



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO

DICTAMEN DE LIBERACIÓN DE PROYECTO
DE TESIS

FO-TESE-DA-90
TIT05-ANEXO PM



DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

Fecha: 30 DE NOVIEMBRE DE 2018

Datos generales

Nombre del alumno:

PÉREZ

LULE

SALVADOR

Apellido paterno

Apellido materno

Nombres (s)

Matricula: 201621451

PROYECTO: ANÁLISIS Y DISEÑO DE CONTROLADOR DE VELOCIDAD EN COMPRESOR HERMÉTICO MONOFÁSICO PARA MINIMIZAR EL CONSUMO ELÉCTRICO DURANTE EL ARRANQUE

DIRECTOR: M. EN C. JOSÉ CARLOS A. AGUILAR ANASTACIO

Dictamen:

Con base en el registro No. POSG-MPEER/DIMMI/2018/06 correspondiente al periodo escolar 2018-2, asignado al proyecto de tesis ANÁLISIS Y DISEÑO DE CONTROLADOR DE VELOCIDAD EN COMPRESOR HERMÉTICO MONOFÁSICO PARA MINIMIZAR EL CONSUMO ELÉCTRICO DURANTE EL ARRANQUE y presentado por el alumno referido; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI (X) NO () han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

NINGUNA

Comité tutorial

M en C. JOSÉ C. A. AGUILAR ANASTACIO

Dr. AGUSTÍN MORA ORTEGA

Dr. MARTÍN SALAZAR PEREYRA

M en C. WENCESLAO C. BONILLA BLANCAS

Elaboró:	Revisó y Visto Bueno:	Enterado:
 Dr. AGUSTÍN MORA ORTEGA Coordinador de Posgrado	 M en DO. HÉCTOR RODRÍGUEZ CARMONA Jefe de División	 M en C. ARMANDO ALCALDE MARTÍNEZ Director Académico

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL

Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables



ANÁLISIS Y DISEÑO DE CONTROLADOR DE VELOCIDAD EN COMPRESOR HERMÉTICO MONOFÁSICO PARA MINIMIZAR EL CONSUMO ELÉCTRICO DURANTE EL ARRANQUE

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA

ING. SALVADOR PÉREZ LULE

DIRECTOR DE TESIS

M. EN C. JOSÉ CARLOS A. AGUILAR ANASTACIO

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo que me brindaron lo cual fue de gran ayuda en mi sostén económico como estudiante.

A mis profesores de la Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables quienes me enseñaron y me impulsaron a aprender y me dieron su voto de confianza para ingresar a esta Maestría.

A mis padres quienes son los mayores impulsores en mis estudios, les agradezco por la educación ética y moral que fue lo mejor que me han dado, a mis hermanos, hermanita y abuelita les agradezco por su apoyo moral que me han brindado y por quienes sigo adelante.

Agradezco a mi asesor y director de tesis el Maestro José Carlos Aguilar Anastacio quien me ha guiado y enseñado muchos conocimientos que han sido de gran ayuda durante estos dos años y el logro de este trabajo, al Dr. Martín Salazar Pereyra quien me dio su voto de confianza y me ha dado muchos conocimientos.

Un agradecimiento especial a David Muñoz por su ayuda en la experimentación del proyecto y a mis compañeros de maestría quienes se convirtieron en mis amigos y con quienes compartí parte de mi tiempo.

Resumen

Dentro del hogar y la industria una de las problemáticas que se tienen en los sistemas de refrigeración es el alto consumo eléctrico durante el arranque o funcionamiento, generando altos picos de consumo que rondan en un porcentaje de más del 600% del nominal, esto representa un alto costo por facturación eléctrica durante un cierto intervalo de tiempo. Uno de los elementos principales del sistema y causante de la mayor demanda eléctrica es el compresor, cuya función principal es la recirculación del agente refrigerante a través de un circuito de tuberías en conjunto con otros elementos, con la finalidad de realizar la acción del efecto refrigerante desplazando el calor de un punto a otro, este se compone de un motor de inducción de fase partida alimentado con 110 Volts en corriente alterna a 60 Hertz.

En esta tesis se propone analizar y diseñar un controlador de velocidad variable en lazo abierto para minimizar la demanda de corriente eléctrica durante el encendido del compresor, aplicando circuitos de electrónica de potencia con técnicas de modulación de ancho de pulso y variación de frecuencia. La metodología aplicada consiste en el análisis y desarrollo de ecuaciones de potencia eléctrica que demuestren la minimización o reducción de los picos de consumo durante el arranque del motor eléctrico, considerando la carga térmica del sistema de refrigeración. Se propone como solución del problema la técnica de inversión de voltaje en puente completo con control en lazo abierto, los resultados del modelo matemático serán comprobados y analizados a través de simulaciones.

Los resultados esperados demuestran que la técnica de inversión de voltaje puede ser aplicable para la reducción de los picos de consumo eléctrico durante el arranque del compresor en un 34%. Se realiza un comparativo de resultados entre un sistema de refrigeración con implementación del controlador y sin controlador de velocidad.

Abstract

Inside the home and industry, one of the problems that exist in refrigeration systems is the high electrical consumption during startup or operation, generating high consumption peaks that over at a percentage of more than 600% of the nominal, this represents a high cost for electric billing during a certain time interval. One of the main elements of the system and causing the greatest electrical demand is the compressor, whose main function is the recirculation of the cooling agent through a pipe circuit in conjunction with other elements, in order to perform the action of the cooling effect displacing the heat from one point to another, this is composed of a split – phase induction motor powered with 110 Volts in alternating current at 60 Hertz.

In this thesis, it is proposed to analyze and design an open- loop variable speed controller to minimize the demand of electric current during the compressor's start up, applying power electronics circuits with pulse width modulation and frequency variation techniques. The applied methodology consists of the analysis and development of electric power equations that demonstrate the minimization or reduction of consumption peaks during the startup of the electrical motor, considering the thermal load of the cooling system. As a solution to the problem, the technique of inverting the voltage in full bridge with open loop control is proposed, the results of the mathematical model will be checked and analyzed through simulations.

The expected results show that the voltage reversal technique can be applicable for the reduction of the electrical consumption peaks during the start of the compressor in a 34%. A comparison of results is made between a refrigeration system with controller implementation and without a speed controller.

Agradecimientos.	I.
Resumen.	II.
Abstract.	III.
Índice General.	IV.
Lista de figuras.	VI.
Lista de Tablas.	VIII.

Índice General

CAPITULO 1	1.
1.1. Introducción.	2.
1.2. Planteamiento del problema.	3.
1.3. Propuesta.	3.
1.4. Objetivo general.	4.
1.5. Objetivos Particulares.	4.
1.6. Metodología.	5.
 CAPITULO 2	
Marco teórico.	6.
2.1. Historia de la refrigeración.	7.
2.2. Ciclo de refrigeración.	8.
2.3. Carga térmica.	9.
2.4. Refrigerantes.	10.
2.5. Tipos de Compresores.	12.
2.6. Motor de Inducción.	15.
2.7. Deslizamiento del rotor.	16.
2.8 Control ON-OFF.	17.
 CAPITULO 3	
Modelado del sistema de refrigeración de motor y sistema de control.	19.
3.1. Balance de energía en el espacio de refrigeración.	20.
3.2. Análisis de estados del ciclo de refrigeración.	20.
3.3. Balance de energía en el evaporador, compresor y COP.	23.
3.4. Pérdidas de energía en el mecanismo manivela biela y pistón.	25.
3.5. Modelado del sistema de control.	27.
3.6. Modelado del motor eléctrico.	32.
3.7. Potencia y torque del compresor.	44.
 CAPITULO 4	
Resultados y conclusiones.	48.
4.1. Resultados del modelo matemático de la corriente eléctrica, voltaje, potencia y torque en el estator y rotor.	49.
4.2. Diseño del circuito físico del variador de voltaje e inversor de voltaje.	52.
4.3 Resultados del circuito de MAP.	53.

4.4. Consumo eléctrico del motor de compresor.	55.
Conclusiones.	57.
Referencias.	58.

Lista de Figuras

- Fig. 2.1. Máquina de refrigeración de Jacob Perkins.
- Fig. 2.2. Representación esquemática del circuito de refrigeración.
- Fig. 2.3. Índices de potencial de calentamiento global y potencial de agotamiento de ozono de los refrigerantes.
- Fig. 2.4. Compresor de desplazamiento, a) reciprocante, b) tornillo, c) scroll.
- Fig. 2.5. Compresor dinámico, a) centrífugo, b) turbocompresor.
- Fig. 2.6. Partes del compresor hermético.
- Fig. 2.7. Motor monofásico: a) partes del motor, b) rotor jaula de ardilla.
- Fig. 2.8. Representación esquemática del control ON-OFF.
- Fig. 3.1. Diagrama esquemático del ciclo de refrigeración.
- Fig. 3.2. Diagrama T-h con refrigerante HFC-134a con tres temperaturas en el evaporador.
- Fig. 3.3. Mecanismos, a) Manivela biela-pistón, b) Análisis de pérdidas por fricción.
- Fig. 3.4. Etapas del sistema controlador de velocidad.
- Fig. 3.5. Función senoidal $V(t) = \text{sen}(wt)$.
- Fig. 3.6. Ángulo de disparo $\alpha = 2.62$ rad a un voltaje rms de 20.67 volts.
- Fig. 3.7. Ángulo de disparo $\alpha = 1.58$ rad a un voltaje rms de 86.06 volts.
- Fig. 3.8. Ángulo de disparo $\alpha = 0.35$ rad a un voltaje rms de 121.17 volts.
- Fig. 3.9. Gráfica obtenida del convertidor de voltaje CA-CD.
- Fig. 3.10. Voltaje en onda cuadrada $V_{in}(t)$, en tiempo en alto (t_a) y bajo (t_b) variable.
- Fig. 3.11. Convertidor en puente completo.
- Fig. 3.12. Motor monofásico: a) partes del motor, b) rotor jaula de ardilla.
- Fig. 3.13. Circuito equivalente del motor jaula de ardilla.
- Fig. 3.14. Circuito del motor jaula de ardilla, simbolizando las impedancias.
- Fig. 3.15. Diagrama de flujo de potencia en el motor del compresor.
- Fig. 4.1. Gráfica de $I_{Tot} = I_e + I_r$ en diferentes valores del deslizamiento.
- Fig. 4.2. Gráfica de V_e en diferentes valores del deslizamiento.

- Fig. 4.3. Gráfica de V_r en diferentes valores del deslizamiento.
- Fig. 4.4. Gráfica de P_{Tot} en diferentes valores del deslizamiento.
- Fig. 4.5. Gráfica de T_{Tot} en diferentes valores del deslizamiento.
- Fig. 4.6. Circuito físico del sistema de control para la variación de velocidad.
- Fig. 4.7. Frecuencia a 10 Hertz a un voltaje pico de 104 volts.
- Fig. 4.8. Frecuencia a 20 Hertz a un voltaje pico de 106 volts.
- Fig. 4.9. Frecuencia a 30 Hertz a un voltaje pico de 108 volts.
- Fig. 4.10. Frecuencia a 40 Hertz a un voltaje pico de 111 volts.
- Fig. 4.11. Frecuencia a 50 Hertz a un voltaje pico de 34.6 volts.
- Fig. 4.12. Frecuencia a 60 Hertz a un voltaje pico de 34.3 volts.
- Fig. 4.13. Gráfica del consumo de corriente eléctrica del motor de compresor.
- Fig. 4.14. Gráfica del consumo de corriente eléctrica del motor con la implementación del sistema de control.

Lista de tablas

Tabla 3.1. Productos que producen la carga térmica en la cámara fría del refrigerador.

Tabla 3.2. Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración con temperatura de evaporación a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 3.3. Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración con temperatura de evaporación a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 3.4. Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración con temperatura de evaporación a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 3.5. Potencia \dot{W} y COP, para tres temperaturas de evaporación con refrigerante HFC-134a.

Tabla 3.6. Valores del ángulo de disparo y voltaje en función del tiempo correspondiente.

Tabla 4.1. Valores del deslizamiento de 0 a 1 en función de la velocidad síncrona.

Tabla 4.2. Variación de la frecuencia y periodo de la onda de voltaje.

CAPITULO 1

Introducción

En este capítulo se plantea la problemática que existe dentro de los sistemas de refrigeración y la propuesta de solución, se propone el objetivo principal y particulares de este trabajo, se expone la metodología para la propuesta de solución.

1.1. Introducción

En recientes años la expansión demográfica en nuestro país ha contribuido a incrementar el consumo eléctrico, lo que significa mayor inversión de hidrocarburo para el sostenimiento de la demanda de energía eléctrica de la población, en consecuencia considerando la problemática actual, la disminución de la producción de barriles de petróleo en el país por la sobre explotación de los yacimientos petroleros y los bajos precios de los hidrocarburos, ha ocasionado el encarecimiento del servicio de energía eléctrica por parte de la paraestatal afectando principalmente al sector social e industrial. Ante esta problemática se busca incrementar la eficiencia de los aparatos eléctricos industriales y del hogar con el máximo aprovechamiento en su funcionamiento con el menor consumo eléctrico posible, es por ello que las investigaciones en el aprovechamiento energético y el incremento de la eficiencia en los sistemas eléctricos se han estado desarrollando continuamente hasta nuestros días. Tal es el caso particular de los sistemas de refrigeración, según la Comisión Federal de Electricidad (CFE), estos sistemas se encuentran dentro de los aparatos de mayor consumo eléctrico en la industria y en el hogar.

Los sistemas de refrigeración, aire acondicionado, calefacción y ventilación consumen el 30% de la energía total en todo el mundo (Bejarano, 2016), por este motivo la eficiencia energética se lleva a cabo en los sistemas de refrigeración con sistemas de control de lazo abierto y cerrado (Qureshi, 1995). Estos sistemas se componen de cuatro dispositivos los cuales son; compresor, evaporador, condensador y la válvula de expansión. El compresor ésta construido con sistemas mecánicos como válvulas de succión, expulsión, manivela, biela, pistón y motor eléctrico de tipo inducción (Chapman, 2012), (Wildi, 2007). Estos sistemas por su naturaleza tienen pequeñas pérdidas de energía que podría ser despreciable.

En la actualidad los sistemas de refrigeración mantienen un control sencillo de tipo ON-OFF (encendido-apagado), esto implica que el motor es accionado varias veces al día sin alguna precisión en el control. Estos sistemas tienen la problemática de realizar una mayor demanda de energía durante el arranque ya que debe vencer la inercia de la flecha junto con la carga para realizar la recirculación del refrigerante en el sistema, lo cual se ve reflejado como un alto pico de consumo eléctrico dentro de un intervalo de tiempo hasta alcanzar la velocidad nominal del compresor.

El desarrollo de este trabajo pretende disminuir los picos que se generan durante el arranque del compresor variando la velocidad desde un estado de reposo hasta la velocidad nominal del compresor, implementando técnicas de control de lazo abierto en las variables de voltaje y corriente.

1.2. Planteamiento del problema

Parte fundamental del sistema de refrigeración en la compresión y succión del agente refrigerante dentro de un circuito de refrigeración para disminución de temperatura es el compresor, este se compone de un motor de inducción de fase partida con una alimentación en corriente alterna (CA) de 110, 220 hasta 440 Volts, a 60Hz, según la potencia del compresor.

Dentro del hogar y la industria uno de los problemas que se tienen en los sistemas de refrigeración es la alta demanda de energía eléctrica durante el arranque, generando altos picos de consumo en un porcentaje de más del 600% a plena carga (Petruzella, 2010). La problemática principal se encuentra en el tipo de control de los sistemas de refrigeración donde la gran mayoría de los controladores son de retroalimentación tipo (ON - OFF) todo o nada, este se lleva a cabo a través de un sensor de temperatura, dicho sensor se ajusta a una temperatura de referencia inferior a los -10°C en el congelador, al incrementar la temperatura provocará que el compresor realice la acción de bombear el refrigerante para disminuir la temperatura del congelador, el encendido del compresor se realiza a plena carga conectando súbitamente la energía eléctrica al compresor, el efecto presente es un incremento de corriente eléctrica mientras el rotor se encuentra en el estado de reposo, cuando el rotor alcanza la velocidad asíncrona existe un decremento en el consumo de corriente hasta un valor nominal, este efecto se presenta de forma cíclica durante el día y noche, los ciclos de actuación tienen una duración aproximada de una hora, esto implica que el motor arranca 24 veces al día, en un año de cuantificación se realizan un total de 8760 arranques de compresor al año. En algunos refrigeradores el ciclo ON-OFF tiene un intervalo entre 40 y 50 minutos en estos casos se alcanzan entre 10512 y 13140 arranques al año respectivamente, con un impacto directo en el consumo eléctrico reflejado en altos costos para el cliente final.

1.3. Propuesta

En este trabajo se propone analizar y diseñar un sistema de control de lazo abierto para minimizar el consumo eléctrico durante el arranque del compresor hermético, considerando la carga térmica del sistema y las temperaturas nominales de refrigeración, el incremento de la velocidad en el motor se realiza con la aplicación de técnicas de variación de voltaje con el método de modulación de ancho de pulso (MAP) e inversión de voltaje en puente completo, se aplica un sistema de temporización durante el arranque para el control del incremento de corriente en la etapa inversora, dicho controlador se desconecta una vez alcanzada la velocidad nominal del motor, una característica principal en el diseño del controlador es no contar con la aplicación de sensor de velocidad como retroalimentación.

1.4. Objetivo general

Análisis y diseño de un controlador de velocidad en lazo abierto para minimizar el consumo eléctrico durante el arranque en un compresor hermético monofásico de baja potencia.

1.5. Objetivos específicos

- Instrumentación del sistema de refrigeración doméstico para el monitoreo de las temperaturas de evaporación y condensación.
- Análisis de carga térmica y de los estados del sistema de refrigeración de baja potencia a temperaturas de -10, -15 y -20°C.
- Desarrollo del modelo matemático de la demanda de potencia en el sistema térmico y motor eléctrico.
- Desarrollo del controlador de velocidad en lazo abierto con la técnica de modulación de ancho de pulso e inversión de voltaje en puente completo.
- Simulación y experimentación de los modelos matemáticos obtenidos para la comprobación de resultados.

1.6. Metodología

El desarrollo del proyecto se realiza aplicando la siguiente metodología, como primera etapa se realiza la toma de lecturas de temperatura en el congelador y condensador de un sistema de refrigeración doméstico, para obtener las variables de estado del refrigerante a partir de un sistema real, necesarios para calcular la potencia desarrollada del compresor y la energía que se pierde en los mecanismo manivela biela pistón.

En una segunda etapa se realiza el análisis del circuito del motor eléctrico en el dominio de la frecuencia, resolviendo algebraicamente se obtiene el modelo matemático del voltaje y corriente eléctrica en el estator y rotor a partir del deslizamiento del motor.

Como tercera etapa se realiza la integración y resultados de los modelos obtenidos para su comprobación.

Finalmente se realizan las comprobaciones de los modelos obtenidos con la representación de las gráficas de los comportamientos de los modelos obtenidos como resultados.

Como parte final se hace la experimentación en la que se elabora el circuito equivalente del variador de voltaje acoplado al convertidor CA-CD, pasando a un inversor CD-CA en el que se varía la frecuencia, este circuito esta previamente controlado y programado para dar los valores necesarios en el caso de la variación de voltaje y frecuencia.

CAPITULO 2

Marco teórico

Introducción

En este capítulo se realiza la descripción del funcionamiento de los sistemas de refrigeración, construcción interna del compresor, partes principales del motor de inducción y un panorama de los sistemas de control on-off.

2.1. Historia de la refrigeración

La refrigeración ha existido desde hace muchos años, los chinos almacenaban hielo durante el invierno en cavernas para después usarlos durante el verano, los antiguos egipcios colocaban vasijas con agua al aire libre durante la noche para que el aire frío congelara el agua para producir hielo (Whitman, 2009), las personas sabían que cualquier parte del cuerpo que se mojara se sentía fría al secarse en el agua (Dincer, 2010).

Una de las primeras patentes registradas para una máquina de refrigeración en Gran Bretaña en 1834 fue por el americano Jacob Perkins, en la Fig. 2.1, se muestra las partes principales esta unidad se compone de cuatro dispositivos; compresor operado a mano, condensador, válvula de descarga, y el evaporador inmerso en un líquido frío (Jordan, 1948), (Dincer, 2010).

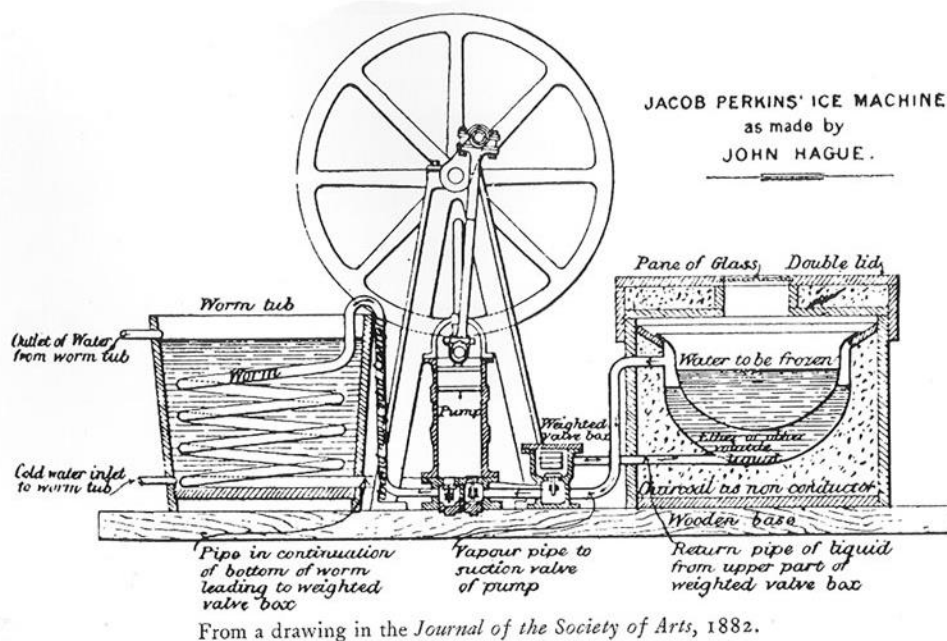


Fig. 2.1. Máquina de refrigeración de Jacob Perkins.

Los primeros refrigerantes además del agua y el éter fueron descubiertos en 1850 por Faraday Thilorier y otros como el dióxido de carbono y amoníaco (Dincer, 2010).

En Francia F. P. E. Carrier desarrolló e instaló una máquina de éter, Charles Tellier construyó una planta que utilizaba éter de metilo como refrigerante, Carl Lindes estableció una unidad de éter metílico en 1874 en Alemania, Tellier desarrolló una máquina de compresión de amoníaco en la década de 1860 (Dincer, 2010).

El Dr. John Gorrie en 1851 obtuvo la primera patente en América de una máquina de hielo que usaba aire comprimido como refrigerante, fue motivado por el interés de aliviar los sufrimientos de sus pacientes de la fiebre.

El Dr. Kirk de Inglaterra en 1861 construyó una máquina de aire frío, de la cual su rendimiento fue que por cada libra de carbón éste producía dos libras de hielo (Jordan, 1948). Franz Windhausen inventó una máquina de ciclo cerrado y la patentó en América en 1870.

En 1860 Ferdinand P. Edmond Carrier, invento un aparato de absorción de amoníaco crudo para producir hielo, su aparato tenía una bomba de mano y podía congelar una pequeña cantidad de agua. H. A. Fleuss diseño una bomba efectiva para una máquina de absorción. Alexander C. Twining invento y patento una de las primeras máquinas de compresión en 1853, (Dincer, 2010).

En 1876 Linde obtuvo una patente de máquinas de compresión de amoníaco y el año siguiente la instaló en la fábrica de cerveza Trieste. En la década de 1860 P. H. Van der Weyde de Filadelfia obtuvo una patente para una unidad de compresión con refrigerante compuesto de productos derivados del petróleo. En 1875 R. P. Pictet introdujo una máquina de compresión que utilizaba ácido sulfúrico (Dincer, 2010).

Entre 1850 y 1880 los europeos proporcionaron investigación científica para la refrigeración mecánica los americanos realizaron aportes tecnológicos en este campo. Tal es el caso del alemán, el Dr. A. W. Hoffman quien escribió que las máquinas de hielo pueden mejorar y aumentar su rendimiento, en la zona norte donde hay inconstancias en las estaciones del año. En 1914 la americana Florence Parpart obtuvo la patente del refrigerador eléctrico.

2.2. Ciclo de refrigeración

El circuito de refrigeración se compone por cuatro dispositivos los cuales son: evaporador, compresor, condensador y la válvula de expansión (Shan, 2001).

Evaporador: Es un dispositivo compuesto por un serpentín donde circula el agente refrigerante, el evaporador tiene la función de extraer el calor absorbido dentro de la cámara fría, en este dispositivo se encuentra el termostato que envía la señal de accionamiento al control ON-OFF.

Compresor: Es un dispositivo electromecánico que se compone por un mecanismo manivela, biela y pistón acoplado a un motor eléctrico, este dispositivo tiene la función de comprimir el gas refrigerante llevándolo de una presión baja a una presión alta, superior a la presión atmosférica.

Condensador: Dispositivo compuesto por un serpentín donde fluye el refrigerante, este dispositivo tiene la función de ceder el calor del refrigerante al ambiente

realizando cambio de fase de gas a líquida a presión constante a medida que fluye por el serpentín.

Válvula de expansión: Es un dispositivo que se compone de un tubo capilar con una diferencia de diámetros, se encarga de expandir el gas refrigerante llevándolo de una presión alta a baja. En la Fig. 2.2, se presenta el circuito del sistema de refrigeración con cada uno de sus componentes.

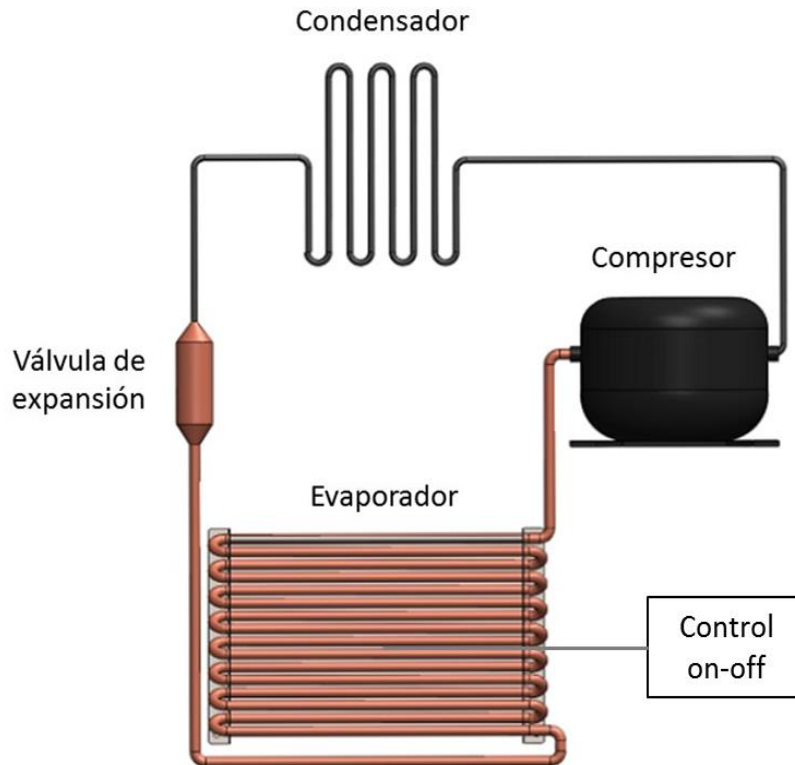


Fig. 2.2. Representación esquemática del circuito de refrigeración (fuente: el autor).

2.3. Carga térmica

La carga térmica (Q) es la cantidad de energía en forma de calor que se desea retirar del espacio a refrigerar, esta cantidad de energía es aquella que contienen los alimentos, bebidas o cualquier producto almacenado (Rapin, 1999), esto se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q = c m (T_{inicial} - T_{final}) \text{ [kJ]} \quad (2.1)$$

Donde:

c = calor específico del producto refrigerado [kJ/kg*K].

m = masa del producto refrigerado [kg].

$T_{inicial}$ = Temperatura inicial [K]

T_{final} = Temperatura final [K]

Es necesario conocer la cantidad de calor absorbido del espacio a refrigerar (Q_{ER}) para determinar la potencia del compresor (Rapin, 1999), (Pita, 1994) esto se hace con la suma o el total de las cargas térmicas (Q_{Total}) en el tiempo que trabaja el compresor:

$$Q_{ER} = \frac{Q_{Total}}{t} [kW] \quad (2.2)$$

Donde:

t = tiempo en segundos.

2.4 Refrigerantes

Los refrigerantes se dividen en cinco grupos principales (Dincer, 2010), aunque en esta sección solo se habla de dos más comerciales:

- Halocarbonos
- Hidrocarburos
- Compuestos inorgánicos
- Mezclas azeotrópicas
- Mezclas no azeotrópicas

Halocarbonos:

Los halocarbonos contienen alguno de los halógenos como; cloro, flúor, bromo, de esta clase de refrigerantes los que consisten en cloro, flúor y carbono son los denominados clorofluorocarbonos, (CFC). Entre estos refrigerantes se encuentran; CFC-11 o R-11, CFC-12 o R-12, CFC-113 o R-113, etc.

Hidrocarburos:

Consisten principalmente de carbono e hidrógeno, que incluyen al metano, etano, propano y butano, los hidrocarburos pueden ser refrigerantes alternativos ya que son baratos de producir, tienen un Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO) de cero y un Potencial de Calentamiento Global (PCG) muy bajo, estos tienen varios tipos de familias como son:

1. Los HCFC son compuestos que constan de hidrógenos, cloro y carbono, estos se utilizan para reemplazar a los CFC, por su menor grado de agotamiento a la capa de ozono, entre estos se encuentran R-22, R-123, R-124, etc.

2. Los hidrofluorocarbonos (HFC) constan de hidrógeno, flúor y carbono, estos se consideran para reemplazar a los CFC, ya que no contienen cloro y no agotan la capa de ozono, todos los HFC tienen un PAO de 0, aunque tienen un alto PCG, por mencionar algunos de estos, son: R-23, R-134a, R-152a, etc.

El PAO es un número que se refiere a la cantidad de agotamiento del ozono estratosférico causado por una sustancia, surge de una relación del impacto en el ozono de un producto químico en comparación de una masa similar de R-11, por lo tanto el PAO de R-11 se define como 1.0, otros CFC y HCFC tienen un PAO que va de 0.01 a 0.1. El PCG es un número que se refiere a la cantidad de calentamiento global causado por una sustancia, es la relación entre el calentamiento causado por una sustancia y el calentamiento causado por una masa similar de CO₂, por lo tanto el PCG del CO₂ es de 1.0, así el CFC-12 tiene un PCG de 8500, varios HCFC y HFC tienen un PCG que va de 93 a 12,100. En la Fig. 2.3, se puede observar el índice de PAO y PCG de los refrigerantes, el tamaño de los círculos es proporcional al número de años de vida que tienen en la atmósfera, por ejemplo el R-115 tiene un valor de 7200 años de vida mientras que el R-152a tiene un valor de 1.4 años.

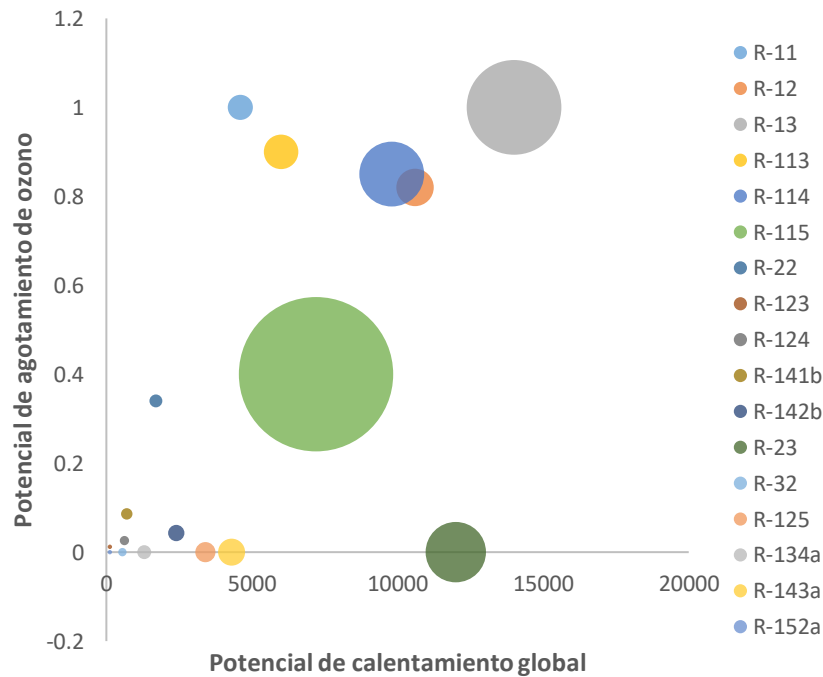


Fig. 2.3. Índices de potencial de calentamiento global y agotamiento de ozono de los refrigerantes.

2.5 Tipos de compresores

Existen dos categorías en las que se dividen los compresores (Dincer, 2010):

- De desplazamiento
- Dinámicos

Compresores de desplazamiento:

Utilizan el trabajo del eje para aumentar la presión del gas refrigerante reduciendo así el volumen de compresión en la cámara, por otro lado el caudal que entregan es intermitente, estos se clasifican en: reciprocantes, rotativos, de paletas, tornillo y scroll.

1. Los compresores reciprocantes o alternativos tienen uno o varios pistones que realizan la compresión del gas refrigerante en la carrera de avance, son de acción simple con un rango de gran capacidad, hasta cientos de kilovatios.

2. Existen dos tipos diferentes de compresores de tipo tornillo; tornillo rotativo doble, en el que hay un rotor macho y hembra que se unen, el otro es un diseño de tornillo rotativo único en el que dos rotores de puerta se colocan a ambos lados del rotor principal.

3. El compresor scroll se compone de dos espirales; uno fijo y el otro en órbita para comprimir el gas refrigerante, el espiral superior es estacionario y contienen el puerto de descarga de refrigerante, la espiral inferior es accionada por un conjunto de eje de motor eléctrico que imparte un movimiento excéntrico u orbitante a la espiral accionada. La Fig. 2.4, muestra los tipos de compresores que existen en el mercado.

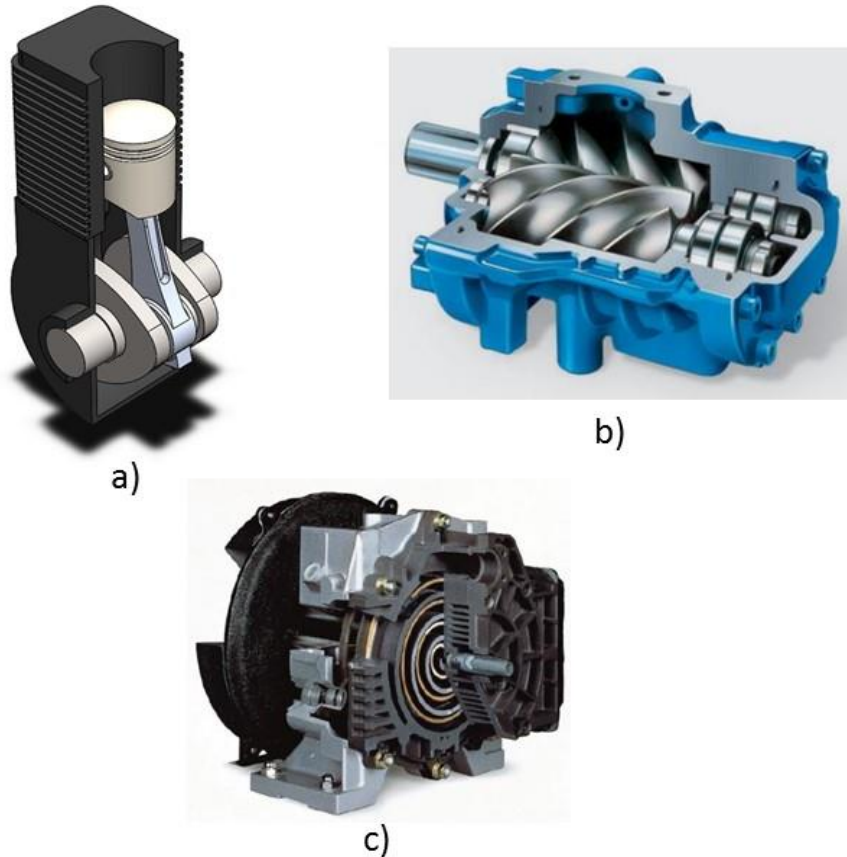


Fig. 2.4. Compresores de desplazamiento, a) Reciprocante, b) Tornillo y c) Scroll.

Compresores dinámicos:

Estos compresores aumentan la presión del refrigerante a través de un intercambio continuo de momento angular entre un elemento mecánico giratorio y el fluido, también entregan un caudal continuo, existen dos tipos principales los cuales son centrífugos y turbocompresores.

1. Los compresores centrífugos se utilizan en lugar de compresores de desplazamiento positivo para capacidades muy grandes o aplicaciones de alto flujo y diferencia de baja presión, en sistemas de refrigeración están disponibles en el rango de 300kW a 20 MW.

2. Los turbocompresores denotan compresores centrífugos y con eficiencias bajas, un conjunto de impulsores está dispuesto para altas presiones de compresión, estos compresores han encontrado aplicaciones en sistemas de aire acondicionado y enfriamiento de agua donde se requieren altos volúmenes de succión. En la Fig. 2.5, se muestran los dos tipos de compresores dinámicos mencionados antes.

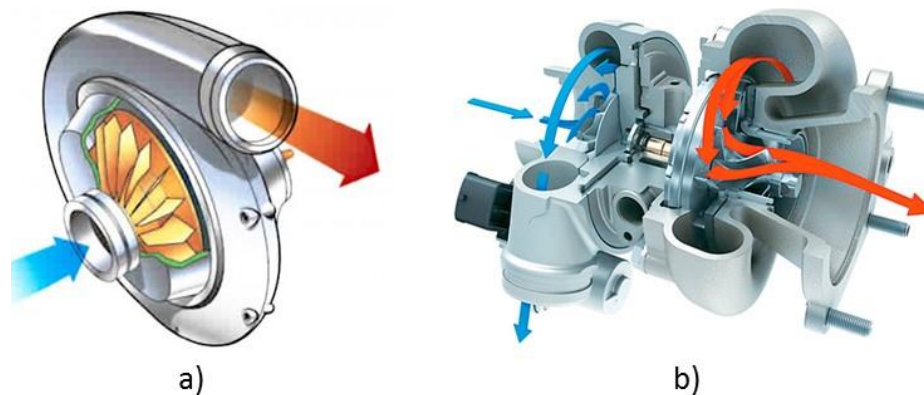


Fig. 2.5. Compresores dinámicos, a) centrífugo b) turbocompresor.

Es importante dar a conocer que tanto los compresores de desplazamiento como los dinámicos pueden ser de tipo abierto, semihermético y hermético (Dincer, 2010):

- Los compresores abiertos tienen un motor de accionamiento externo, acoplado por cigüeñales externos, en estos compresores se deben usar sellos apropiados en el eje a través de las cajas del compresor para evitar que se escape el gas refrigerante.
- Los compresores semiherméticos son de mayor tamaño, estos se pueden desatornillar para tener contacto con sus componentes internos, además en estos compresores el refrigerante no fluye sobre los devanados del motor.
- Los compresores herméticos son aquellos donde sus partes internas están completamente aisladas para su mantenimiento, no hay forma de sustituir un componente interno ya que están sellados herméticamente desde su fabricación.

En la Fig. 2.6, se muestran las partes internas más importantes de un compresor hermético.

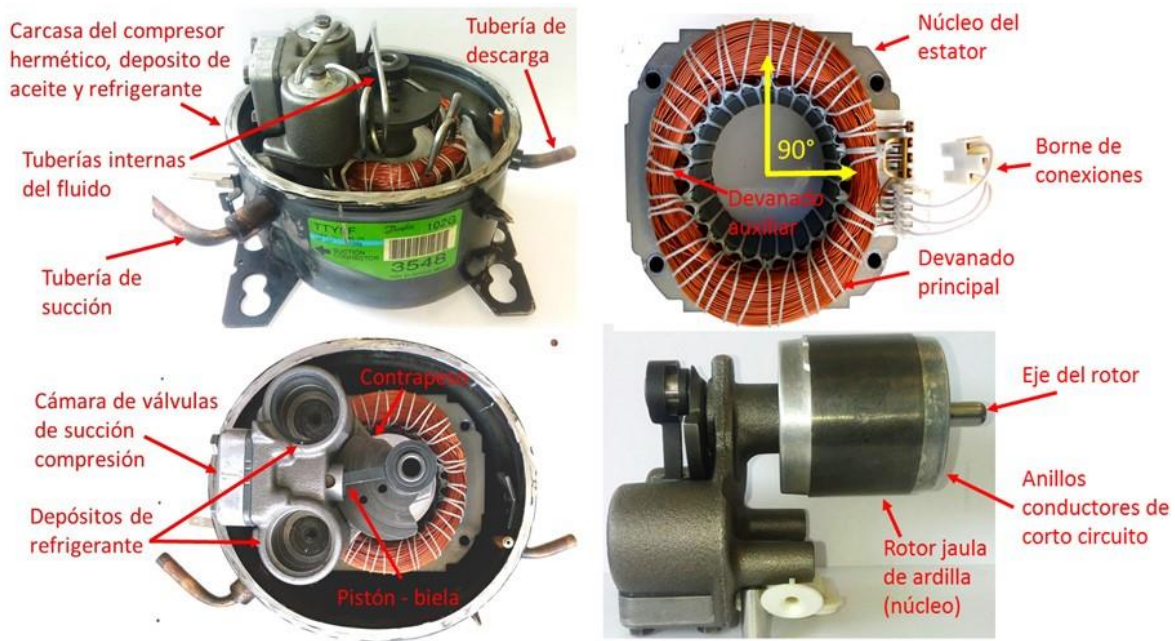


Fig. 2.6. Partes del compresor hermético.

2.6. Motor de inducción

Se define como aquel que induce un voltaje y una corriente eléctrica del estator hacia el rotor sin la necesidad de una conexión directa entre los dos, esto se da por la ley de Faraday (Chapman, 2012), (Wildi, 2007):

$$E = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Donde:

E = Voltaje inducido por un flujo magnético.

N = Número de espiras o número de vueltas.

$\frac{d\Phi}{dt}$ = Flujo magnético respecto la diferencia del tiempo.

El motor de inducción se clasifica en tres tipos: monofásico, bifásico y trifásico, el compresor del refrigerador de baja potencia consta de un motor monofásico, este se caracteriza por tener una bobina principal, una bobina auxiliar y un rotor de inducción o jaula de ardilla.

La bobina auxiliar se encarga de hacer un desfase entre la corriente y el voltaje de alimentación para provocar el movimiento del rotor en la máquina eléctrica (Chapman, 2012), una vez encendido el motor la bobina auxiliar se desconecta y

solo queda activada la bobina principal. En la Fig. 2.7, se presenta las partes principales del motor de inducción.

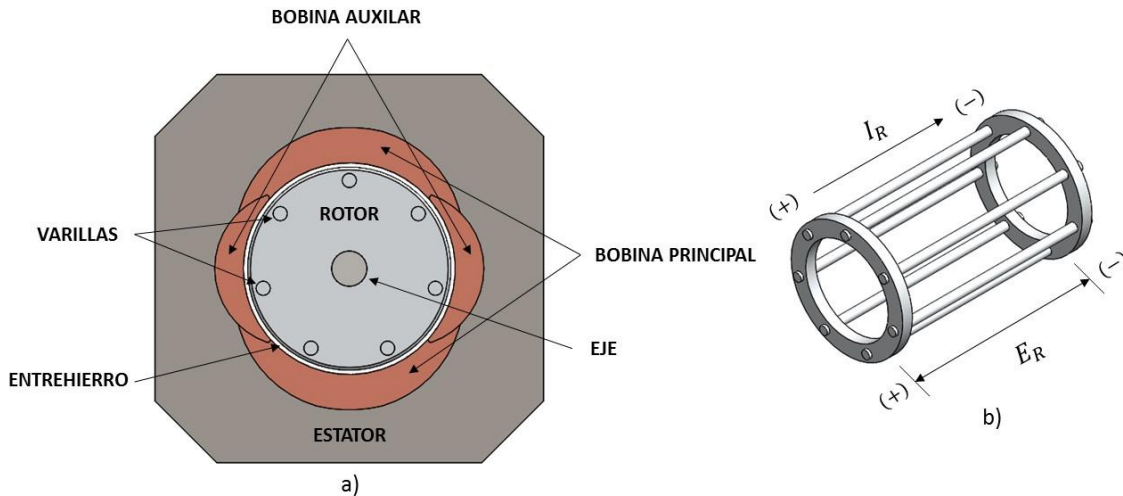


Fig. 2.7. Motor monofásico: a) partes del motor, b) rotor jaula de ardilla, (fuente: el autor).

2.7. Deslizamiento del rotor

El movimiento del rotor está relacionado con los campos magnéticos, esta conducta se conoce como movimiento relativo el cual se define por dos términos; la velocidad de deslizamiento (η_{des}) y el deslizamiento (s) (Chapman 2012).

La velocidad de deslizamiento es la diferencia de la velocidad sincrónica (η_s) y la velocidad del rotor o velocidad mecánica (η_m):

$$n_{des} = n_s - n_m \quad (2.4)$$

Donde:

η_{des} = Velocidad de deslizamiento.

η_s = Velocidad sincrónica (de los campos magnéticos).

η_m = Velocidad mecánica del rotor.

El deslizamiento es igual a la velocidad de deslizamiento expresado como una fracción o porcentaje:

$$s = \frac{n_{des}}{n_s} \times (100\%) \quad (2.5)$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \times (100\%) \quad (2.6)$$

Dejándolo en términos de la velocidad angular ω [radianes/segundo]:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \times (100\%) \quad (2.7)$$

2.8 Control ON-OFF

El control ON-OFF también llamado todo-nada o encendido-apagado, es un control de dos posiciones en el que el elemento final de control solo ocupa una de las dos posibles posiciones, en el cual la salida del controlador va de un extremo a otro cuando el valor de la variable controlada se desvía del valor controlado.

Este método solo acepta dos posiciones para el actuador: encendido (100%) y apagado (0%). La lógica de funcionamiento es tener un punto de referencia, si la variable actuador asume una posición, y si la variable es menor el actuador asume la otra posición.

En el sistema de refrigeración cuando el termostato detecta una alta temperatura envía una señal de accionamiento al relevador para encender el motor del compresor y cuando detecta una temperatura baja envía una señal al relevador para apagar el motor del compresor. En la Fig. 2.8 se muestra la representación esquemática del control ON-OFF.

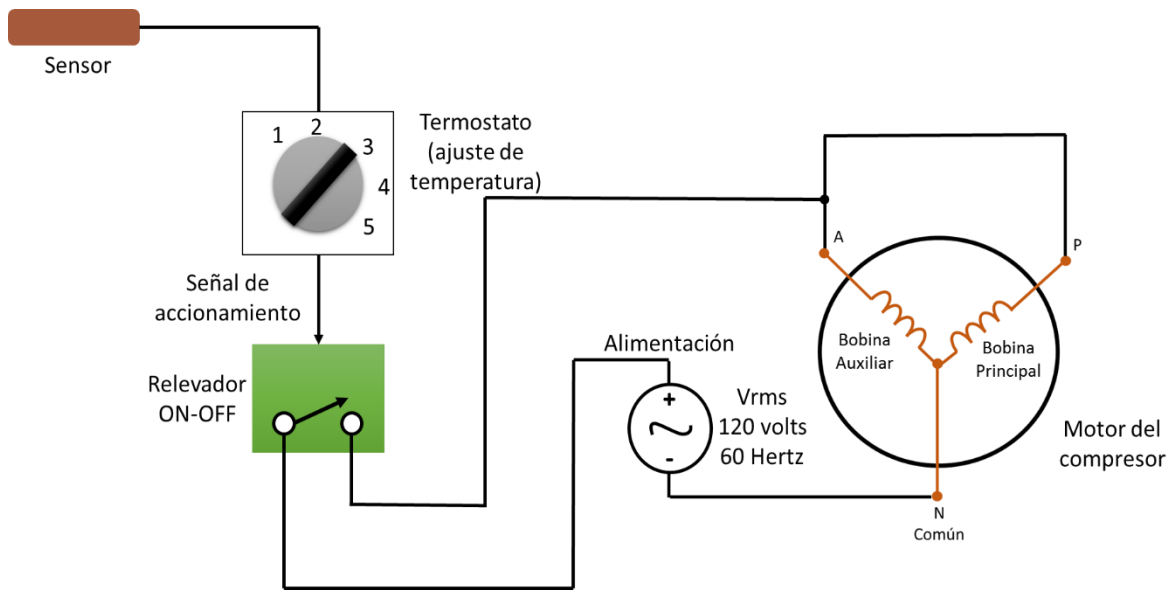


Fig. 2.8. Representación esquemática del control ON-OFF.

CAPITULO 3

Modelado del sistema de refrigeración, motor y controlador de velocidad.

Introducción

En este capítulo se realiza el análisis del ciclo de refrigeración desde la carga térmica que es absorbida y las pérdidas por fricción en el mecanismo del compresor, así como la potencia térmica desarrollada, se elabora el diagrama de bloques del sistema de control, las ecuaciones de voltaje, corriente y potencia eléctrica en el estator y rotor del motor.

3.1. Balance de energía en el espacio a refrigerar

El espacio a refrigerar es el lugar donde se mantienen los alimentos a bajas temperaturas para su conservación en un tiempo prolongado, estos alimentos al momento de depositarlos en el lugar tiene cierta cantidad de energía que es absorbida por el refrigerante. Con la ecuación (2.1.) se calcula el calor de cada producto refrigerado. En la tabla 3.1, se muestran algunos alimentos con sus características y carga térmica respectiva.

Tabla 3.1. Productos que producen la carga térmica en un refrigerador (ASHRAE, 2006).

Producto	Masa (kg)	Calor Específico (kJ/kg*K)	Temperatura Inicial (K)	Temperatura Final (K)	Carga Térmica (kJ)
Frutas	0.14	3.92	269.82	253.03	9.71
Verduras	0.33	4	269.82	253.03	22.8
Huevo	0.3	3.91	269.82	253.03	20.07
Carne	0.50	3.49	269.82	253.03	29.82
Lácteos	0.82	3.29	269.82	253.03	45.7
Agua	0.15	4.18	259.13	253.03	3.9
Refresco	0.33	3.9	269.82	253.03	21.7
Total					153.7

El flujo de calor esta dado en unidad de kJ y al dividirlo en el tiempo de 1000 seg, se obtiene el valor de, $Q_{ER} = 0.153$ kW.

3.2 Análisis del ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración se lleva a cabo en cuatro estados donde se encuentran los siguiente procesos: del estado 1-2 proceso de compresión, donde el refrigerante entra al compresor a una temperatura y presión baja como vapor saturado, en el compresor se tiene el acoplamiento del motor eléctrico, del estado 2-3 proceso de condensación, en este momento las condiciones del fluido se encuentran en la región de vapor sobrecalentado a una presión y temperatura alta, esto provoca al refrigerante un cambio de fase de vapor a liquido saturado a temperatura constante, del estado 3-4 proceso de expansión, donde el refrigerante fluye por la válvula de expansión la temperatura y presión disminuyen sin cambios en la entalpía, por ultimo del estado 4-1 se tiene el proceso de evaporación, donde incrementa la entalpía del refrigerante a presión y temperatura constante llegando así a un ciclo de refrigeración (Cengel, 2012), (Moran, 2004). En la Fig. 3.1, se muestra el diagrama esquemático del ciclo de refrigeración.

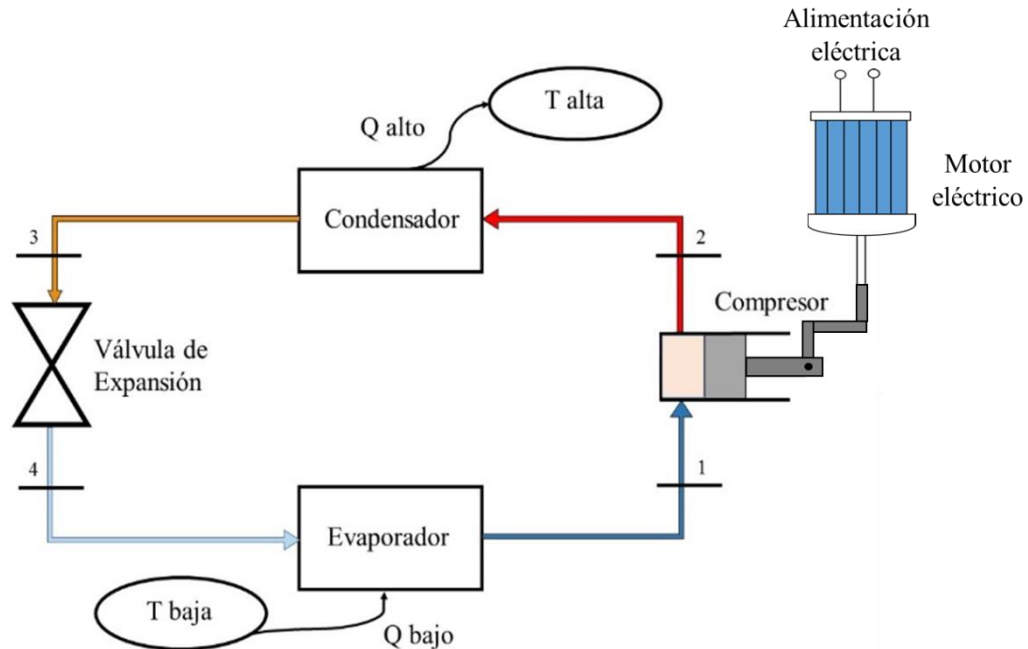


Fig. 3.1. Diagrama esquemático del ciclo de refrigeración.

La calidad es una propiedad adimensional que muestra la cantidad de vapor que tiene el refrigerante en cada estado. En el estado 1, el refrigerante se encuentra en la región de vapor saturado y tiene una calidad del 100%, en el estado 2, la condición del vapor es sobrecalentado, en el estado 3 el fluido es de líquido saturado y su calidad es del 0% (Cengel, 2012) (Dincer, 2010), finalmente el estado 4 el refrigerante tiene una mezcla de líquido-vapor donde la calidad se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{f\text{eva}}}{h_{fg\text{eva}}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Donde:

x_4 = calidad en el estado 4.

h_4 = entalpía en el estado 4.

$h_{fg\text{eva}}$ = diferencia de entalpías del gas menos del fluido en el evaporador.

Con la calidad se obtiene el volumen y entropía del estado 4, mediante las siguientes ecuaciones:

$$v_4 = v_{f_{eva}} + (x_4)(v_{fg_{eva}}) \quad (3.2)$$

$$s_4 = s_{f_{eva}} + (x_4)(s_{fg_{eva}}) \quad (3.3)$$

Donde:

v_4 = volumen en el estado 4.

$v_{fg_{eva}}$ = diferencia de volumen del gas menos del fluido en el evaporador.

s_4 = entropía en el estado 4.

$s_{fg_{eva}}$ = diferencia de entropía del gas menos del fluido en el evaporador.

La lectura de temperaturas que se realizó en un sistema de refrigeración de baja potencia, las temperaturas obtenidas en el evaporador son: -10 °C (263.15 K), -15 °C (258.15 K) y -20 °C (253.15 K) para diferentes ajustes de termostato. En el condensador se alcanzó una lectura promedio de temperatura de 40 °C (313.15 K) para los tres casos. En la Fig. 3.2, se muestra el diagrama de Mollier, T-h (temperatura-entalpía) donde se presentan los cuatro estados del sistema de refrigeración para tres diferentes temperaturas de prueba.

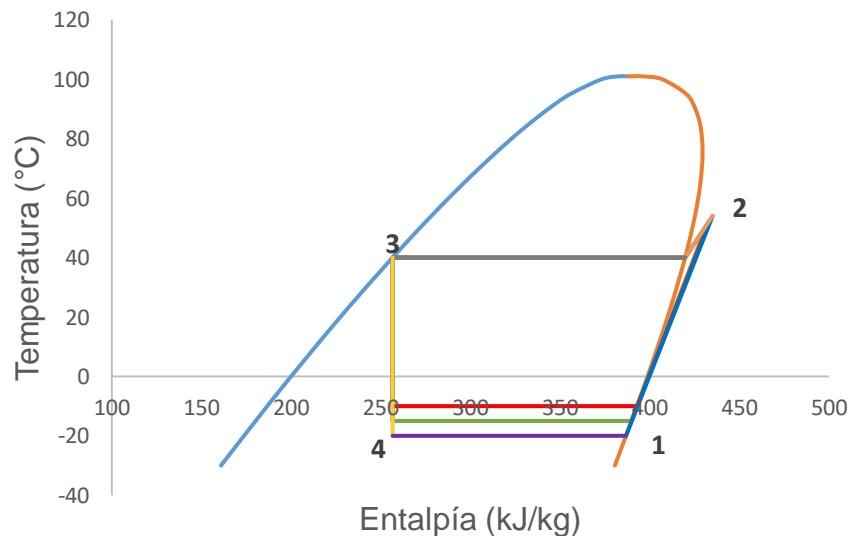


Fig. 3.2. Diagrama T-h con refrigerante HFC-134A en diferentes temperaturas en el evaporador.

En las Tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se resumen los datos calculados de las principales propiedades como: presión (P), temperatura (T), entalpía (h), entropía (s), volumen (v) y calidad (x), para cada estado del ciclo de refrigeración con temperaturas en el evaporador de -10, -15 y -20°C respectivamente.

Tabla 3.2. Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración a temperatura de evaporación de -10 °C.

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

Tabla 3.3. Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración a temperatura de evaporación de -15 °C.

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

Tabla 3.4. Propiedades termodinámicas de los cuatro estados del ciclo de refrigeración a temperatura de evaporación de -20 °C.

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

3.3 Balance de energía en el evaporador, compresor y COP del sistema de refrigeración

En el proceso de evaporación el fluido refrigerante entra con cierta entalpía y sale con una entalpía mayor a temperatura constante (Cengel, 2012) (Moran, 2004), esta diferencia de entalpías es la energía que se requiere para refrigerar la cámara fría, la cual se da por la ecuación:

$$Q_B = \dot{m} (h_1 - h_4) [kW] \quad (3.4)$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico en [kg/s].

En el proceso de compresión el refrigerante tiene una entalpía inicial (h_1) y final (h_2), esta diferencia de entalpías representa el consumo de energía que tiene el compresor, considerando el proceso de compresión adiabático y estacionario la potencia se obtiene por la ecuación:

$$\dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1) [kW] \quad (3.5)$$

El coeficiente operacional (COP) es la relación de energía de evaporación entre la potencia desarrollada por el compresor dada por la ecuación:

$$COP = \frac{Q_B}{\dot{W}} \quad (3.6)$$

Es decir el COP representa la energía en forma de calor retirado por cada watt desarrollado en el compresor.

De las ecuaciones (3.5) y (3.6), se obtiene la potencia y el COP para el ciclo de refrigeración. En la Tabla 3.5, se muestran los datos obtenidos para cada temperatura de -10,-15 y -20°C.

Tabla 3.5. Potencia \dot{W} y COP, para tres temperaturas de evaporación con HFC-134a.

Presión Cond. (Bar)	Presión Evap. (Bar)	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	Flujo másico (\dot{m}) (kg/s)	W_c (kJ/kg)	\dot{W} (kW)	COP (-)
10.18	2.01	392.9	431.36	1.13	38.46	43.37	3.54
10.18	1.64	389.8	433.17	1.15	43.37	50.04	3.07
10.18	1.33	386.8	435.14	1.18	48.34	57.07	2.69

Se observa que los datos registrados mantienen un comportamiento de incremento en la potencia y trabajo al disminuir la temperatura, mientras que el COP tiende a disminuir. En la Tabla 3.1 se muestra la capacidad de retiro de calor para cada una de las tres temperaturas, el valor es de 0.1537 kW.

3.4 Pérdidas de energía en el mecanismo manivela biela y pistón

La gran mayoría de los sistemas de refrigeración de tipo domésticos constan de compresores de tipo recíprocante es decir, se compone de un mecanismo manivela, biela – pistón, como se muestra en la Fig. 3.3, inciso **a**, donde se presenta el sistema mecánico de compresión conectado a la flecha del motor, en este sistema se tienen pérdidas de energía por la fricción en los segmentos (Serway, 2008). El inciso **b**, se muestra las pérdidas de energía por fricción de las uniones en movimiento, la pérdida de energía se resta de la energía suministrada al motor.

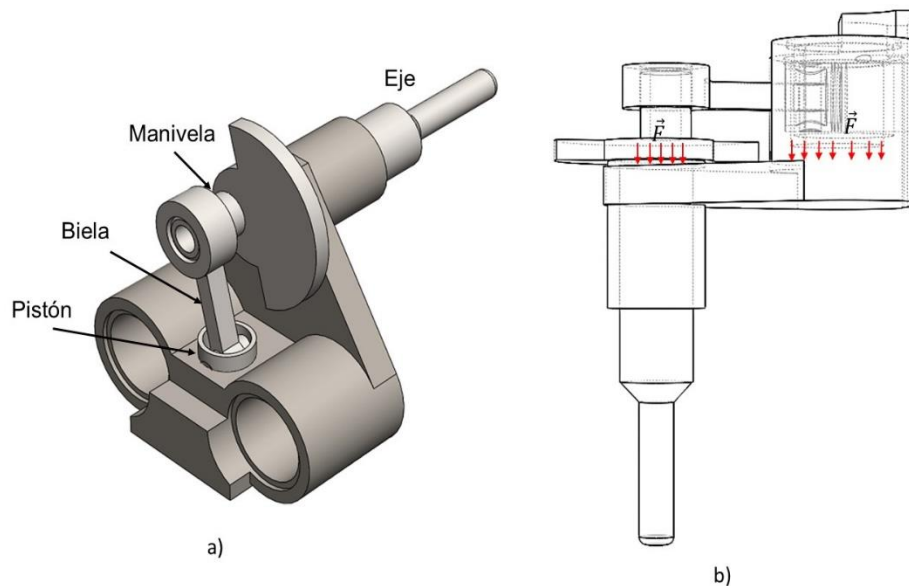


Fig. 3.3. Mecanismos, a) Manivela biela-pistón, b) Análisis de pérdidas por fricción.

En la Fig 3.3, inciso **a** se presenta el mecanismo en una posición con una vista superficial, donde el pistón reposa sobre la camisa o la cámara del pistón lo que implica que el peso de este genera una fuerza (F) sobre la camisa, de igual forma el peso de la biela genera una fuerza sobre el contrapeso del pistón (Norton, 2004), la fuerza se expresa como:

$$F = m \times g \quad [Newton] \quad (3.7)$$

Donde:

m = masa de la pieza [kg].

$g = \text{gravedad [m/s}^2\text{]}.$

Estos segmentos se encuentran lubricados constantemente, por lo que el factor de fricción es de $\mu_k = 0.06$ (Serway, 2008), por lo tanto la resultante de la fuerza se multiplica por dicho factor. Con la fuerza resultante se obtiene el Torque (T) aplicando las siguientes ecuaciones:

$$T = F \times d \text{ [Joules]} \quad (3.8)$$

$$T = F \times r \text{ [Joules]} \quad (3.9)$$

Donde:

$d = \text{desplazamiento [metros]}.$

$r = \text{radio [metros]}.$

El cálculo de la pérdida de potencia (P) por fricción en cada segmento del mecanismo (Cengel, 2012) se obtiene mediante la ecuación:

$$P = 2\pi(\dot{n})(T) \text{ [Watts]} \quad (3.10)$$

Donde:

$\dot{n} = \text{revoluciones por minuto (rpm) de la flecha.}$

$T = \text{torque [Joules]}.$

La pérdida de energía por fricción en el pistón y biela es:

$$P_{\text{Pistón}} = 0.029 \text{ W}$$

$$P_{\text{Biela}} = 0.037 \text{ W}$$

La pérdida de energía total es:

$$P_{\text{Total}} = 0.029 + 0.037 = 0.066 \text{ W}$$

La pérdida de energía por fricción en este mecanismo es mínima comparada con la energía que proporciona el motor del compresor.

3.5 Modelado del sistema de control

El controlador de velocidad para el compresor se considera como control de lazo abierto por no tener sensores de velocidad y torque directamente del motor para realizar la retroalimentación del sistema de control, este controlador va conectado al control ON-OFF. Se compone por cuatro etapas Fig. 3.4, con el objetivo de variar la velocidad del motor del compresor, con la manipulación del voltaje y la frecuencia de alimentación al motor. La primera etapa consiste en el diseño del convertidor CA-CA, la segunda etapa consiste en un convertidor CA-CD, la etapa final consta de un inversor de corriente continua en corriente alterna, una vez controlado el voltaje y frecuencia, es suministrado al motor del compresor, para el control de velocidad en la flecha del motor el sistema de control es manipulado por el sensor de temperatura quien envía la señal para la activación del controlador.

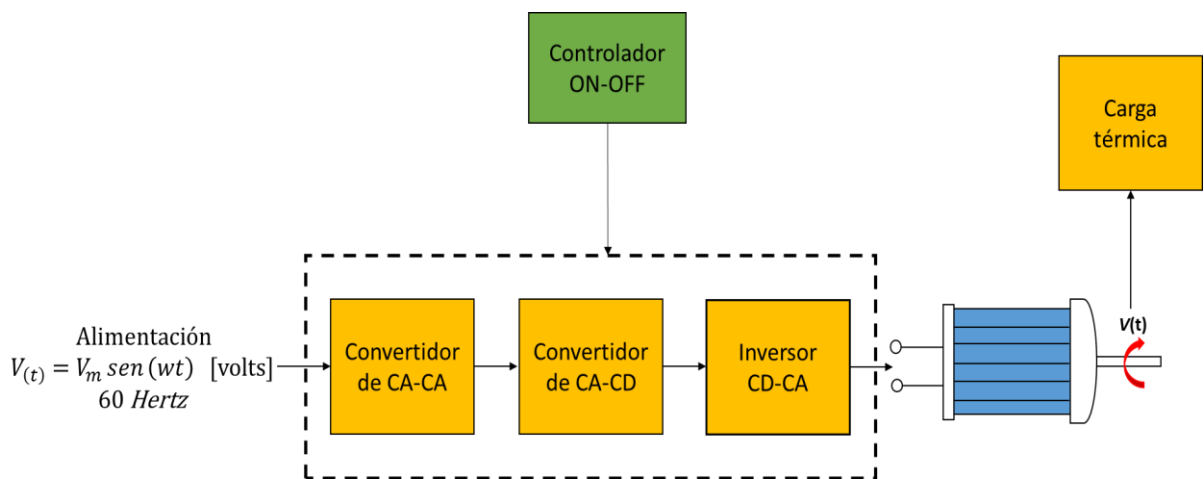


Fig. 3.4. Etapas del sistema controlador de velocidad.

En la primera etapa se suministra una alimentación de voltaje dependiente del tiempo $V(t)$, (Hayt, 2007) proveniente de la red eléctrica, su comportamiento se muestra en la Fig. 3.5 y se define por la siguiente ecuación:

$$V_{(t)} = V_m \text{sen}(wt) \text{ [volts]} \quad (3.11)$$

Donde:

V_m = Amplitud máxima [volts].

w = velocidad angular de la onda [radianes/segundo].

t = tiempo [segundos].

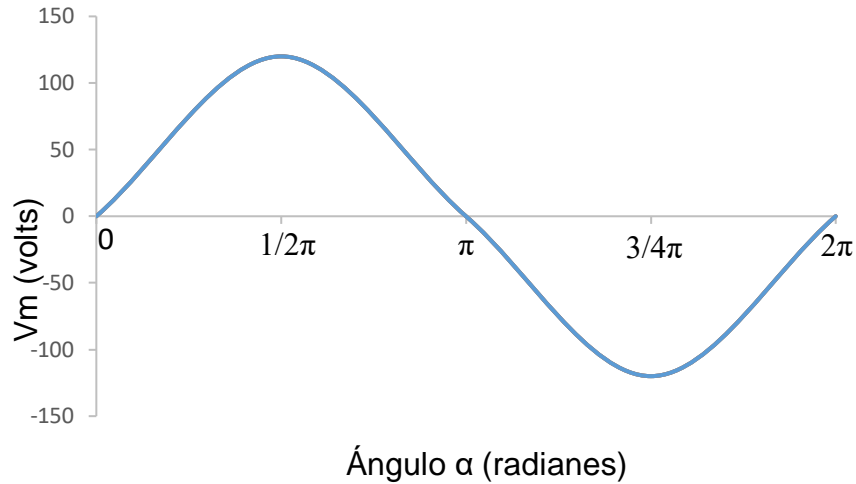


Fig. 3.5. Función senoidal $V(t) = \text{Sen}(wt)$.

El valor de la velocidad angular w es:

$$w = 2\pi f \left[\frac{\text{radianes}}{\text{segundos}} \right] \quad (3.12)$$

Donde:

$f = 60$ [ciclos/segundo o Hertz], frecuencia de alimentación.

Como se muestra en la ecuación (3.11) la amplitud del voltaje se puede calcular con el ángulo si se toma wt de la ecuación, (Hayt, 2007) de manera que el ángulo se obtiene con:

$$wt = \alpha \text{ [radianes]} \quad (3.13)$$

Si se propone cualquier valor del ángulo por ejemplo: $\pi/2$, obtenemos el tiempo (t) que representa el valor máximo del voltaje de la onda alterna, de la ecuación:

$$t = \frac{\alpha}{w} \quad (3.14)$$

Por lo tanto, se pueden dar valores al tiempo (t) para calcular los ángulos de disparo en la variación de voltaje por conversión de Voltaje de CA a CA, con la técnica de ángulos de disparo.

La técnica de ángulos de disparo consiste en reducir el voltaje $V_{(t)}$ anulando una parte de la onda senoidal ver Fig. 3.5, esto se realiza con un valor conocido del ángulo (Hart, 2001) (Benavent, 2009) a partir de la ecuación (3.15).

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2\pi}} \quad (3.15)$$

Donde:

V_{rms} = Voltaje rms por sus siglas en inglés, Root Mean Square (Raíz Cuadrático Medio) [volts].

α = Ángulo [radianes].

En la Tabla 3.6, se presentan los ángulos y voltajes para cada valor del tiempo obtenidos a partir de la ecuación (3.15).

Tabla 3.6. Valores del ángulo de disparo y voltaje en función del tiempo correspondiente.

No.	Tiempo (segundos)	Vrms (volts)	Ángulo (grados)	Ángulo α (radianes)
1	0.0069	20.67	150	2.62
2	0.0065	31.15	140	2.44
3	0.0060	42.34	130	2.27
4	0.0056	53.81	120	2.09
5	0.0051	65.16	110	1.92
6	0.0046	76.01	100	1.75
7	0.0042	86.06	90	1.58
8	0.0037	95.06	80	1.40
9	0.0032	102.80	70	1.22
10	0.0028	109.17	60	1.05
11	0.0023	114.11	50	0.87
12	0.0019	117.66	40	0.70
13	0.0014	119.94	30	0.52
14	0.0009	121.17	20	0.35
15	0.0005	121.64	10	0.17
16	0	121.71	0	0

De la Fig. 3.6, a la Fig. 3.8, se muestran los resultados obtenidos de la variación de voltaje.

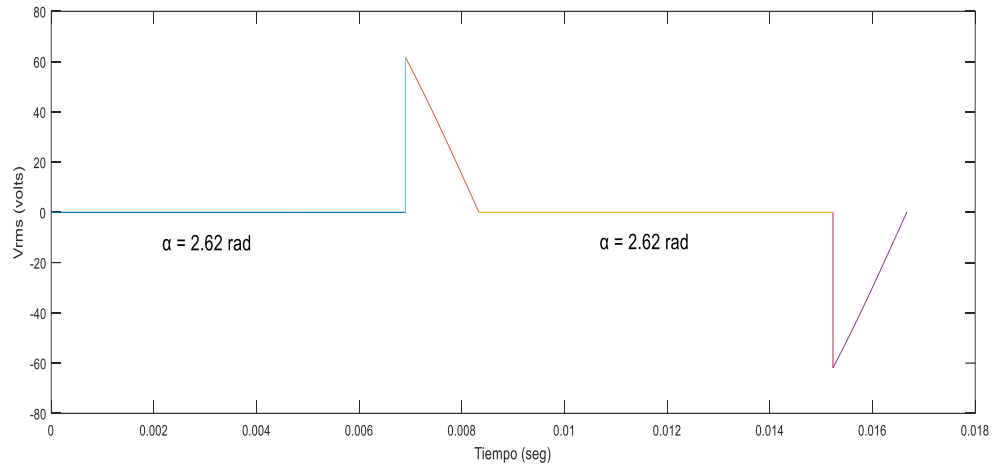


Fig. 3.6. Ángulo de disparo $\alpha = 2.62$ rad a un voltaje rms de 20.67 volts.

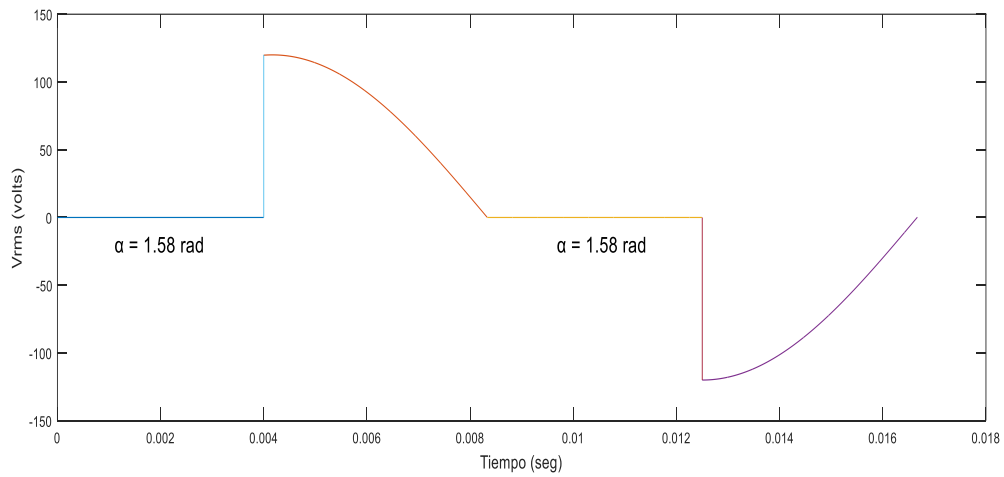


Fig. 3.7. Ángulo de disparo $\alpha = 1.58$ rad a un voltaje rms de 86.06 volts.

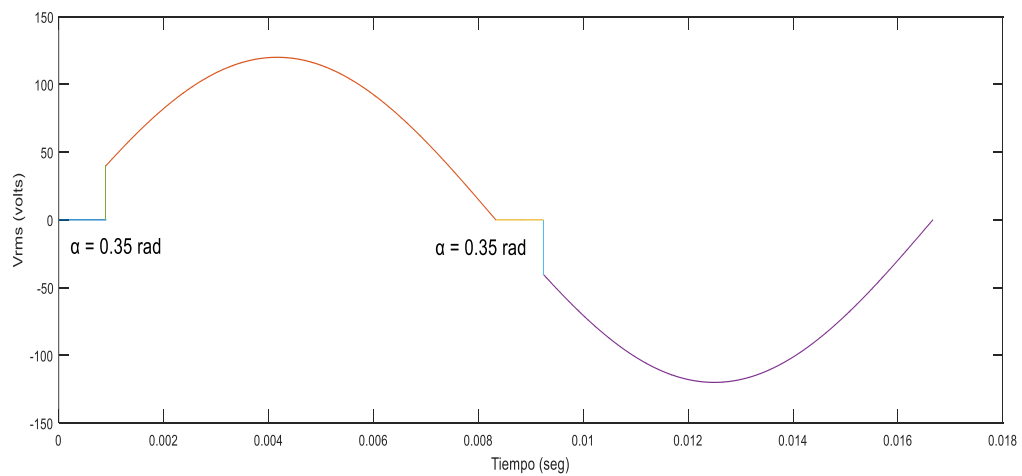


Fig. 3.8. Ángulo de disparo $\alpha = 0.35$ rad a un voltaje rms de 121.17 volts.

Los valores de voltaje de la etapa anterior se convierten a un voltaje pico (V_p) mediante la ecuación (3.16), antes de entrar a la segunda etapa:

$$V_p = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \quad (3.16)$$

Sustituyendo la ecuación (3.15) en la ecuación (3.16) tenemos:

$$V_p = \sqrt{2} \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2\pi}} \quad (3.17)$$

Simplificando:

$$V_p = V_m \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2\pi}} \quad (3.18)$$

La segunda etapa del controlador consiste en el convertidor CA-CD, el voltaje entrante se convierte en voltaje en corriente continua con la ecuación (3.20).

$$V_{CD \text{ promedio}} = \frac{2V_p}{\pi} \quad (3.19)$$

Sustituyendo la ecuación (3.18) en (3.19) se tiene:

$$V_{CD \text{ promedio}} = \frac{2 \left(V_m \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2\pi}} \right)}{\pi} \quad (3.20)$$

Si el ángulo α es el producto ωt realizando la sustitución en la ecuación (3.20) se tiene:

$$V_{CD \text{ promedio}} = \frac{2 \left(V_m \sqrt{1 - \frac{\omega t}{\pi} + \frac{\text{sen } 2 \omega t}{2\pi}} \right)}{\pi} \quad (3.21)$$

De la ecuación (3.21) el cambio del voltaje promedio en CD es dependiente del ángulo de disparo del voltaje alterno entrante. Como se puede ver en la Fig. 3.9, los resultados del convertidor de voltaje CD-CA para diferentes ángulos α .

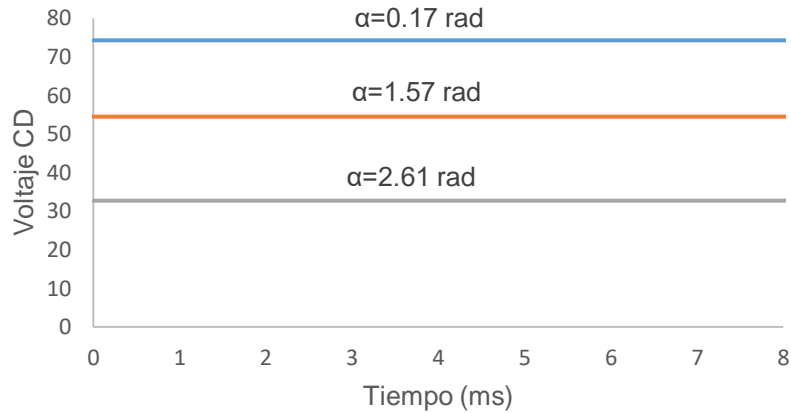


Fig. 3.9. Gráfica obtenida del convertidor de voltaje CA-CD.

3.6 Modelado matemático del motor eléctrico

La tercera etapa del controlador consiste del inversor o convertidor de voltaje de CD a CA esto se logra por el método de modulación ancho de pulso (Rashid, 1995), que consiste en generar una onda cuadrada en diferentes tiempos alto (t_a) y bajo (t_b) como se muestra en la Fig. 3.10, para cambiar la frecuencia de la onda alterna (Biswas, 1987), (Palaniappan, 1979), (Jannati, 2017).

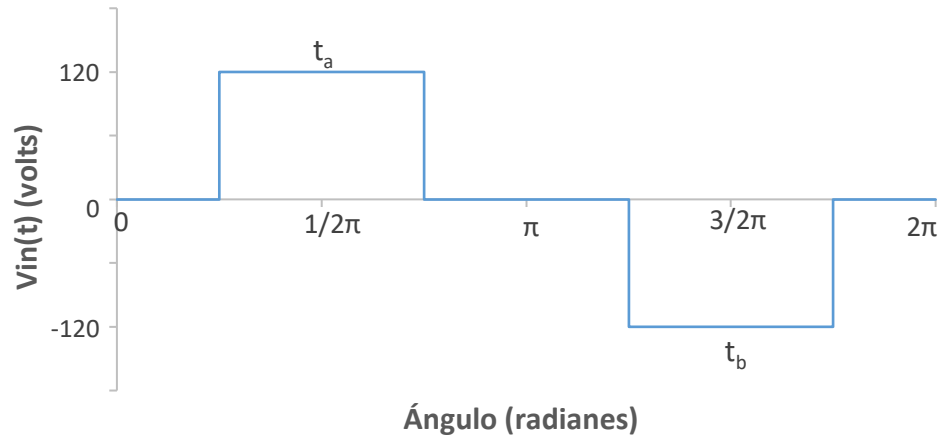


Fig. 3.10. Voltaje en onda cuadrada $V_{in}(t)$, en tiempo en alto (t_a) y bajo (t_b) variable.

La inversión de voltaje se lleva a cabo por medio de un convertidor en puente completo el cual se compone de cuatro transistores; T1, T2, T3 y T4, esto consiste en activar los transistores T1, T4 para que dejen pasar la corriente I_{Tot} a través del motor eléctrico esto ocurre mientras T2, T3 se encuentran apagados, lo que produce el tiempo en alto t_a , después de cierto tiempo se apagan T1, T4 y se

activan T2, T3 para que dejen pasar la corriente I_{Tot} a través del motor mientras T1, T4 se encuentran apagados, lo que produce el tiempo en bajo t_b . En la Fig. 3.11, se muestra el convertidor en puente completo. (Biswas, 1987), (Palaniappan, 1979).

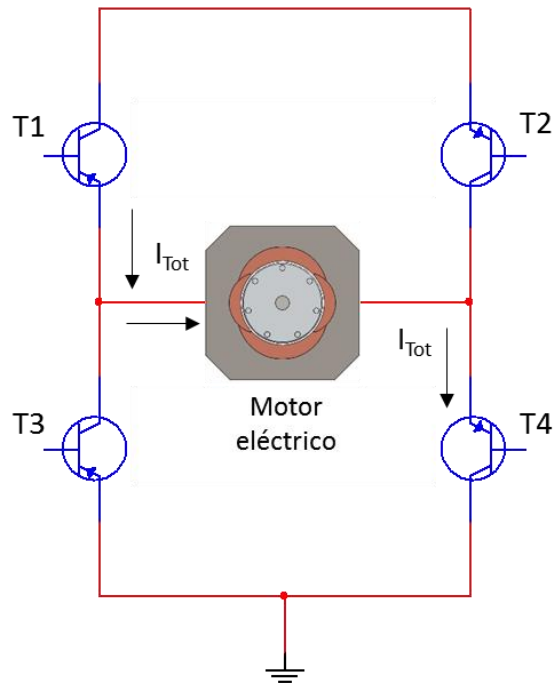


Fig. 3.11. Convertidor en puente completo.

Es importante señalar que al igual que la onda senoidal de la Fig. 3.5, la onda cuadrada tiene un semiciclo positivo y negativo, el ciclo completo se da en un periodo de $T=t_a+t_b$, equivalente a 2π .

El funcionamiento del compresor es el motor eléctrico de inducción, por lo que se hará el análisis de éste para obtener un modelo matemático en el que se aprecie la dinámica de la energía eléctrica que es consumida por el motor cuando proporciona potencia al compresor. Es importante señalar que lo que proporciona el motor es potencia y torque los cuales son transmitidos a la flecha del mecanismo del compresor.

La Fig. 3.12, muestra un motor de inducción con un rotor jaula de ardilla, el voltaje inducido produce una corriente en el rotor y se genera un campo magnético giratorio B_s que gira en sentido contrario de las manecillas del reloj (Chapman, 2012). La velocidad del motor está dada por la siguiente ecuación:

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_e}{P} \quad (3.22)$$

Donde, f_e es la frecuencia del estator en Hertz y P es número de polos, el campo magnético B_s pasa por las barras del rotor e induce un voltaje en ellas, el cual está dado por la ley de Faraday (Chapman, 2012) (Mileaf, 1985), la cual dice que el voltaje inducido en una espira es generado por la derivada del flujo.

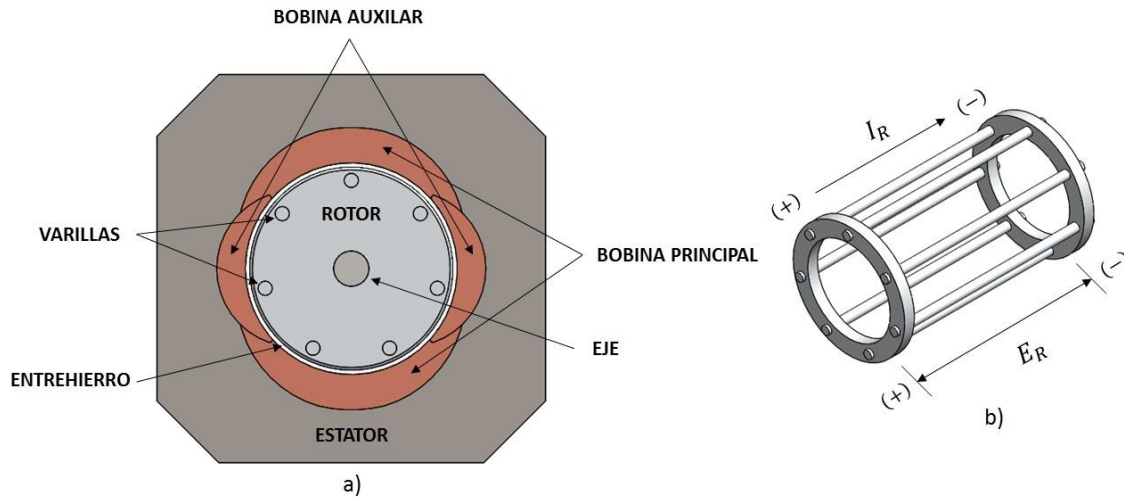


Fig. 3.12. Motor monofásico: a) partes del motor, b) rotor jaula de ardilla.

Es importante señalar que la bobina auxiliar solo se activa por unos momentos por este motivo solo se hace el análisis en la bobina principal. En la Fig. 3.13, se muestra el circuito equivalente del motor de inducción jaula de ardilla con R_e , L_e e I_e las cuales son resistencia, bobina y corriente eléctrica del estator respectivamente. R_M , L_M e I_M pertenecen al espacio entrehierro del motor. R_r , L_r e I_r pertenecen al rotor.

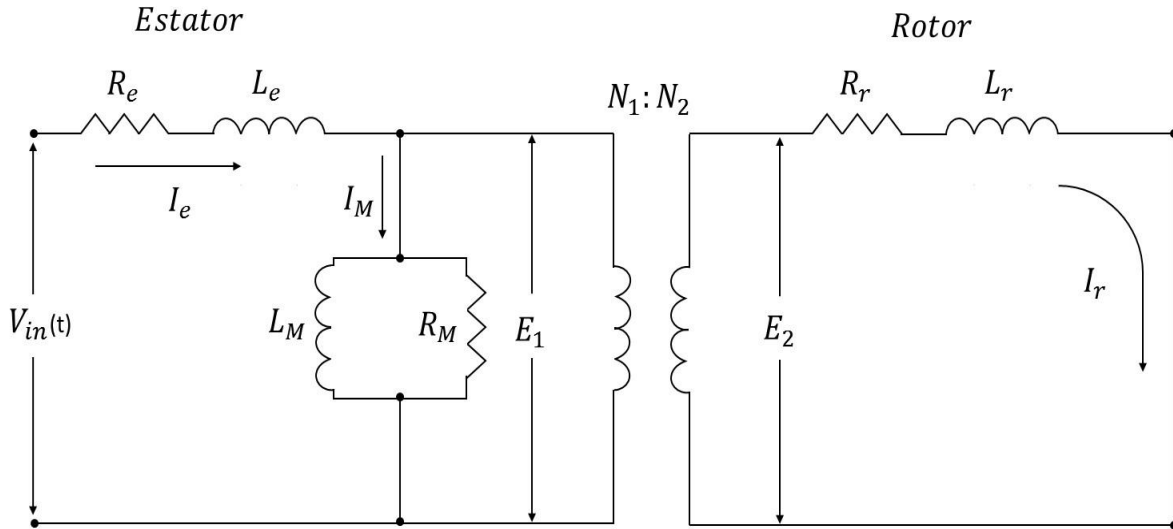


Fig. 3.13. Circuito equivalente del motor jaula de ardilla.

En la Fig. 3.13, se muestra el voltaje inducido en el estator E_1 y en el rotor se tiene un voltaje E_2 aplicando la ley de Faraday para E_1 y E_2 , sustituyendo en la ecuación (2.3) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$E_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.23)$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.24)$$

En las ecuaciones (3.23) y (3.24) se pasa a N_1 y N_2 del lado izquierdo de la igualdad respectivamente y se tiene:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.25)$$

$$\frac{E_2}{N_2} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.26)$$

Igualando $\frac{d\Phi}{dt}$ en las ecuaciones (3.25) y (3.26) se obtiene:

$$\frac{E_2}{N_2} = \frac{E_1}{N_1} \quad (3.27)$$

Al igual que en un transformador, en un motor de inducción N_1 y N_2 representan el número de vueltas en el estator y en el rotor respectivamente (Chapman, 2012),

esto se puede igualar a una relación de transformación a como se muestra a continuación:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = a \quad (3.28)$$

Donde: $a = 1$, manteniendo la relación de transformación igual a uno.

Se toma $a = E_1/E_2$ de la ecuación (3.28) se obtiene:

$$E_1 = a E_2 \quad (3.29)$$

Se realiza el análisis de impedancia del circuito del motor de la Fig. 3.13, donde las resistencias e inductores del circuito se pasan del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (Hayt, 2007), (Bruce, 2001) se establecen las siguientes impedancias:

$$Z_e = R_e + W_e L_e j \quad (3.30)$$

$$Z_M = W_M L_M j \square R_M \quad (3.31)$$

$$Z_r = R_r + W_r L_r j \quad (3.32)$$

Donde: Z_e , Z_M y Z_r son la impedancia del estator, impedancia del entrehierro e impedancia del rotor respectivamente, W_e , W_M y W_r velocidad angular del estator, velocidad angular del entrehierro y velocidad angular del rotor respectivamente, el circuito con la representación de las impedancias se muestra en la Fig. 3.14.

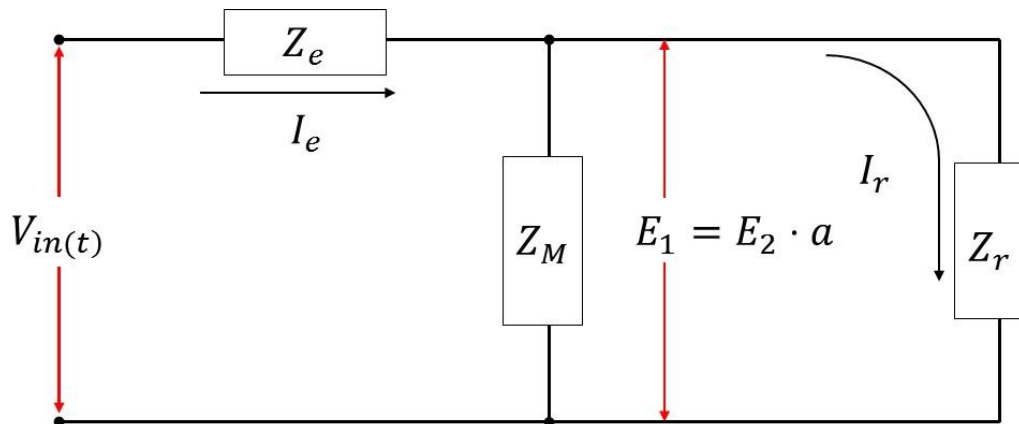


Fig. 3.14. Circuito del motor jaula de ardilla, simbolizando las impedancias.

Realizando la ecuación de malla en el estator de la Fig. 3.14, que corresponde al semiciclo positivo se obtiene:

$$-V_{in(t)} + V_{Z_e} + E_1 = 0 \quad (3.33)$$

Donde:

$$V_{Z_e} = I_e \cdot Z_e \quad (3.34)$$

Despejando V_{Z_e} de la ecuación (3.33) tenemos:

$$V_{Z_e} = V_{in(t)} - E_1 \quad (3.35)$$

Sustituyendo $I_e \cdot Z_e$ en la ecuación (3.35) se tiene:

$$I_e \cdot Z_e = V_{in(t)} - E_1 \quad (3.36)$$

Despejando a I_e se tiene:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{Z_e} \quad (3.37)$$

Sustituyendo la ecuación (3.30) en la ecuación (3.37) resulta:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e + W_e L_e j} \quad (3.38)$$

Nótese que si $V_{in(t)} \gg E_1$, el circuito se está comportando como motor eléctrico.

Realizando el análisis en la variable compleja S (Hayt, 2012), (Hart, 2001), (Rashid, 1995) en la ecuación (3.38), se define: $S = jW$ y reacomodando términos:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{S} \left(\frac{1}{R_e + S L_e} \right) \quad (3.39)$$

Se divide L_e en el numerador y denominador de la ecuación (3.39):

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{S} \left(\frac{\frac{1}{L_e}}{\frac{R_e}{L_e} + S} \right) \quad (3.40)$$

Rescribiendo:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e \cdot S} \left(\frac{1}{S + \frac{R_e}{L_e}} \right) \quad (3.41)$$

Se define T_e como un parámetro adimensional de la siguiente manera:

$$\tau_e = \frac{R_e}{L_e} \quad (3.42)$$

Sustituyendo la ecuación (3.42) en la ecuación (3.41) se obtiene:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e \cdot S} \left(\frac{1}{S + \tau_e} \right) \quad (3.43)$$

Analizando la ecuación (3.43) con un escalón de entrada se tiene:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e} \left(\frac{1}{S(S + \tau_e)} \right) \quad (3.44)$$

Resolviendo por fracciones parciales, tenemos:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e} \left(\frac{1}{S\tau_e} - \frac{1}{\tau_e(S + \tau_e)} \right) \quad (3.45)$$

Factorizando τ_e se tiene:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e \tau_e} \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{S + \tau_e} \right) \quad (3.46)$$

Nótese que aquí la corriente I_e se comporta como un sistema de primer orden (Norman, 2006), (Ogata, 2010), obteniendo la respuesta del escalón con la transformada inversa de Laplace:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e \tau_e} (1 - e^{-\tau_e t}) \quad (3.47)$$

Sustituyendo la ecuación (3.42) en la ecuación (3.47) se tiene:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{L_e \left(\frac{R_e}{L_e} \right)} (1 - e^{-\tau_e t}) \quad (3.48)$$

Eliminando L_e se tiene:

$$I_e = \frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e} (1 - e^{-\tau_e t}) \quad (3.49)$$

Considerando que la amplitud de la onda de corriente I_m , como:

$$I_m = \frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e} \quad (3.50)$$

Sustituyendo la ecuación (3.50) en la ecuación (3.49) se obtiene el comportamiento de la corriente en el estator:

$$I_e = I_m (1 - e^{-\tau_e t}) \text{ [Amperes]} \quad (3.51)$$

El voltaje total del motor es la suma del voltaje del estator y el voltaje del rotor:

$$V_{Total_{Estator}} = V_{L_e} + V_{R_e} \quad (3.52)$$

Para el voltaje en el estator se obtiene de la siguiente ecuación:

$$V_L = L_e \frac{di}{dt} \quad (3.53)$$

Dónde: L_e es la inductancia del estator.

Sustituyendo la ecuación (3.51) en la ecuación (3.53) se tiene lo siguiente:

$$V_{L_e} = \left(\frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e} \right) L_e \frac{d(1 - e^{-\tau_e t})}{dt} \quad (3.54)$$

Resolviendo la ecuación (3.54) tenemos:

$$V_{L_e} = \tau_e L_e \left(\frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e} \right) e^{-\tau_e t} \quad (3.55)$$

Sustituyendo la ecuación (3.42) en la ecuación (3.55) se tiene:

$$V_{L_e} = \frac{R_e}{L_e} L_e \left(\frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e} \right) e^{-\tau_e t} \quad (3.56)$$

Simplificando se tiene:

$$V_{L_e} = (V_{in(t)} - E_1) e^{-\tau_e t} \quad (3.57)$$

Considerando que la amplitud de la onda cuadrada para el voltaje V_m , es:

$$V_m = V_{in(t)} - E_1 \quad (3.58)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.57) se tiene:

$$V_{L_e} = V_m e^{-\tau_e t} \quad (3.59)$$

Voltaje en la resistencia del estator:

$$V_R = I \cdot R \quad (3.60)$$

Donde: I es la corriente eléctrica que fluye en la resistencia del estator R_e .

Sustituyendo la ecuación (3.49) en la ecuación (3.60) obtenemos:

$$V_{R_e} = \frac{V_{in(t)} - E_1}{R_e} (1 - e^{-\tau_e t}) R_e \quad (3.61)$$

Dejando la ecuación (3.61) términos de V_m :

$$V_{R_e} = V_m (1 - e^{-\tau_e t}) \quad (3.62)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.59) y (3.62) en la ecuación (3.52):

$$V_{Total_{Estator}} = V_m e^{-\tau_e t} + V_m (1 - e^{-\tau_e t}) \quad (3.63)$$

Factorizando V_m , se tiene:

$$V_{Total_{Estator}} = V_m (e^{-\tau_e t} + 1 - e^{-\tau_e t}) \quad (3.64)$$

Simplificando la ecuación:

$$V_{Total_{Estator}} = V_m \text{ [volts]} \quad (3.65)$$

De esta manera se obtiene el modelo del voltaje total en el estator.

Realizando la ecuación de malla en el rotor de la Fig. 3.14, se tiene:

$$-E_1 + I_r Z_r = 0 \quad (3.66)$$

Despejando E_1 :

$$E_1 = I_r Z_r \quad (3.67)$$

Sustituyendo la ecuación (3.32) en la ecuación (3.67) se obtiene:

$$E_1 = I_r (R_r + W_r L_r j) \quad (3.68)$$

La magnitud y frecuencia del voltaje inducido en el rotor en cualquier velocidad entre estos dos extremos es directamente proporcional al deslizamiento S del rotor. Por lo tanto si se llama E_1 a la magnitud del voltaje inducido del rotor en condiciones de rotor bloqueado, la magnitud del voltaje inducido con cualquier deslizamiento s está dada por la ecuación:

$$E_1 = s E_2 \quad (3.69)$$

Tomando en cuenta la relación de transformación a se tiene la siguiente expresión:

$$E_1 = a s E_2 \quad (3.70)$$

Y la frecuencia del voltaje inducido para cualquier valor del deslizamiento está dada por la siguiente ecuación:

$$f_r = s f_e \quad (3.71)$$

Este voltaje se induce en un rotor que consta tanto de resistencia como de reactancia. La resistencia del rotor R_r es constante, independientemente del deslizamiento, mientras que la reactancia del rotor se ve afectada de manera más compleja por el deslizamiento.

La reactancia del rotor de un motor de inducción depende de la inductancia del rotor y de la frecuencia del voltaje y corriente del rotor (Capman, 2012). Con una inductancia del rotor de L_r .

La reactancia del rotor está dada por:

$$X_r = W_r L_r \quad (3.72)$$

Recordando que el valor de la velocidad angular es:

$$W_r = 2 \pi f_r \quad (3.73)$$

Sustituyendo el valor de la velocidad angular W_r se tiene:

$$X_r = 2 \pi f_r L_r \quad (3.74)$$

Sustituyendo la ecuación (3.71) en (3.73) se obtiene:

$$X_r = 2 \pi s f_e L_r \quad (3.75)$$

Dejándolo en términos de la velocidad angular se tiene:

$$X_r = W s L_r \quad (3.76)$$

Por lo tanto:

$$W_r = W s \quad (3.77)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.70) y (3.77) en (3.68) se tiene:

$$a s E_2 = I_r (R_r + W s L_r j) \quad (3.78)$$

Despejando I_r se tiene:

$$I_r = \frac{a s E_2}{R_r + W s L_r j} \quad (3.79)$$

Aplicando la variable compleja S en la ecuación (3.79), donde se define: $S = jW$, tenemos:

$$I_r = \frac{a s E_2}{S} \left(\frac{1}{R_r + S L_r s} \right) \quad (3.80)$$

Se divide $L_r \cdot S$ en el numerador y denominador de la ecuación (3.80):

$$I_r = \frac{a s E_2}{S} \left(\frac{\frac{1}{L_r s}}{\frac{R_r}{L_r s} + \frac{S L_r s}{L_r s}} \right) \quad (3.81)$$

Simplificando términos:

$$I_r = \frac{a s E_2}{L_r s S} \left(\frac{1}{S + \frac{R_r}{L_r s}} \right) \quad (3.82)$$

Se define T_r como un parámetro adimensional de la siguiente manera:

$$\tau_r = \frac{R_r}{L_r s} \quad (3.83)$$

Se sustituye la ecuación (3.83) en (3.82):

$$I_r = \frac{a s E_2}{L_r s} \left(\frac{1}{S(S + \tau_r)} \right) \quad (3.84)$$

Resolviendo por fracciones parciales:

$$I_r = \frac{a s E_2}{L_r s} \left(\frac{1}{\tau_r s} - \frac{1}{\tau_r (s + \tau_r)} \right) \quad (3.85)$$

Simplificando:

$$I_r = \frac{a s E_2}{L_r s \tau_r} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{(s + \tau_r)} \right) \quad (3.86)$$

De la misma forma la corriente I_r se comporta como un sistema de primer orden cuando se suministra una fuente de voltaje de tipo escalón:

$$I_r = \frac{a s E_2}{L_r s \tau_r} \left(1 - e^{-\tau_r t} \right) \quad (3.87)$$

Sustituyendo la ecuación (3.83) en (3.87) y simplificando se tiene el comportamiento de la corriente del rotor:

$$I_r = \frac{a s E_2}{R_r} \left(1 - e^{-\frac{R_r t}{L_r s}} \right) [Amperes] \quad (3.88)$$

El voltaje total del rotor en el semiciclo positivo a un escalón de entrada:

$$V_{Total_{Rotor}} = a s E_2 \left(1 - e^{-\frac{R_r t}{L_r s}} \right) + a E_2 \left(e^{-\frac{R_r t}{L_r s}} \right) [volts] \quad (3.89)$$

El cálculo del voltaje del semiciclo negativo se obtiene de las siguientes expresiones:

$$I_e = -I_m \left(1 - e^{-\tau_e t} \right) [Amperes] \quad (3.90)$$

$$V_{Total_{Estator}} = -V_m e^{-\tau_e t} + V_m \left(e^{-\tau_e t} - 1 \right) [volts] \quad (3.91)$$

$$I_r = -\frac{a s E_2}{R_r} \left(1 - e^{-\tau_r t} \right) [Amperes] \quad (3.92)$$

$$V_{Total_{Rotor}} = -a s E_2 \left(1 - e^{-\frac{R_r t}{L_r s}} \right) + a E_2 \left(e^{-\frac{R_r t}{L_r s}} \right) [volts] \quad (3.93)$$

3.7 Potencia y Torque en el motor del compresor

La potencia eléctrica se puede obtener mediante las ecuaciones:

$$P = I \times V \text{ [watts]} \quad (3.94)$$

$$P = I^2 R \text{ [watts]} \quad (3.95)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \text{ [watts]} \quad (3.96)$$

El motor de inducción se comporta de manera similar que un transformador ya que induce un voltaje de un devanado principal al devanado secundario, es decir, induce voltaje del estator al rotor, como se vio antes las varillas del rotor están en corto circuito y no existe una salida de energía eléctrica, sin embargo la salida es energía mecánica, (Chapman, 2012), (Wildi 2007). La potencia de entrada al motor del compresor está dada por la siguiente ecuación:

$$P_i = P_N + P_e + P_g \quad (3.97)$$

Donde: P_i = Potencia de entrada, P_N = Potencia en el núcleo, P_e = Potencia en el estator y P_g = Potencia en el entrehierro.

En el siguiente diagrama de flujo la relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor.

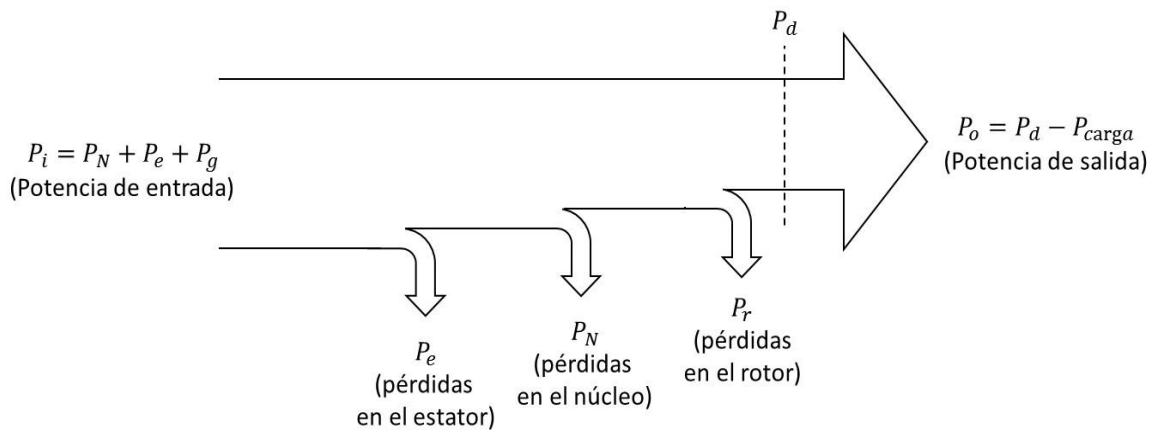


Fig. 3.15. Diagrama de flujo de potencia en el motor del compresor.

En la Fig. 3.15, se muestran las pérdidas que existen en las partes del motor, las cuales son; pérdidas en el estator dada por la ecuación (3.98), pérdidas en el núcleo dada por la ecuación (3.99), la potencia restante se transfiere al rotor a través del entrehierro (espacio entre el estator y rotor) también conocida como potencia del entrehierro dada por la ecuación (3.100), pérdida de potencia por el rotor dada por la ecuación (3.101):

$$P_e = I_e^2 R_e \quad (3.98)$$

$$P_r = I_r^2 R_r \quad (3.99)$$

$$P_N = \frac{V_N^2}{R_N} \quad (3.100)$$

$$P_g = I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (3.101)$$

Donde: I_e y R_e corriente eléctrica y resistencia en el estator respectivamente, I_r y R_r corriente eléctrica y resistencia en el rotor respectivamente, I_N y R_N corriente eléctrica y resistencia en el núcleo respectivamente y deslizamiento s .

La diferencia entre la potencia del entrehierro y la potencia del rotor se le llama potencia desarrollada dada por la siguiente ecuación:

$$P_d = P_g - P_r \quad (3.102)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.101) y (3.99) en la (3.102):

$$P_d = I_r^2 \frac{R_r}{s} - I_r^2 R_r \quad (3.103)$$

Simplificando:

$$P_d = I_r^2 \frac{R_r}{s} (1-s) \quad (3.104)$$

Se deja en términos de P_g :

$$P_d = P_g (1-s) \quad (3.105)$$

La potencia P_d es la potencia con la que trabaja el rotor, esta potencia se convierte de su forma eléctrica a mecánica, donde existe una carga mecánica que va a restar potencia. Así la potencia de salida es la diferencia entre la potencia P_d menos la potencia de carga P_{carga} :

$$P_o = P_d - P_{carga} \quad (3.106)$$

La eficiencia del motor es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (3.107)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.106) y (3.97) en (3.107):

$$\eta = \frac{P_d - P_{carga}}{P_N + P_e + P_g} \quad (3.108)$$

Sí,

$$P_g \gg P_N + P_e, P_r$$

$$P_d \gg P_{sin\ carga}$$

Entonces,

$$\eta = \frac{P_s (1-s)}{P_g} \quad (3.109)$$

Simplificando:

$$\eta = 1 - s \quad (3.110)$$

Sustituyendo la ecuación (3.104) en (3.106):

$$P_o = I_r^2 \frac{R_r}{s} (1-s) - P_{carga} \quad (3.111)$$

Es importante mencionar que existe corriente eléctrica en el rotor, por lo tanto sustituyendo la ecuación (3.88) en (3.111) se tiene:

$$P_o = \left(\frac{a s E_2}{R_r} \left(1 - e^{-\frac{R_r}{L_r s} t} \right) \right)^2 \left(\frac{R_r}{s} \right) (1-s) - P_{carga} \quad (3.112)$$

Simplificando:

$$P_o = \frac{a^2 s E_2^2}{R_r} \left(1 - e^{-\frac{R_r}{L_r s} t} \right)^2 (1-s) - P_{carga} \quad (3.113)$$

La potencia de carga es la potencia que es consumida por el compresor y las pérdidas por fricción del mecanismo, por lo tanto sustituyendo las ecuaciones (3.5) y (3.10) en la ecuación (3.113) se obtiene lo siguiente:

$$P_o = \frac{a^2 s E_2^2}{R_r} \left(1 - e^{-\frac{R_r}{L_r s} t} \right)^2 (1-s) - \dot{m} (h_2 - h_1) - 2 \pi (\dot{n}) (F(f) \times d) \quad [\text{watts}] \quad (3.114)$$

La potencia de salida en el rotor se expresa en la ecuación (3.114). El par o torque desarrollado del motor está dado por la siguiente ecuación:

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_r} \quad [\text{Joules}] \quad (3.115)$$

Recordando que la velocidad del rotor es:

$$\omega_r = \omega_s (1-s) \quad (3.116)$$

Donde: ω_s velocidad síncrona.

Sustituyendo las ecuaciones (3.105) y (3.116) en la ecuación (3.115):

$$T_d = \frac{P_g (1-s)}{\omega_s (1-s)} \quad (3.117)$$

Simplificando:

$$T_d = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (3.118)$$

Sustituyendo la ecuación (3.101) en la ecuación (3.118):

$$T_d = \frac{I_r^2 R_r}{s \cdot \omega_s} \quad (3.119)$$

Para el torque, se toma la corriente eléctrica del rotor por lo tanto sustituyendo la ecuación (3.88) en la ecuación (3.119) tenemos:

$$T_d = \left(\frac{a s E_2}{R_r} \left(1 - e^{-\frac{R_r}{L_r s} t} \right) \right)^2 \frac{R_r}{s \cdot \omega_s} \quad (3.120)$$

Simplificando se obtiene el comportamiento del torque del motor:

$$T_d = \frac{a^2 s E_2^2}{R_r \cdot \omega_s} \left(1 - e^{-\frac{R_r}{L_r s} t} \right)^2 \quad [\text{Joules}] \quad (3.121)$$

CAPITULO 4

Resultados y Conclusiones

Introducción:

En este capítulo se muestran los resultados de los modelos matemáticos de I_e , V_e , I_r , V_r , P_o y T_d máximo y mínimo, diseño e implementación del circuito del sistema de control, así como los resultados de la MAP y el consumo del motor del compresor con control.

4.1 Resultados del modelo matemático de la corriente eléctrica, voltaje, potencia y torque en el estator y rotor

El deslizamiento “s” es un parámetro adimensional que representa el retraso de la velocidad del motor con respecto a la velocidad síncrona, es importante señalar que cuando $s = 1$ el motor se encuentra en estado de reposo y mientras “s” disminuye aumenta la velocidad del motor hasta alcanzar la nominal, los valores de “s” y velocidad del motor se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores de la velocidad síncrona en función del deslizamiento.

Deslizamiento “s”	Velocidad síncrona (rpm)
1	0
0.9	180
0.8	360
0.7	540
0.6	720
0.5	900
0.4	1080
0.3	1260
0.2	1440
0.1	1620
0	1800

A continuación se muestran las gráficas obtenidas de los modelos matemáticos de la corriente eléctrica en el estator y rotor, el voltaje en el estator y rotor, la potencia total y torque total, en función del tiempo y deslizamiento.

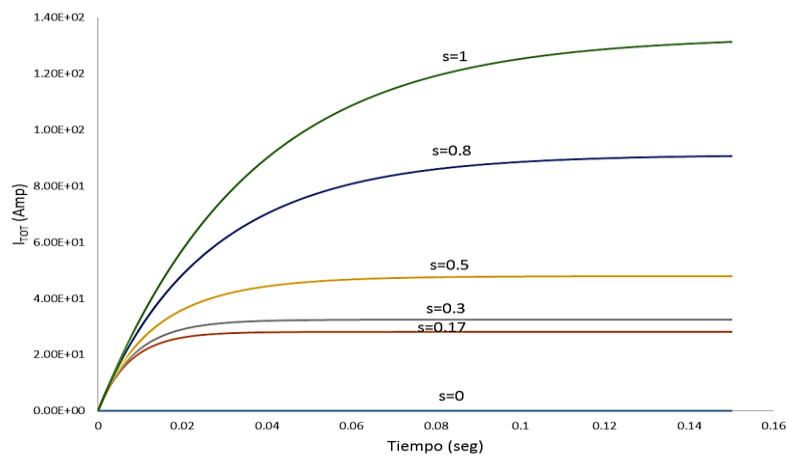


Fig. 4.1. Gráfica de $I_{Tot} = I_e + I_r$ en diferentes valores del deslizamiento.

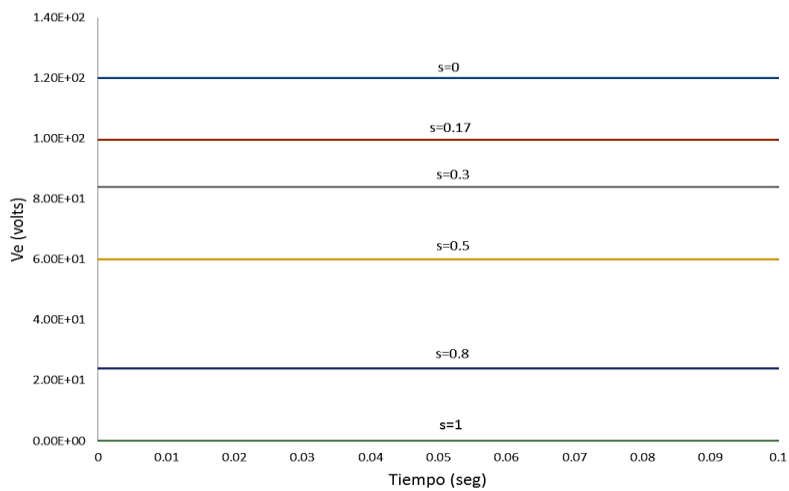


Fig. 4.2. Gráfica de V_e en diferentes valores del deslizamiento.

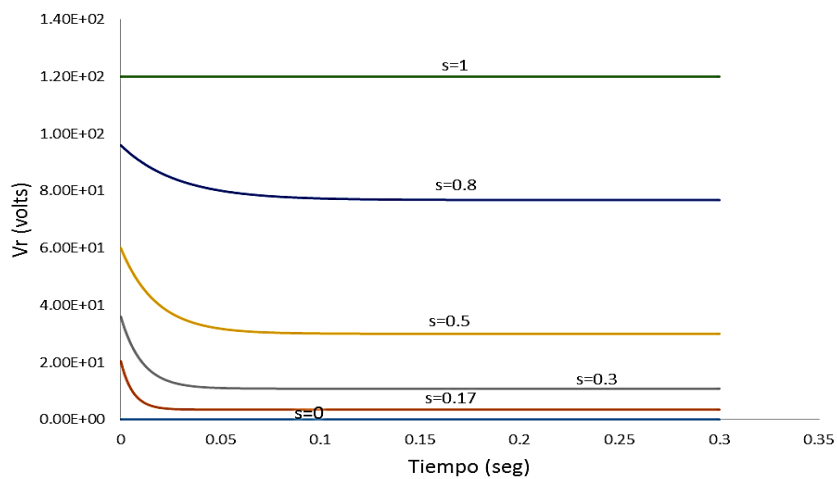


Fig. 4.3. Gráfica de V_r en diferentes valores del deslizamiento.

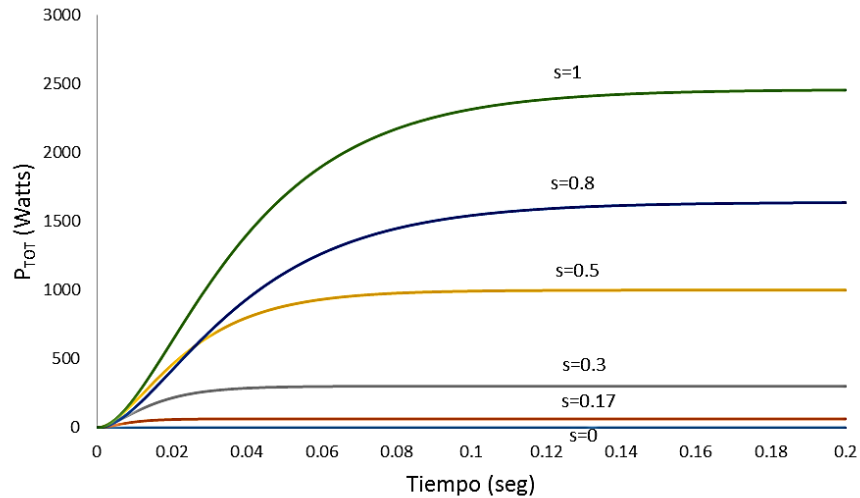


Fig. 4.4. Gráfica de P_{Tot} en diferentes valores del deslizamiento.

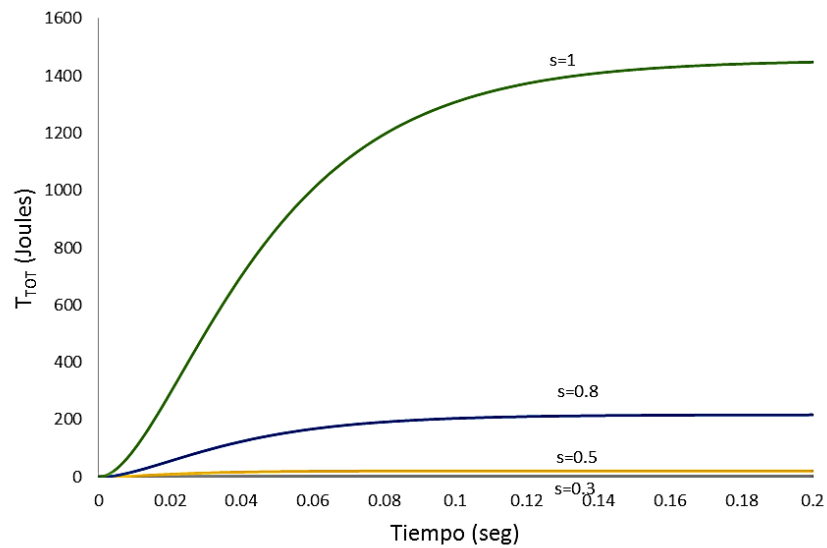


Fig. 4.5. Gráfica de T_{Tot} en diferentes valores del deslizamiento.

Se observa en las gráficas anteriores que la dinámica de las gráficas aumenta de manera exponencial desde un valor de 0 hasta que se estabilizan y se mantienen constantes, en la Fig. 4.1, cuando $s=1$ se tiene la mayor demanda de corriente eléctrica y mientras s disminuye se tiene una menor corriente eléctrica en la Fig. 4.2, se tiene el valor más alto cuando $s=0$ y mientras s disminuye se tiene un menor voltaje, pasa lo contrario en la Fig. 4.3, cuando $s=1$ se tiene el mayor voltaje y mientras s disminuye se tiene un menor voltaje, algo similar pasa en la Fig. 4.4, cuando $s=1$ se tiene la mayor potencia y mientras s disminuye se tiene una menor potencia, lo mismo sucede en la Fig. 4.5 cuando $s=1$ se tiene el valor más alto de torque y mientras s disminuye se obtiene un valor menor.

4.2 Diseño del circuito físico del variador de voltaje e inversor de voltaje

Este proyecto se lleva a cabo en la experimentación, en la que se elabora el circuito eléctrico de manera física de las etapas del sistema de control, como es el variador de voltaje, el inversor de voltaje y frecuencia con una etapa de controladora para la modulación, un circuito de arranque del motor y un microcontrolador para el control del sistema como parte experimental y funcionamiento Fig. 4.6.

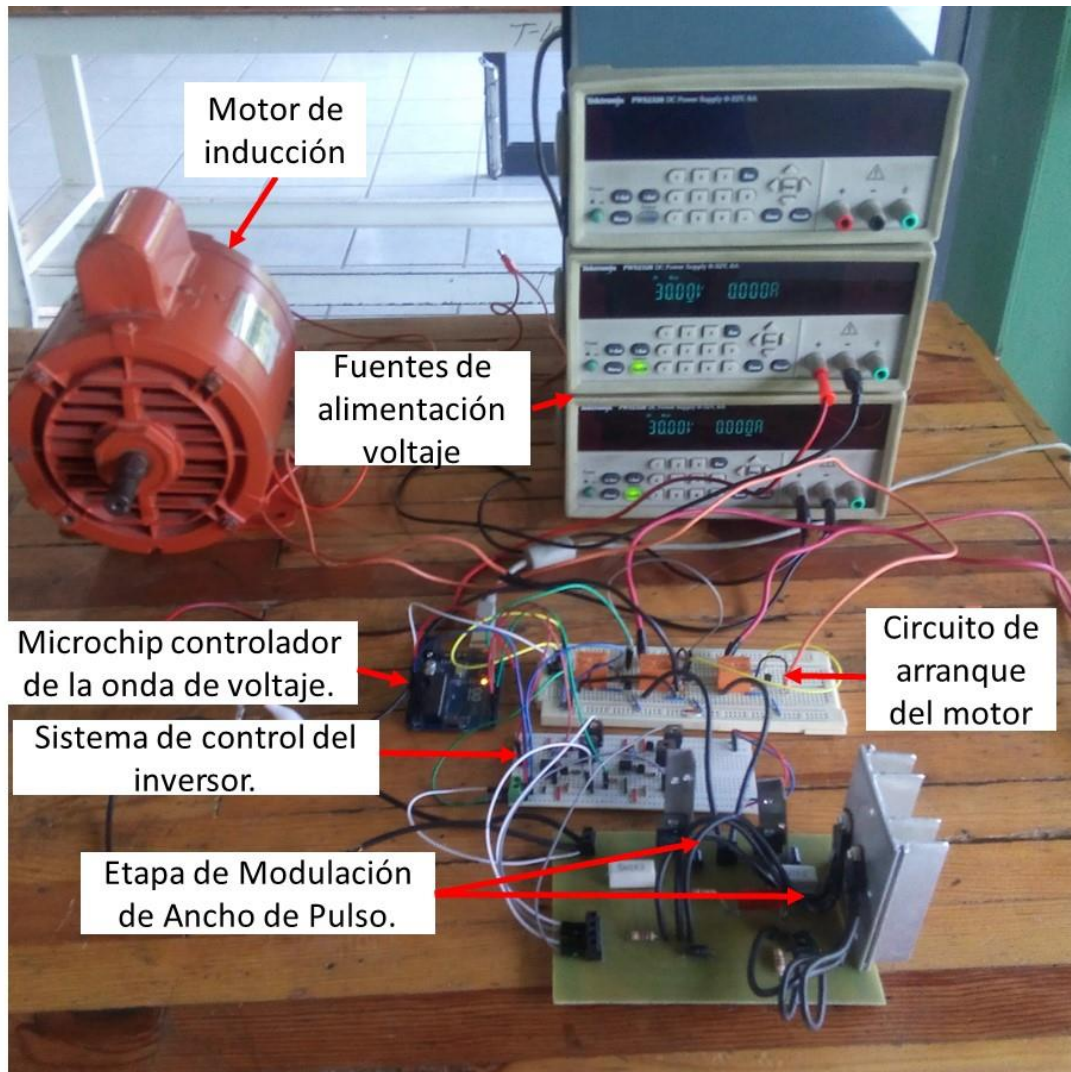


Fig. 4.6. Circuito físico del sistema de control para la variación de velocidad.

De esta manera se hacen las pruebas del sistema de control físico conectado al motor a un voltaje de onda cuadrada y frecuencia variable para el control de velocidad.

4.3 Resultados del circuito de MAP

La manipulación de la onda del voltaje se lleva a cabo variando la frecuencia donde el periodo disminuye para incrementar la frecuencia como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Variación de la frecuencia y periodo de la onda de voltaje.

Frecuencia (Hertz)	Periodo (ms)	ta (ms)	tb (ms)
10	100	50	50
20	50	25	25
30	33.33	16.67	16.67
40	25	12.5	12.5
50	20	10	10
60	16.67	8.33	8.33

Se obtienen las ondas de la variación del voltaje y frecuencia del inversor del circuito físico, la frecuencia varía con los datos de la Tabla 4.2, de 0 Hertz hasta 60 Hertz que es con lo que trabaja el motor del compresor.

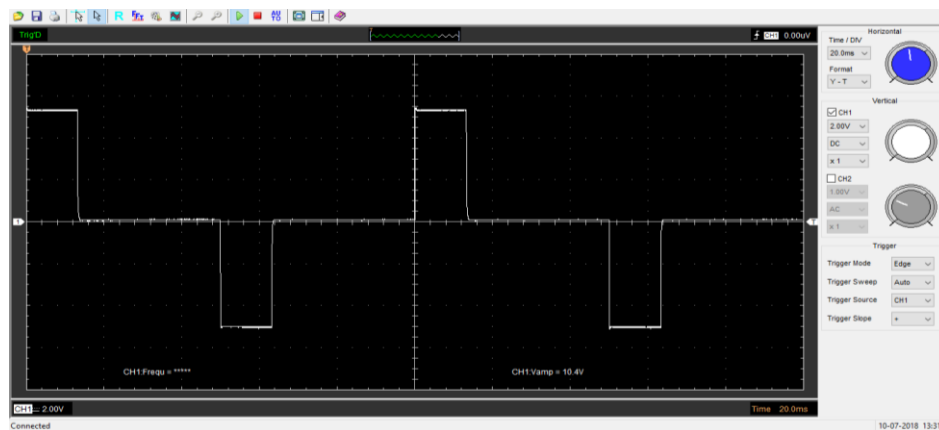


Fig. 4.7. Frecuencia a 10 Hertz a un voltaje pico de 104 volts.

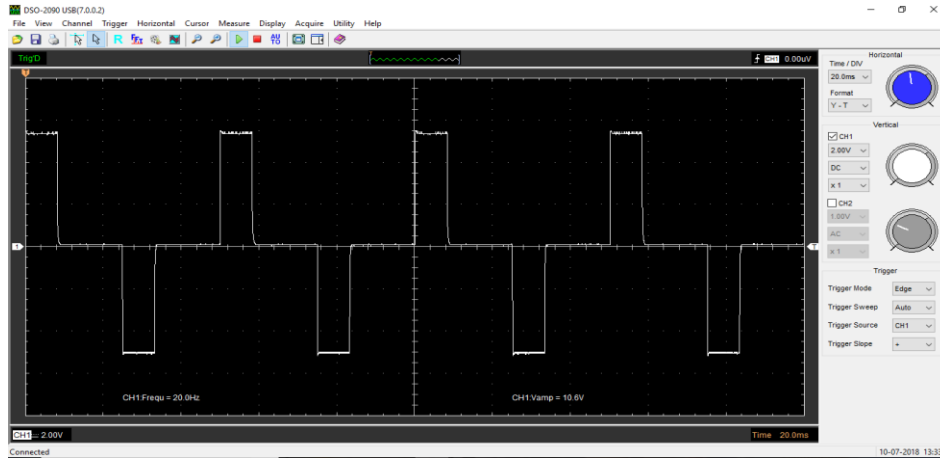


Fig. 4.8. Frecuencia a 20 Hertz a un voltaje pico de 106 volts.

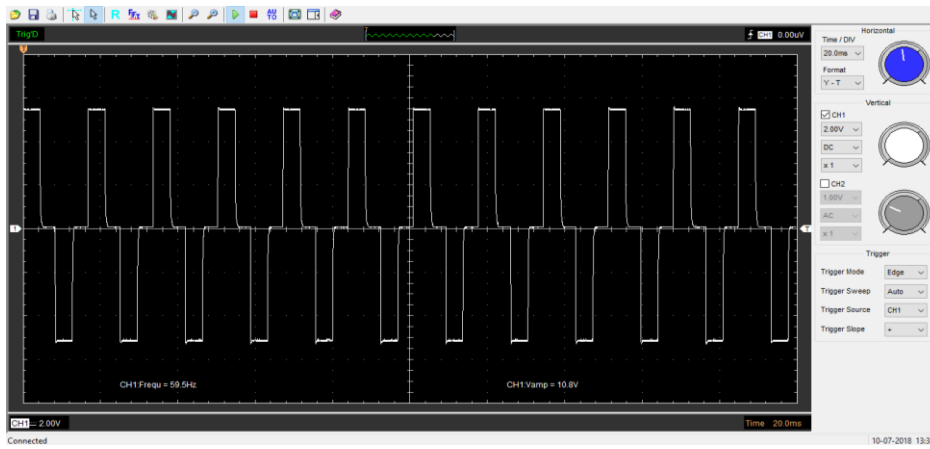


Fig. 4.9. Frecuencia a 30 Hertz a un voltaje pico de 108 volts.

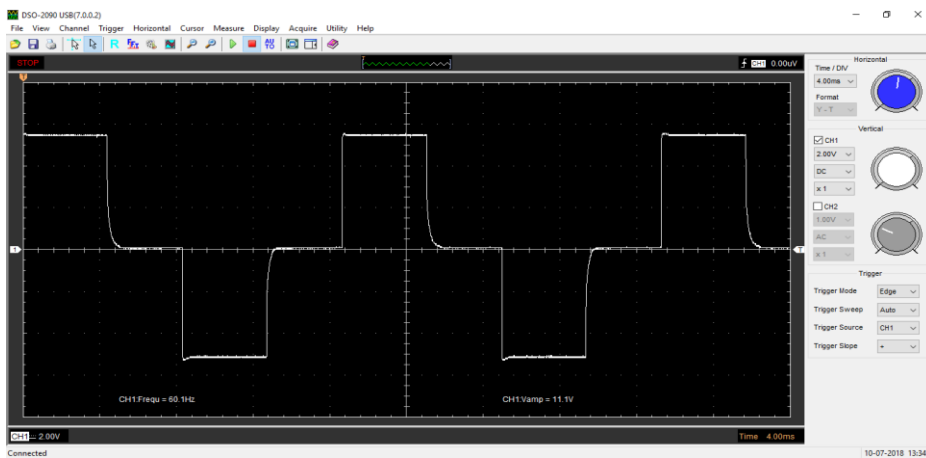


Fig. 4.10. Frecuencia a 40 Hertz a un voltaje pico de 111 volts.

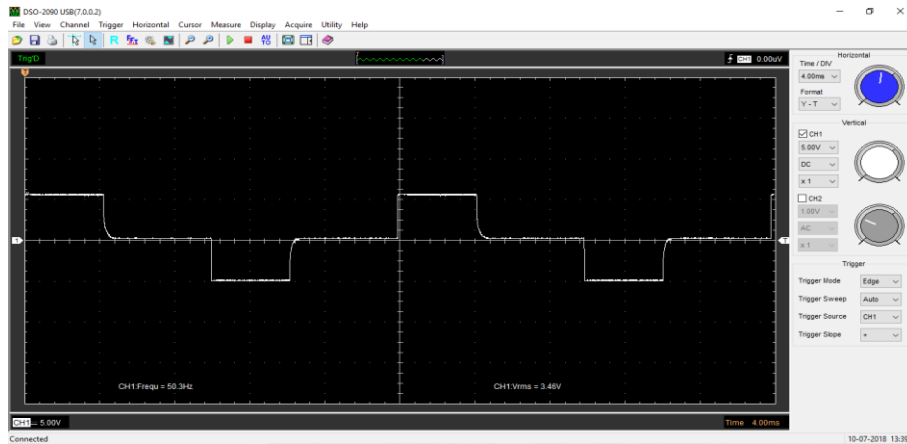


Fig. 4.11. Frecuencia a 50 Hertz a un voltaje pico de 34.6 volts.

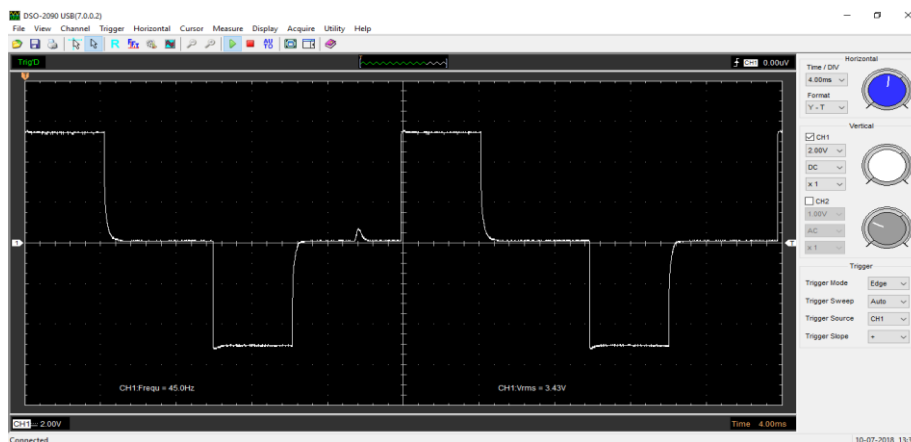


Fig. 4.12. Frecuencia a 60 Hertz a un voltaje pico de 34.3 volts.

4.4 Consumo eléctrico del motor de compresor

Según Petruzella el consumo en el arranque de los motores de inducción llegan hasta un 600% de su consumo nominal, en el proyecto físico se hicieron las pruebas del consumo de corriente eléctrica del motor de compresor en el arranque, a continuación se muestra la comparación del consumo de corriente eléctrica por el compresor en función del tiempo, sin control Fig. 4.13, y con la implementación del sistema de control Fig. 4.14

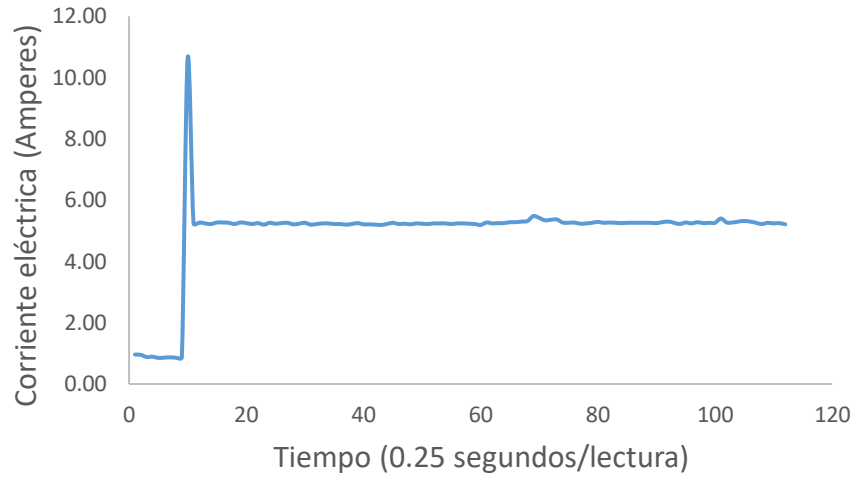


Fig. 4.13. Gráfica del consumo de corriente eléctrica del motor de compresor.

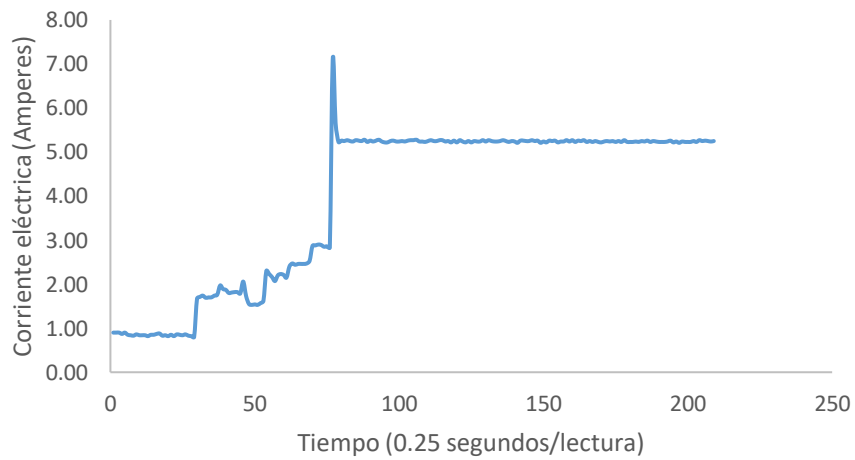


Fig. 4.14. Gráfica del consumo de corriente eléctrica del motor con la implementación del sistema de control.

Se puede observar como el consumo de corriente eléctrica va aumentando súbitamente en el momento de arranque hasta llegar a su consumo nominal.

Conclusiones

La eficiencia energética consiste en lograr reducir el consumo de energía, dentro de la industria y en el hogar, ya que existe una mayor dependencia del combustible fósil, es por esta razón que se buscan técnicas para poder dar eficiencia a sistemas energéticos como en los sistemas de refrigeración, se les puede dar eficiencia energética con los sistemas de control los cuales logran reducir el consumo en una cantidad grande ya que trabajan todo el día y no son costosos.

Este proyecto tiene varias etapas fundamentales la primera está en el análisis de las pérdidas de energía por fricción que se genera en los segmentos del mecanismo del compresor como es el pistón y la biela, como se observa generan una pequeña pérdida de energía que podría ser despreciable, esto se suma a la energía que demanda el proceso de compresión del gas refrigerante.

La siguiente parte fundamental es la variación de voltaje con el aumento del tiempo que se le dé al ángulo de disparo ya que el motor debe aumentar la velocidad desde cero hasta su nominal, como se observa en los resultados, en el capítulo 3 se muestran los modelos matemáticos obtenidos de los que se muestra sus resultados en el capítulo 4, se observa que mientras el valor de deslizamiento disminuye de la misma forma la corriente eléctrica consumida disminuye, el valor de deslizamiento con lo que trabaja el motor del compresor es igual a 0.17.

En el capítulo 4 se observa cómo se lleva a cabo el circuito del sistema de control con la etapa de variación de voltaje y la etapa de inversión de voltaje, es evidente como aumenta la velocidad del motor desde un estado de reposo hasta su nominal de forma progresiva, en las mediciones de la corriente se puede ver el consumo es de manera progresiva, es decir, se logra eliminar el excedente de energía o pico de energía.

Con esto se puede tener una validez de la propuesta del proyecto, y comprobación de los resultados de los modelos matemáticos que se obtuvieron.

Referencias bibliográficas

1. Bejarano G., Alfaya J.A., Ortega M.G., Vargas M., 2016, On the difficulty of globally optimally controlling refrigeration systems, España, Applied Thermal Engineering.
2. Qureshi T.Q. and Tassou S.A., 1995, Variable-speed capacity control in refrigeration, Great Britain, Applied Thermal Engineering.
3. Biswas S.K., Ramakrishna B.S., and Vithayathil J., 1987, A New PWM Control Method for Three-Phase, Autosequentially Commutated Current Source Inverters, U.S.A., IEEE transactions on industry applications.
4. Palaniappan R., Vithayathil J. y Datta S.D., 1979, Principle of a dual current source converter for AC motor drives, U.S.A., IEEE transactions on industry applications.
5. Jannati M., Abdollahzadeh S.A., Asgari S.H., Goh W.Y., Monadi A., Aziz M.J.A., Idris N.R.N., 2017, A review on Variable Speed Control techniques for efficient control of Single-Phase Induction Motors: Evolution, classification, comparison, Malasya, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
6. Dincer I. Kanoglu M., 2010, Refrigeración Systems and Applications, United Kingdom, edit. Wiley.
7. Chapman S.J., 2012, Máquinas Eléctricas, México, edit. Mc Graw Hill.
8. Shan K.W., 2001, Handbook of Air Conditioning and Refrigeration, U.S.A., edit. Mc Graw Hill.
9. ASHRAE, 2006, Handbook: Refrigeration: SI Edition (International System of Units).
10. Yunus A.C. & Michael A.B., 2012, Termodinámica, México, edit. Mc Graw Hill.
11. Petruzella F.D. 2010, Electric Motors and Control Systems, U.S.A., edit. Mc Graw Hill.
12. Rashid M.H., 1995, Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones, México, edit. Prentice Hall.
13. Hayt W.H., Kemmerly J.E. y Durbin S.M., 2007, Análisis de Circuitos en Ingeniería, México, edit. Mc Graw Hill.
14. Rapin P.J. & Jacquard P., 2006, Instalaciones frigoríficas, Francia, edit. Alfaomega Marcombo.
15. Bruce A.C., 2001, Circuitos, México, edit. Thomson Learning
16. Pita E.G., 1994, Acondicionamiento de aire, principios y sistemas, México, edit. Limusa.
17. Serway R.A. y Jewett J.W.Jr., 2008, Física para ciencias e ingeniería, México, edit. Cenage.

18. Norton R.L., 2004, Diseño de maquinaria, México, edit. Mc Graw Hill.
19. Benavent J.M., Abellan A.G. y Figueres E.A., 2000, Electrónica de Potencia, teoría y aplicaciones, México, edit. Alfaomega.
20. Hart D.W., 2001, Electrónica de Potencia, España, edit. Prentice Hall.
21. Nise N.S., 2006, Sistemas de control para ingeniería, México, edit. Cecsá.
22. Ogata K., 2010, Ingeniería de control moderna, España, edit. Pearson.
23. Whitman B. y Johnson B., Tomczyk J. y Silberstein E., 2009, Tecnología de la Refrigeración y Aire acondicionado, México, edit. Thomson parninfo.
24. Jordan R.C. y Priester G.B., 1948, Refrigeration and Air Conditioning, U.S.A., edit. Prentice Hall.
25. Moran M.J. y Shapiro H.N., 2004, Fundamentos de termodinámica técnica, España, edit. Wiley.
26. Mileaf H., 1985, Electricidad, México, edit. Limusa.