle 4.31^\circ \tag{13}$$

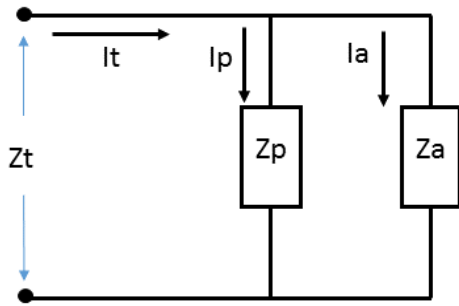


Figura 8 Impedancias de los devanados LP y La del motor
Fuente: *Elaboración Propia*

La impedancia Z_p y Z_a se encuentran en paralelo por lo tanto la impedancia total (Z_T) se expresa en la ecuación (14), la figura 9 presenta la impedancia total o equivalente que ofrece el motor al momento del arranque, ambas bobinas están en conexión por lo tanto se tiene una corriente total (I_T)

$$Z_T = \frac{Z_a \cdot Z_p}{Z_a + Z_p} \tag{14}$$

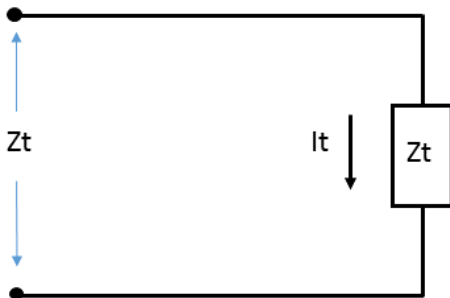


Figura 9 Impedancia total de los devanados del motor
Fuente: *Elaboración Propia*

La impedancia total se expresa en la ecuación (15).

$$Z_T = 31.86 + 21.42j \tag{15}$$

Representación vectorial ecuación (16)

$$Z_T = 38.40 \angle 33.91^\circ \tag{16}$$

En la figura 10, se representa la impedancia de los devanados L_p , L_a y L_T que ofrecen los devanados del motor en su forma vectorial en conexión paralela con la fuente de alimentación.

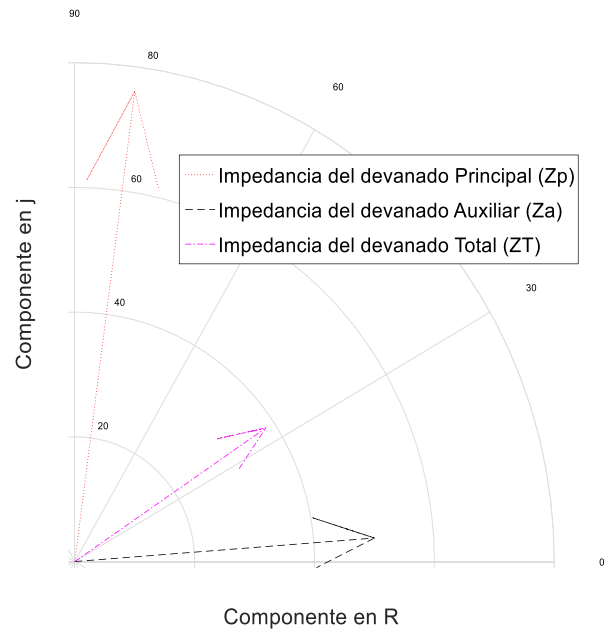


Figura 10 Forma vectorial de los devanados del motor
Fuente: *Elaboración Propia*

Demanda de Corriente en el compresor considerando la carga y la eficiencia

Para calcular la demanda de corriente del motor se toma en cuenta la eficiencia del compresor, potencia mecánica de la carga térmica, la impedancia de los devanados del motor. Aplicando la ecuación de la potencia en la entrada, compresor y motor:

$$P_{Entrada} = P_{Motor} + P_{Mecánica} \tag{17}$$

La ecuación (17) se escribe:

$$V_{rms}[\theta] \cdot I_{rms}[\alpha] = \frac{V_{rms}^2[\theta]}{Z_T} + \frac{P_M}{\eta} \tag{18}$$

Donde: V_{rms} es el voltaje efectivo de alimentación al compresor (115 Volts), I_{rms} corriente efectiva que demanda el compresor durante su funcionamiento $P_M = w_c$, potencia mecánica (carga térmica), $\eta = 0.85$ eficiencia del motor y sistema mecánico del compresor. θ ángulo desfasado de voltaje, α ángulo desfasado de corriente, Z_T impedancia total de los devanados del motor. Despejando la corriente de la ecuación (18) tenemos:

$$I_{rms}[\alpha] = \frac{V_{rms}^2[\theta] \cdot \eta + Z_T P_M}{Z_T \eta V_{rms}[\theta]} \tag{19}$$

De otra forma se tiene:

$$I_{rms}[\alpha] = \frac{V_{rms}^2[\theta] \cdot \eta + Z_T \cdot [(h_2 - h_1) \cdot \dot{m}]}{Z_T \cdot \eta \cdot V_{rms}[\theta]} \tag{20}$$

La ecuación (20) es el modelo que expresa la demanda de corriente del compresor donde existe dependencia directa de la potencia mecánica $w_c = P_M$ ecuación (4), suficiente para establecer las variables térmicas que afectan la temperatura de refrigeración o congelación.

Resultados

La cantidad de corriente efectiva (rms) total que se demanda para establecer temperaturas de -10, -15 y -20 °C respectivamente se presentan en los siguientes resultados:

$$I_{rms} = 3.37|_{-29.9^\circ}(\text{Amp})$$

$$I_{rms} = 3.43|_{-29^\circ}(\text{Amp})$$

$$I_{rms} = 3.50|_{-28.5^\circ}(\text{Amp})$$

La conversión para cada una de las corrientes en forma de Euler, es necesario obtener la amplitud máxima de la corriente o corriente pico (I_p) con la ecuación (21).

$$I_p = I_{rms} \cdot \sqrt{2}(\text{Amp}) \tag{21}$$

Entonces se tiene:

$$I = 4.76e^{-29.9j}(\text{Amp})$$

$$I = 4.85e^{-29j}(\text{Amp})$$

$$I = 4.95e^{-28.5j}(\text{Amp})$$

Las corrientes en forma de Euler:

$$4.76e^{-29.9j} = 4.76[\text{Cos}(-29.9^\circ) + \text{Sen}(-29.9^\circ)j](\text{Amp})$$

$$4.85e^{-29j} = 4.85[\text{Cos}(-29^\circ) + \text{Sen}(-29^\circ)j](\text{Amp})$$

$$4.76e^{-28.5j} = 4.95[\text{Cos}(-28.5^\circ) + \text{Sen}(-28.5^\circ)j](\text{Amp})$$

En la tabla 9, se resumen los datos de las corrientes y la demanda de potencia. Se observa ligeramente el incremento de corriente y el consumo de potencia eléctrica que es suministrada por la alimentación de 115 Volts, quiere decir que a menor temperatura de congelación la demanda del consumo eléctrico se incrementa por parte del sistema de refrigeración.

| T (°C) | Vrms (Volts) | Irms (Amperes) | P _M Potencia de compresión (Watts) | Ángulo de atraso (α) | P _T Potencia Total de Consumo (Watts) |
|--------|--------------|----------------|---|----------------------|--|
| -10 | 115 | 3.37 | 43.36 | -29.9° | 387.55 |
| -15 | 115 | 3.41 | 50 | -29.13° | 392.15 |
| -20 | 115 | 3.50 | 57 | -28° | 402.5 |

Tabla 9 Demanda de corriente y potencia del compresor
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 11, se muestra la corriente en forma vectorial a diferentes temperaturas, al cambiar la temperatura se modifica ligeramente el ángulo de desfase.

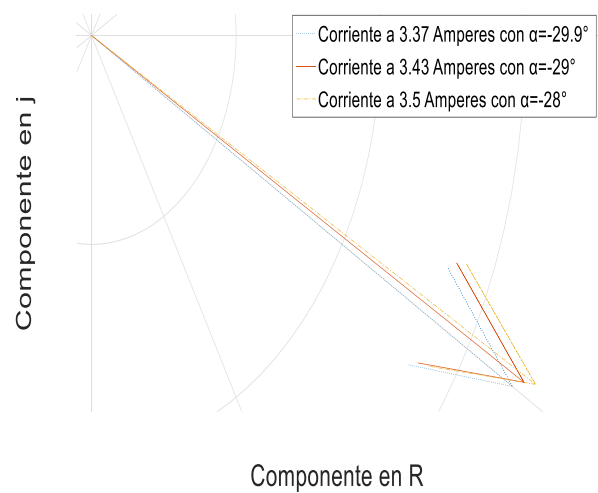


Figura 11 Forma vectorial de la corriente a la modificación de temperatura
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 12, se muestra el comportamiento de la corriente en forma cosenoidal en función del ángulo y del tiempo con una frecuencia de 60Hz a diferentes temperaturas.

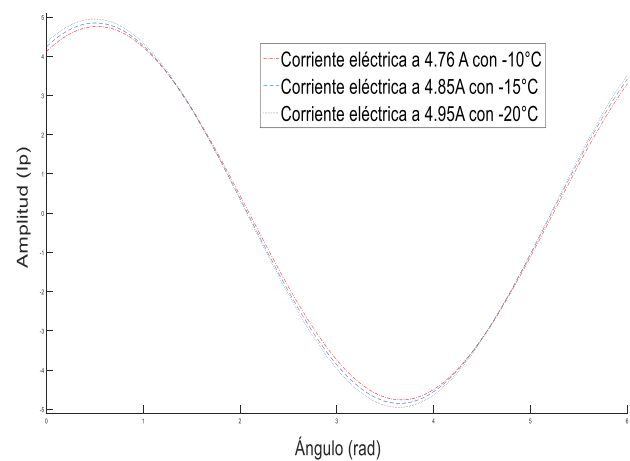


Figura 12 Formas de onda cosenoidal a diferente amplitud y ligero desfase.
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 13, se muestran el comparativo entre las funciones cosenoidales de voltaje y corriente donde se observa el desfase de -28.5° , -29° y -29.9° aproximadamente por el efecto de modificación de la temperatura en el compresor, a un voltaje de alimentación de 115 Volts efectivos.

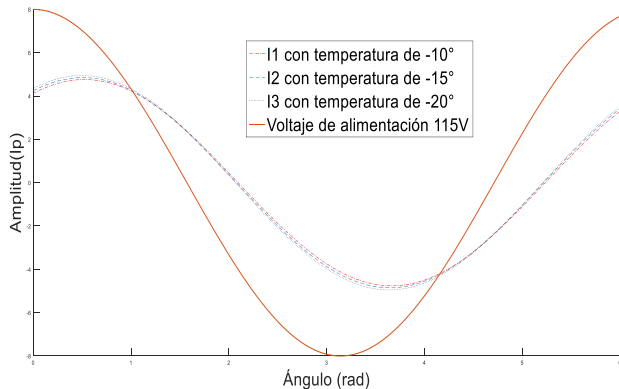


Figura 13 Voltaje de alimentación desfasado con respecto a la corriente a diferentes temperaturas

Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones

Los resultados proporciona comportamientos de incremento de corriente eléctrica cuando se exige una mayor temperatura de congelación al sistema, este efecto se refleja en el incremento de potencia consumida a medida que la temperatura de congelación se modifica, el análisis puede ser aplicado para sistemas de mayor capacidad de refrigeración a nivel industrial, donde la demanda de corriente son de mayor impacto.

Como se puede observar en los puntos 1 y 2 de la gráfica del comportamiento del sistema de refrigeración, el resultado es una mayor demanda de trabajo para el compresor, lo que implica un mayor gasto de energía eléctrica. Ante esta situación es inevitable ajustar la temperatura de un refrigerador, dado que en todo el año existen diferencias de temperatura según la localidad y la estación del año.

Referencias

Alexander, CH. (2006). Fundamentos de Circuitos Eléctricos. CD de México: Mc Graw Hill.

Chapman, S. (2012). Electric Machinery Fundamentals. New York: Mc Graw Hill.

Hayt, W. (2012). Análisis de Circuitos Eléctricos en Ingeniería. CD de México: Mc Graw Hill

Ibrahim, D. (2010). Refrigeration systems and applications. United Kingdom: Wiley.

Joaquín, C. (2017). Balance Nacional de Energía 2016. México: Secretaría de Energía.

Morán, M. (2005). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Barcelona: Reverte.

Pira, E. (2008). Principios y sistemas de Refrigeración. México: Limusa.

Sáenz, F. (2002). Máquinas eléctricas. Madrid: Prentice Hall.

Shan, K. (2001). Handbook of Air Conditioning and Refrigeration. New York: Mc Graw Hill.

Theodore, W. (2007). Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. México: Prentice Hall.

William, C. (2006). Tecnología de la Refrigeración y aire Acondicionado 1, Fundamentos. Madrid: Paraninfo.