

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:
**“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMPRESORES
CONVENCIONALES Y COMPRESORES ACCIONADOS A VELOCIDAD
VARIABLE”**

AUTORES:

CARMONA CHICA BYRON JAVIER
BRITO GUERRERO JAIME VICENTE

TUTOR:

ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PHD.

CUENCA – ECUADOR

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

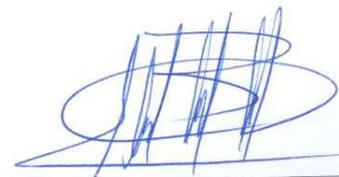
Nosotros, Byron Javier Carmona Chica con documento de identificación N° 0105257802 y Jaime Vicente Brito Guerrero con documento de identificación N° 0104326566, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMPRESORES CONVENCIONALES Y COMPRESORES ACCIONADOS A VELOCIDAD VARIABLE”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2019



Byron Javier Carmona C.
C.I. 0105257802



Jaime Vicente Brito G.
C.I.0104326566

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMPRESORES CONVENCIONALES Y COMPRESORES ACCIONADOS A VELOCIDAD VARIABLE”**, realizado por Byron Javier Carmona Chica y Jaime Vicente Brito Guerrero, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2019



Ing. José Manuel Aller Castro, PhD.

CI: 0151561800

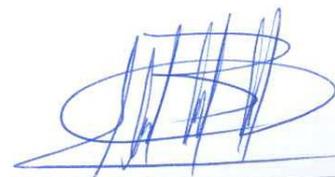
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Byron Javier Carmona Chica con documento de identificación N° 0105257802 y Jaime Vicente Brito Guerrero con documento de identificación N° 0104326566, autores del trabajo de titulación: **“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMPRESORES CONVENCIONALES Y COMPRESORES ACCIONADOS A VELOCIDAD VARIABLE”** certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque Investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2019



Byron Javier Carmona C.
C.I. 0105257802



Jaime Vicente Brito G.
C.I.0104326566

Cuenca, Julio del 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hijo amado Samuel que es el dueño entero de mi corazón y a mi esposa Adriana quienes son un pilar fundamental en mi vida, a mi mamita Gloria y mi padre Marcelo quienes con su ejemplo han motiva mi alma y corazón, pero muy en especial este logro lo dedico a mi abuelito papi Samuel mi alma entera.

Carmona

Cuenca, Julio del 2019

DEDICATORIAS

El presente trabajo va dirigido con amor a mi hijo Ian Israel quien con su presencia me ha motivado y fortalecido para con sabiduría finalizar estas enseñanzas que las compartiré y disfrutare con él, además a mi hermano Ivan que con su cariño supo incentivar el deseo de superación para en el futuro ser una guía para él.

Brito

AGRADECIMIENTOS

Valoro y comprendo el duro camino de lograr un objetivo en el que día a día presenta dificultades, es por eso que agradezco primeramente a Dios y a mis padres por el apoyo incondicional para lograr esta meta, a mi esposa amada que tuvo que soportar las malas noches ,a mis hermanos que con su ejemplo y transparencia me han motivado en este camino, a mi primo que jamás ha dejado de apoyarme y a mi tutor quien estuvo con vastos conocimientos en el tema desarrollado y supo guiarnos de la mejor manera.

Byron Javier Carmona C.

Gracias a Dios, a mi abuelitos que con su sabiduría me guio por el camino del bien, a mi padre Carlos que a través de la distancia supo apoyarme, a mi madre que con su presencia, amor y sacrificio estuvo a mi lado en todo momento; supieron motivarme moral y materialmente para culminar mis estudios superiores, obtener un titulo y así asegurarme una vida digna y clara en el futuro.

Jaime Vicente Brito G.

RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad evaluar, posibles mejoras de rendimientos en las máquinas con compresores accionados a velocidad variable, con respecto a los de accionamiento tradicional. Para analizar la operación de estos equipos se realiza la simulación de la operación a velocidad variable y convencional en el software MATLAB. Se ha recolectado la información acerca de los sistemas de refrigeración a nivel doméstico e industrial, así como las técnicas de control del motor de inducción que mejoran la característica par-velocidad. Posteriormente, se realizan simulaciones y análisis del control de voltaje-frecuencia y se compara con el control tradicional del compresor. Además, se presenta un promedio de consumo energético que tendría el accionamiento a velocidad variable en el motor del refrigerador y su posible impacto en el sector industrial.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate possible performance improvements in machines with compressors operated at variable speed, with respect to those of traditional drive. To analyze the operation of these equipment's, the simulation of the variable and conventional speed operation in the MATLAB software is performed. Information about domestic and industrial refrigeration systems has been collected, as well as induction motor control techniques that improve the torque-speed characteristic. Subsequently, simulations and analysis of the voltage-frequency control are carried out and compared with the traditional control of the compressor. In addition, there is an average energy consumption that would have the drive at variable speed in the refrigerator engine and its possible impact on the industrial sector.

PREFACIO

Este trabajo de investigación presenta la comparación entre dos métodos de control de compresores para refrigeración: control directo tradicional mediante encendido y apagado (on/off) y controles de velocidad variable, los dos simulados en Matlab. Con estos dos modelos, se realiza el análisis del comportamiento y se comparan para verificar cual ofrece mayores ventajas en el rendimiento energético, tanto en un sistema de refrigeración doméstico, como en el sector industrial.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
DEDICATORIAS.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
PREFACIO	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
INTRODUCCIÓN	1
1 PROBLEMÁTICA DE ESTUDIO Y OBJETIVOS	3
1.1 Problema de estudio	3
1.1 Grupo objetivo.....	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Metodología Aplicada	4
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1 Sistemas de refrigeración	5
2.2 Componentes del sistema de refrigeración.....	6
2.2.1 Condensador.....	6
2.2.2 Válvula de expansión o estrangulamiento.....	6
2.2.3 Evaporador	6
2.2.4 Compresor	7
2.3 Sistema de refrigeración doméstico.....	7
2.3.1 Control on/off del sistema de refrigeración	8
2.4 Compresores	9
2.4.1 Tipos de compresores.....	9
2.4.2 Funcionamiento tradicional del compresor	10
2.4.3 Modelado de un compresor.....	11

2.4.4	Modelo basado en datos experimentales.....	11
2.5	Máquina de Inducción	13
2.5.1	Parte constructivas de una máquina de inducción	14
2.5.2	Modelo del motor de Inducción	14
2.5.3	Circuito Equivalente.....	17
2.5.4	Calculo de parámetros de la Máquinas de inducción.....	20
2.5.5	Prueba de Vacío	20
2.5.6	Prueba de rotor bloqueado	21
2.6	Regulación de velocidad al motor de inducción	22
2.6.1	Métodos de control.....	23
3	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
3.1	Desarrollo del modelo matemático del sistema de compresión accionado a velocidad variable y sistema convencional	27
3.2	Desarrollo del modelo de la máquina de inducción.	29
3.2.1	Relación lineal entre tensión y frecuencia aplicada al motor.....	31
3.3	Simulación del control de tensión-frecuencia constante en Matlab	32
3.4	Simulación de control de velocidad-frecuencia para el refrigerador doméstico	34
3.5	Comparación entre el sistema tradicional vs control a velocidad variable .	37
3.5.1	Promedio del consumo energético del sistema accionado a velocidad variable y del sistema convencional.....	39
4	Conclusiones y Recomendaciones	41
4.1	Conclusiones	41
4.2	Recomendaciones:.....	42
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICES.....	46
	APÉNDICE A: ALGORIMO IMPLEMTADO EN MATLAB.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema básico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor [2].	5
Figura 2.2 Partes del refrigerador domestico [26] [27].	8
Figura 2.3 Consumo de energía dentro del hogar [26].	8
Figura 2.4 Control ON/OFF [11].	9
Figura 2.5 Tipos de Compresores [Compressors].	9
Figura 2.6 Control ON/OFF de un compresor convencional [26].	11
Figura 2.7 Despiece de un motor de inducción industrial con rotor jaula de ardilla [Aller].	13
Figura 2.8 Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator [Aller].	15
Figura 2.9 Circuito equivalente de la maquina inducción [15].	17
Figura 2.10 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción [15].	19
Figura 2.11 Circuito equivalente en vacío [FraileM].	21
Figura 2.12 Circuito equivalente en cortocircuito [FraileM].	22
Figura 2.13 Control de velocidad mediante variación de voltaje de alimentación [15].	24
Figura 2.14 Control de Voltaje y frecuencia [21].	25
Figura 2.15 Curvas par-velocidad de un motor asíncrono para E_1/f_1 constante [FraileM].	26
Figura 3.1 Velocidad mecánica vs torque inducido a diferentes frecuencias.	32
Figura 3.2 Velocidad mecánica vs corriente del rotor a distintas frecuencias.	33
Figura 3.3 Velocidad mecánica vs potencia en el eje a diferente frecuencia.	34
Figura 3.4 Velocidad mecánica vs potencia en el eje.	35
Figura 3.5 Velocidad mecánica vs par inducido.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3.6 Control on/off vs control a velocidad variable (V/f).	39
Figura 3.7 Par inducido con control tradicional y de velocidad variable.....	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Coeficientes de correlación polinómica [paperdatos].....	27
Tabla 3.2 Tasa de flujo másico del compresor Mitsubishi [Kg/s].	28
Tabla 3.3 Características de la máquina de inducción.	30
Tabla 3.4 Comparación del consumo energético del sistema de refrigeración con los dos tipos de control.	40

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración han sido utilizados desde hace más de un siglo y han ido mejorando debido a las necesidades de las personas, al avance tecnológico disponible en la actualidad y a las nuevas técnicas de control de procesos dentro de estos sistemas, permitiendo elevar el nivel de vida del usuario final [1].

Al utilizar un sistema de refrigeración se logra reducir la temperatura extrayendo calor de un determinado espacio o componente, y depositándolo hacia otro espacio o componente el cual interactúa con la temperatura ambiente. Este proceso se puede emplear para: conservación de alimentos a pequeña o gran escala, climatización de espacios habitados, enfriamiento de equipos específicos, procesos industriales en los que se requiera cambios de temperatura, etc. constanding de varios elementos para lograr su objetivo [1, 2]. Su funcionamiento comprende cuatro etapas termodinámicas (compresión, condensación, expansión y evaporación) que serán consideradas de forma general ya que cada una de estas etapas posee características distintas.

Para lograr completar las cuatro etapas, se utilizan distintos elementos en el sistema, siendo el compresor el principal componente debido a que en la etapa de compresión es en donde se produce el mayor consumo de energía eléctrica. Es por esta razón que se han desarrollado diferentes técnicas de control para aumentar la eficiencia del compresor y a su vez la eficiencia de todo el sistema, reduciendo el ruido y las corrientes de arranque, aumentando la durabilidad de los componentes y siendo más amigables con el medio ambiente.

En este trabajo se analizan dos sistemas de accionamiento para compresores: los convencionales que trabajan con la estrategia de encendido y apagado en condiciones específicas de temperatura y/o presión y los accionados a velocidad variable que permiten incrementar eficiencia y mejorar otras características o prestaciones.

Se propone modelar un sistema de compresión que será accionado mediante electrónica de potencia para comparar los beneficios que aportan estos esquemas con respecto a los sistemas tradicionales on/off. Para ello, se determinan las características de la máquina de inducción y del compresor y se realizan cálculos que corresponden

al sistema para posteriormente realizar la simulación que determina los parámetros del sistema de refrigeración y su eficiencia. Esto permite tener la posibilidad de diferenciar el comportamiento entre sistemas de refrigeración accionados a velocidad variable versus los sistemas tradicionales, y también, permite evaluar el consumo energético de cada uno y presentar nuevas consideraciones para el posterior diseño de estos sistemas.

1 PROBLEMÁTICA DE ESTUDIO Y OBJETIVOS

1.1 PROBLEMA DE ESTUDIO

Hoy en día las industrias, comercios y hogares utilizan compresores para multitud de actividades tales como la refrigeración, producción de vacío o aire comprimido entre otras. Estos sistemas de compresión poseen un par resistente al momento del arranque, debido a que por lo general el compresor arranca con carga y esto dificulta su accionamiento e incrementa la duración de las corrientes de arranque.

Al requerir una característica de alto par de arranque, los sistemas de accionamiento tradicional on/off tienen baja eficiencia y generalmente deben sobrepasar los niveles de presión y temperatura necesarios. Para compensar esta característica se han desarrollado técnicas de control de velocidad variable mediante la implementación de controladores electrónicos de potencia, los mismos que permiten la utilización de máquinas de alta eficiencia, ajustando la velocidad al punto necesario de funcionamiento, reduciendo el consumo energético y conservando las características de los demás componentes. Además, suprime los arranques y paradas frecuentes que implican altas demandas de potencia y corriente instantáneas.

En este trabajo se evaluarán las posibles mejoras en el rendimiento de los equipos con compresores accionados mediante electrónica de potencia, comparados con los accionamientos directos de encendido y apagado (ON/OFF), debido a que estos sistemas pueden accionar motores de inducción de alto rendimiento, los cuales pueden presentar dificultades durante el arranque directo debido al compromiso existente entre par de arranque y eficiencia del motor.

1.1 GRUPO OBJETIVO

El resultado de esta investigación permitirá comparar los diferentes sistemas de accionamiento con los que los sistemas de compresión están trabajando, exponiendo las principales desventajas de los accionamientos directos de compresores y las ventajas que se tiene al disponer de un controlador electrónico de potencia que regule la velocidad del compresor. Esta investigación será de utilidad para sectores industriales que diseñan o aplican estas tecnologías. También los investigadores en el área se beneficiarán de los resultados de este trabajo, así como los distintos usuarios

de estos sistemas, debido a que podrán disminuir el consumo energético, reducir costos de energía y cuidar el medio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las posibles mejoras en el rendimiento de equipos con compresores accionados mediante electrónica de potencia comparados con accionamientos directos tradicionales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 Modelar sistemas de compresión accionados tanto mediante electrónica de potencia, como con motores en operación intermitente.
- 2 Evaluar los diferentes tipos de motor que puedan utilizarse en cada alternativa.
- 3 Determinar eficiencias y costos de las soluciones propuestas, comparadas con las alternativas convencionales.
- 4 Evaluar costos totales dentro de la implantación en industrias, comercio y hogares de estas alternativas.

1.3 METODOLOGÍA APLICADA

Este documento utiliza la metodología de investigación en base a los objetivos planteados. Como primer punto consiste en la recolectar información acerca de: Sistema de refrigeración y sus elementos, tipos de compresores, elementos del refrigerador doméstico, técnicas de control de velocidad para el motor, parámetros de la máquina de inducción y valores típicos de consumo energético de los sistemas de compresión. Luego se desarrolla la modelación de un sistema de compresión con accionamiento directo y con accionamiento a velocidad variable a nivel doméstico, utilizando la técnica de control de velocidad-frecuencia y analizando sus condiciones de funcionamiento. Y, finalmente se evalúan los resultados obtenidos en base a las gráficas obtenidas de velocidad mecánica en el eje versus potencia en el eje, velocidad mecánica en el eje versus par y velocidad mecánica versus corriente de rotor en condiciones establecidas de funcionamiento típico.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

La gran mayoría de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado en ámbitos domésticos, industriales o de climatización utilizan ciclos de compresión de vapor. Este tipo de sistemas tienen cuatro elementos básicos: el evaporador, el condensador, la válvula de expansión o estrangulamiento y el compresor; elementos que representan un alto porcentaje de consumo energético [33]. En la figura 2.1 se puede apreciar el esquema básico de un sistema de compresión.

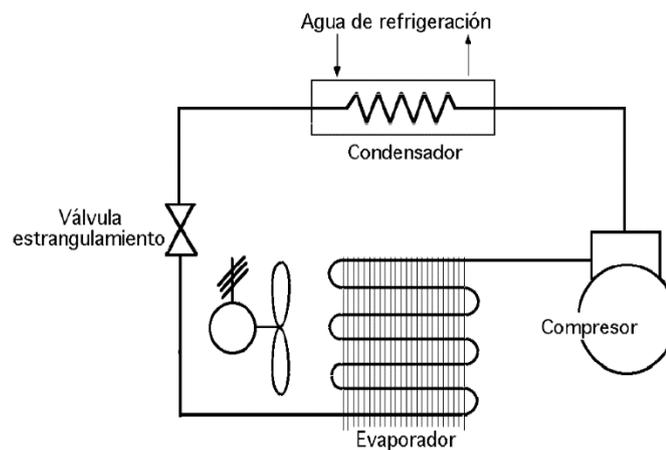


Figura 2.1 Esquema básico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor [2].

En el estudio y diseño de los sistemas de refrigeración se aplican diversas ciencias, tales como la química, la termodinámica, transferencia de calor, la ingeniería mecánica y la ingeniería eléctrica en donde aparecen sistemas monofásicos o trifásicos para la alimentación de los equipos, así como técnicas de control y automatización [34], que ayudan significativamente a plantear sistemas de refrigeración altamente eficientes con el uso de motores de inducción de alta eficiencia y variadores de frecuencia que permiten controlar el arranque y par inicial necesario para condiciones establecidas de funcionamiento.

Para la correcta selección, diseño y sintonía es recomendable explorar el rango de operatividad del sistema y conseguir modelos que representen lo más fielmente posible la respuesta del sistema en diferentes puntos de operación [33] en función de los siguientes parámetros [34]:

- Temperaturas de operación: Temperaturas de evaporación y condensación.
- Capacidad del sistema (generalmente denominada en kW definida en función de la carga térmica).
- Refrigerantes amigables con el medio ambiente y de amplio efecto refrigerante.
- Costos operativos del sistema.

2.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

2.2.1 CONDENSADOR

EL condensador es un intercambiador térmico dedicado a eliminar calor absorbido del evaporador y enviado por el compresor [2, 4]. En la refrigeración doméstica el condensador se relaciona con el medio ambiente. Al circular el gas refrigerante por el condensador, la temperatura es superior a la del medio ambiente, generando cambio de calor [2]. Es decir, la temperatura del flujo refrigerante disminuye hasta condensar, luego cambia a vapor saturado conforme se comprime el refrigerante, convirtiéndose en líquido durante el 90% del trayecto en el condensador [2].

2.2.2 VÁLVULA DE EXPANSIÓN O ESTRANGULAMIENTO

El objetivo de la válvula de expansión es reducir la temperatura y presión del fluido, entre el capacitor y evaporador, garantizando el efecto frigorífico en el sistema de refrigeración. Además, esta válvula regula la cantidad del refrigerante que ingresa a la evaporación [2, 4]. Para dicho control, tiene incorporado un sensor de temperatura para abrir o cerrar esta válvula, con lo cual se reduce o incrementa el ingreso del refrigerante [2, 4].

2.2.3 EVAPORADOR

El evaporador opera como intercambiador de calor, por cuyo interior fluye refrigerante el cual cambia su estado de líquido a vapor. Este cambio de estado permite absorber el calor sensible contenido alrededor del evaporador y de esta manera el gas, al abandonar el evaporador lo hace con una energía interna notablemente superior debido al aumento de su entalpía, cumpliéndose así el fenómeno de refrigeración [34].

2.2.4 COMPRESOR

El compresor es el encargado de reducir el volumen del refrigerante del sistema de refrigeración, por esta razón representa el 80% del total de consumo de energía eléctrica del sistema. Contempla dos acciones principales en el ciclo de refrigeración: Extraer el vapor del evaporador para mantener a temperatura y presión establecida en esa unidad y por otra parte aumentar la presión de vapor del refrigerante a través de compresión e incrementar la temperatura del vapor. Debido a que los compresores son fundamentales en el ciclo del sistema de refrigeración, es imprescindible que tengan larga vida útil, alta eficiencia, fácil mantenimiento, bajo ruido y costo reducido [5].

2.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICO

El refrigerador doméstico es el sistema de conservación de alimentos típicamente utilizado en los hogares, siendo uno de los artefactos eléctricos con mayor consumo de energía eléctrica dentro del hogar ya que es utilizado continuamente. La mayor parte de refrigeradores utilizan la tecnología por compresión de vapor. Esto hace que el refrigerador sea responsable del 30% de consumo energético en los países desarrollados y subdesarrollados, con la posibilidad de que este porcentaje se eleve aún más cuando se presentan problemas en la operación normal [26].

En la figura 2.2 se puede apreciar las partes del refrigerador doméstico, donde se puede concluir que el compresor es el corazón del sistema al bombear el refrigerante por cada uno de sus elementos y conseguir la circulación de este, así como la absorción y expulsión de calor dentro de los compartimentos del equipo.

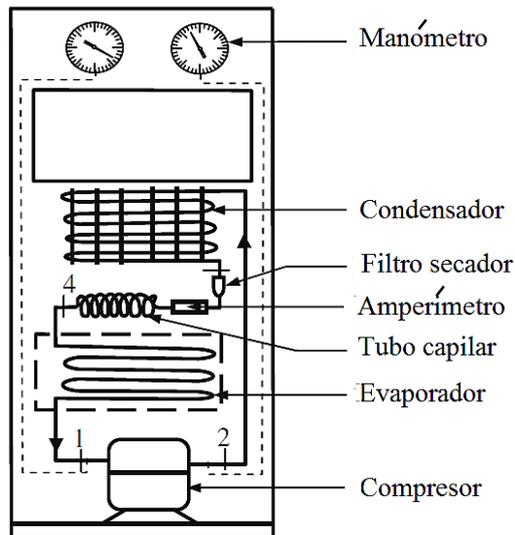


Figura 2.2 Partes del refrigerador doméstico [26] [27].

En la figura 2.3, se muestra un ejemplo de consumo energético en México de 4.7 TWh/año, en donde el refrigerador es el segundo electrodoméstico de mayor consumo de energía dentro del sector doméstico [2].

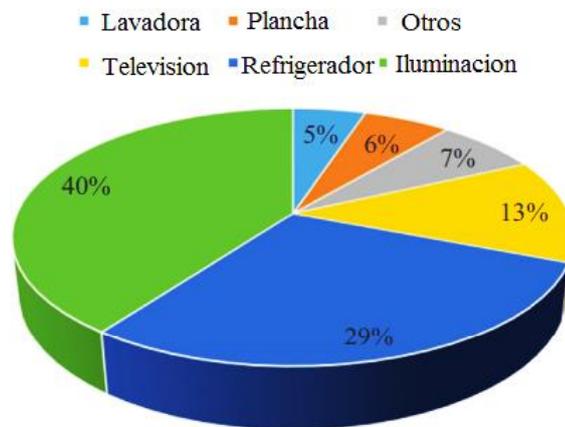


Figura 2.3 Consumo de energía dentro del hogar [26].

2.3.1 CONTROL ON/OFF DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El método de control del compresor tradicional ON/OFF, ilustrado en la figura 2.4 tiene por objeto refrigerar un espacio cerrado. Para este fin, es utilizado un relé con un control realimentado, de histéresis fija. No es óptimo para regular temperaturas con alta precisión como es necesario para alimentos o sistemas de alta eficiencia [10], pero funciona aceptablemente en los hogares e industrias en donde un cierto margen de variación de temperatura puede ser más tolerable.

Al investigar sobre la reducción del rendimiento del sistema de refrigeración con control ON/OFF, se concluye que la operación intermitente del sistema afecta el consumo de energía al activar el compresor. Comparando el rendimiento de capacidad controlada utilizando bombas de calor convencionales, con el sistema de velocidad controlada, se demuestra que, con la mitad de velocidad nominal del compresor, se obtienen mejoras del 10% en la eficiencia de demanda energética con respecto al sistema convencional [11].

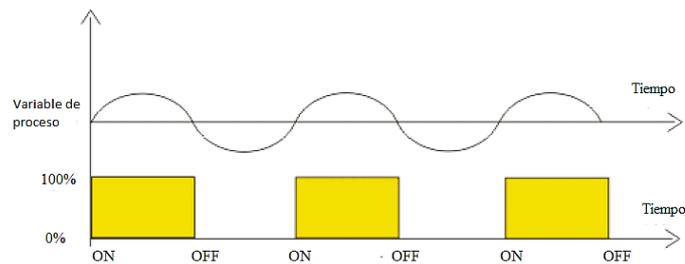


Figura 2.4 Control ON/OFF [11].

2.4 COMPRESORES

2.4.1 TIPOS DE COMPRESORES

En sí, los compresores son máquinas diseñadas para suministrar gas a una presión superior a la que existía inicialmente. El aumento de la presión, la presión de trabajo, la velocidad específica y el diseño mecánico forman la base de la diferenciación y la clasificación. Inicialmente, estas máquinas se pueden dividir en categorías de desplazamiento positivo y dinámico (Figura 2.5).

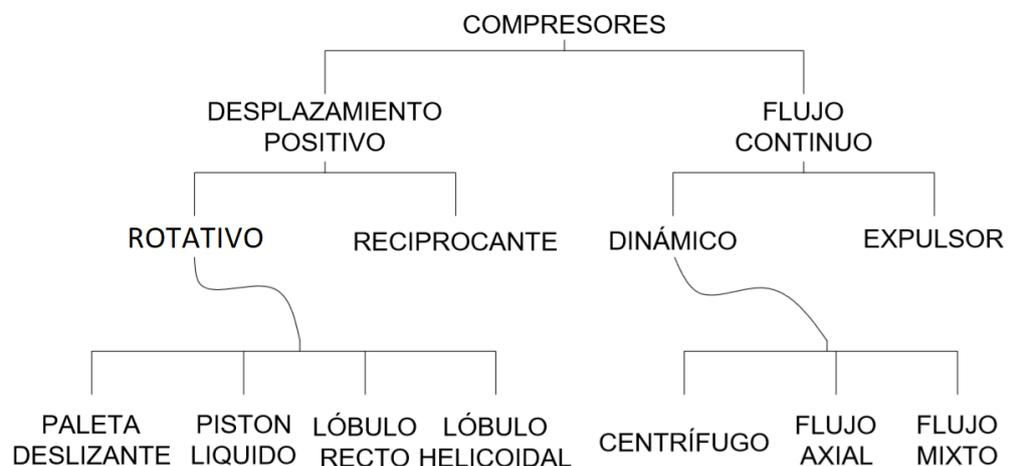


Figura 2.5 Tipos de Compresores [32].

Los métodos utilizados para lograr la compresión son [32]:

- Capturar cantidades consecutivas de gas en algún tipo de envoltura, reduciendo el volumen, aumentando así la presión, y luego empujando el gas comprimido fuera de la cámara de compresión.
- Capturar cantidades consecutivas de gas en algún tipo de envoltura, llevándolo sin cambiar el volumen a la abertura de descarga, comprimiendo el gas y superando el flujo de retorno del sistema de descarga, al tiempo que se expulsa el gas comprimido fuera de la caja.
- Comprimir el gas por la acción mecánica de los impulsores o rotores giratorios con paletas que imparten velocidad y presión al gas que fluye. La energía de velocidad adicional en el gas se convierte en presión en una cuchilla o difusor estacionario adyacente.
- Insertando el gas en un chorro de alta velocidad de otro gas compatible y convirtiendo la alta velocidad de la mezcla en presión a través de un difusor.

2.4.2 FUNCIONAMIENTO TRADICIONAL DEL COMPRESOR

Por otra parte, el funcionamiento del compresor en el interior del refrigerador utiliza flujos intermitentes que es igual al control ON/OFF o control tradicional. Esto incrementa el consumo de energía al utilizar toda la potencia, es decir todo o nada sin importar las condiciones dinámicas y cambiantes del sistema de refrigeración, véase la figura 2.6. A ello se agrega pérdidas mecánicas debido a la cantidad de elementos en el compresor [34]. En el ciclo de compresión existe intervalos en el que el motor eléctrico no aprovecha toda la energía suministrada para comprimir el refrigerante, es decir, hay tiempos muertos en el que se pierde energía, por lo tanto, se debe buscar nuevas alternativas para mejorar el control del compresor, su diseño y el de los elementos mecánicos [26].

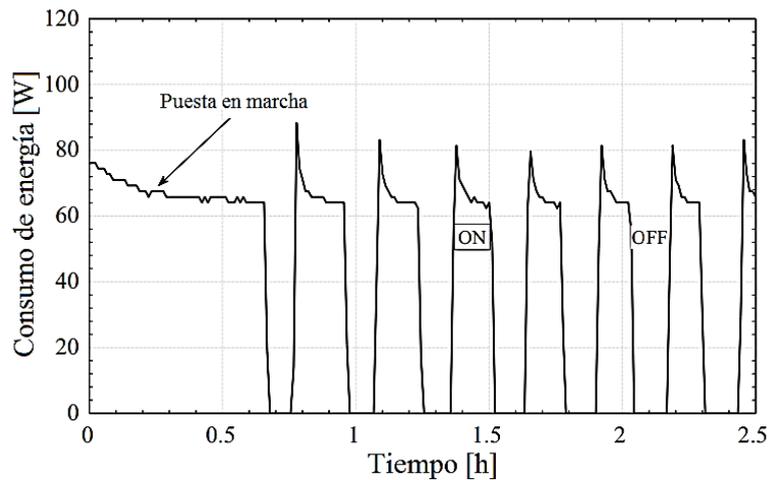


Figura 2.6 Control ON/OFF de un compresor convencional [26].

Otro de los problemas a los que se enfrentan los compresores es que indistintamente de las condiciones presentes del refrigerador (la carga térmica, capacidad de flujo másico del refrigerante, etc.), este equipo funciona a la misma velocidad durante el tiempo de encendido, lo cual desperdicia energía durante algún tiempo [26]. Por ello es importante recolectar la información constantemente como velocidad, caudal másico o temperatura, para actuar en base a los parámetros y poder controlar al compresor mejorando su eficiencia energética [26].

2.4.3 MODELADO DE UN COMPRESOR

El modelo se basa en curvas de rendimientos empíricos de los compresores, proporcionado por los fabricantes. Estas gráficas muestran la potencia de entrada al compresor, el flujo másico y/o la capacidad de refrigeración como funciones de la temperatura de evaporación a distintas temperaturas de condensación [30].

2.4.4 MODELO BASADO EN DATOS EXPERIMENTALES

Se han realizado muchos estudios sobre el método de modelado del compresor de velocidad constante, de los cuales se utilizan principalmente el método fundamentado en mapas y el método de eficiencia que contienen tablas de valores de refrigerantes libres de cloro, refrigerantes puros y diferentes versiones de mezclas de refrigerantes, además de un conjunto de datos que sirven para el modelo del compresor. El primero, con una precisión relativamente mayor, necesita los datos de rendimiento del compresor proporcionados por el fabricante del compresor. Sin embargo, solo se puede aplicar al compresor especificado y es difícil de extender a otros tipos. En comparación

con el método de mapas, el de eficiencia es mucho más simple. El complicado proceso de transferencia de calor y masa se simplifica mediante ecuaciones empíricas con coeficientes obtenidos experimentalmente [35].

Los parámetros principales para el modelamiento de los compresores a velocidad variable y fija son el flujo másico y la potencia de ingreso. En casos especiales se conoce temperatura de condensación y evaporación, sobrecalentamiento de succión, potencia de entrada, caudal másico del refrigerante y la entalpia, en la salida del refrigerante del evaporador. Con los datos de la entalpia del refrigerante se puede calcular la capacidad del enfriamiento, permitiendo encontrar el COP (Coeficiente de operación) [30].

El método de mapa consiste en ajustar el flujo másico del refrigerante junto con la entrada de potencia en el modelo de compresor variable [30].

2.4.4.1 Caudal másico y potencia de entrada a frecuencia base

El modelo de un compresor de velocidad constante se asemeja al compresor inversor cuando opera a velocidad constante [30]. Entonces la potencia de ingreso del compresor y el caudal másico del refrigerante se expresan:

$$M'_0 = a_1 T_c^2 + a_2 T_c + a_3 T_c T_e + a_4 T_e^2 + a_5 T_e + a_6 \quad (11)$$

$$P'_0 = b_1 T_c^2 + b_2 T_c + b_3 T_c T_e + b_4 T_e^2 + b_5 T_e + b_6 \quad (2)$$

P'_0 Potencia de ingreso a temperatura y frecuencia básica (W)

M'_0 Flujo másico del refrigerante en frecuencia básica [kg/h].

T_c Temperatura de condensación (C°).

T_e Temperatura de evaporación (C°).

$a_1 - a_6$ y $b_1 - b_6$ Constantes dependientes del compresor en particular.

El coeficiente de operación es un parámetro importante para evaluar el diseño de un compresor siendo igual a la división de la capacidad de enfriamiento y la potencia de entrada del compresor:

$$COP = \frac{Q}{P} = \frac{M\Delta h_e}{3.6P} \quad (3)$$

2.5 MÁQUINA DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción o maquina asíncrona es el convertidor electromecánico más utilizado en la industria. Su invención se le debe a Tesla, a finales del siglo XIX y nace como solución al problema de utilizar la corriente alterna [25].

En una máquina de inducción convencional toda la energía eléctrica fluye desde el estator. Los flujos producidos por las corrientes del estator generan un campo magnético rotatorio que corta a los conductores del rotor y de esta forma se obtiene sobre ellos fuerza electromotriz inducida que es utilizada para forzar la circulación de corrientes en el rotor. Al interactuar el campo magnético rotatorio del estator con el campo magnético rotatorio originado por las corrientes que circulan en el rotor, se produce el par eléctrico [25].

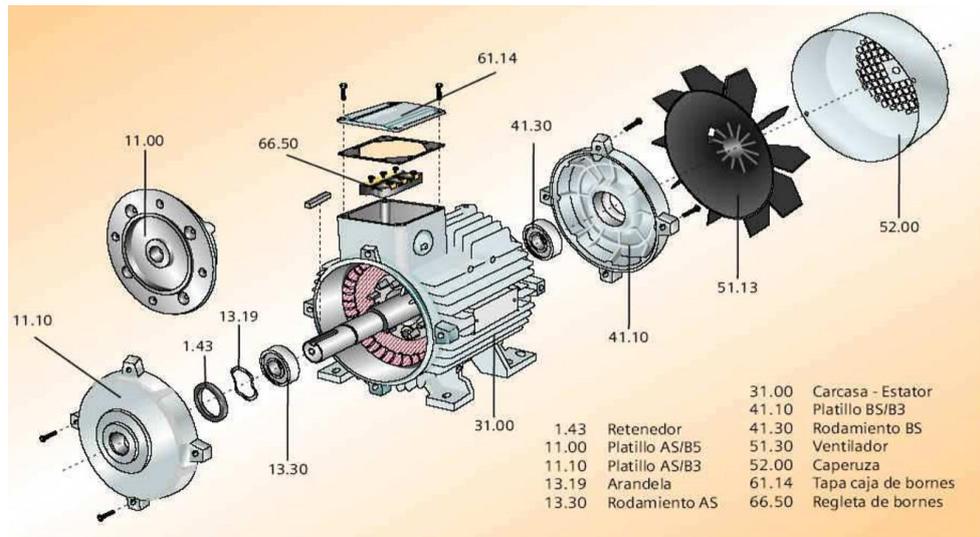


Figura 2.7 Despiece de un motor de inducción industrial con rotor jaula de ardilla [25].

Las razones fundamentales que justifican la aplicación masiva de la máquina de inducción hoy en día residen en su sencillez constructiva y en la robustez que ofrecen estos convertidores durante la operación en regímenes de alta sollicitación. Estos motores requieren un mantenimiento mínimo, pueden operar convenientemente en ambientes peligrosos y tienen una tasa de falla muy reducida. Algunas limitaciones tales como el ajuste de la característica par-velocidad, la intensidad de las corrientes

durante el arranque, la regulación de velocidad y el rendimiento, han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos o incorporando controladores electrónicos de potencia [25].

2.5.1 PARTE CONSTRUCTIVAS DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

La parte del estator es idéntico al del motor síncrono, en cambio el rotor posee dos formas diferentes de construcción nombradas: rotor de jaula de ardilla y rotor devanado [13].

El rotor de tipo de jaula de ardilla está constituido por barras conductoras colocadas en el interior de ranuras. En la cara del rotor y en cortocircuito entre el extremo de ellos [13]. El rotor devanado lleva incorporado un grupo de bobinas trifásicas generalmente conectadas en estrella. A su vez los extremos están conectados con los anillos deslizantes del eje del rotor [13]. Los devanados del rotor se encuentran cortocircuitadas por medio de las escobillas sobre el anillo deslizante [13]. En consecuencia, existe corriente en los devanados del rotor facilitando el acceso a las escobillas del estator para analizar e insertar resistencia al circuito del rotor, con ello se puede ajustar la característica par-velocidad del motor [13].

2.5.2 MODELO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

En la figura 2.8 se presenta el esquema básico de las bobinas de una máquina de inducción cuyo rotor y estator son trifásicos. En general, el modelo se puede establecer para un número general de fases en el estator y otro en el rotor. Como la mayoría de los motores de inducción de uso industrial son trifásicos en el estator, se realizará el modelo para un caso particular donde el rotor y el estator son trifásicos. Normalmente las bobinas rotóricas se encuentran en cortocircuito y en el estator se aplica un sistema trifásico y balanceado de tensiones sinusoidales. En los modelos convencionales de la máquina de inducción se desprecian los efectos que produce el ranurado, la distribución de los devanados, las excentricidades estáticas y dinámicas, la saturación en ciertos casos las pérdidas en el hierro y las pérdidas mecánicas [25].

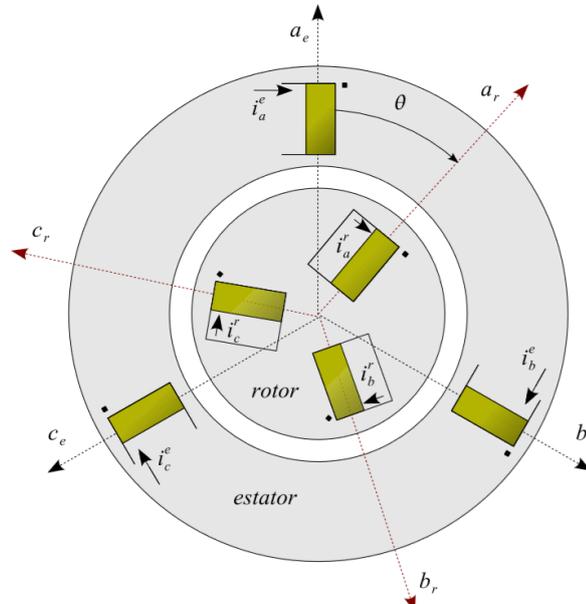


Figura 2.8 Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator [25].

2.5.2.1 Par inducido

Al suministrar un grupo de voltajes trifásico al estator es traducido un conjunto de corrientes, generando un campo magnético B_s en sentido antihorario. La velocidad a la que gira el campo es calculada por:

$$N_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (4)$$

f_e = frecuencia del sistema en Hz

P = Número de polos de la máquina

Este campo B_s circula por las barras del rotor produciendo un voltaje inducido. Por el hecho del movimiento del rotor con respecto al campo magnético del estator.

$$E_{ind} = (v * B) * l \quad (5)$$

v = Velocidad de barra.

B = Densidad de flujo magnético.

l = Longitud del conductor en campo magnético.

Si el rotor gira a velocidad síncrona, el voltaje inducido en el rotor es cero, por lo tanto, no hay presencia de corriente en el rotor ni campo magnético inducido. En ausencia de campo electromagnético el par es cero, y la velocidad del rotor se reduce por el

efecto de la fricción. La velocidad angular que alcanza el motor de inducción es cercana a la velocidad síncrona durante su operación en régimen permanente [36].

2.5.2.2 Deslizamiento

El voltaje inducido en las barras del rotor está en función de la velocidad del rotor y el campo magnético. El rotor gira a velocidad cercana a la velocidad de sincronismo, por lo tanto, el deslizamiento se define como la diferencia entre la velocidad de sincronismo de la máquina y la velocidad a la que gira el rotor [13]:

$$N_{desc} = N_{sinc} - N_m \quad (6)$$

N_{desc} = Velocidad de desplazamiento.

N_{sinc} = Velocidad de los campos magnéticos.

N_m = Velocidad mecánica.

Generalmente el deslizamiento se define en por unidad o en porcentaje según la velocidad de la máquina:

$$s = \frac{N_{desl}}{N_{sinc}} * 100\% \quad (7)$$

$$s = \left(\frac{(N_{desc} - N_m)}{N_{sinc}} \right) * 100\% = \left(\frac{(\omega_{desc} - \omega_m)}{\omega_{sinc}} \right) * 100\% \quad (8)$$

ω , En radianes por segundo

2.5.2.3 Velocidad mecánica

La velocidad mecánica puede ser expresada en función del deslizamiento:

$$N_m = (1 - s)N_{sinc} \quad (9)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (10)$$

2.5.2.4 Frecuencia eléctrica en rotor

La máquina de inducción también es denominada transformador rotatorio. Debido a que en el rotor se inducen frecuencias de deslizamiento. Cuando la frecuencia del rotor es cero, no se induce fuerza electromotriz en el rotor. Al bloquear el rotor, la frecuencia es idéntica al del estator. Para diferentes velocidades la frecuencia del rotor es proporcional a la diferencia de la velocidad del campo con la velocidad del rotor [13].

Frecuencia del rotor

$$F_r = s f_e \quad (11)$$

Al sustituir la ecuación (4) en la (6) se obtiene:

$$F_r = \frac{(n_{sinc} - n_m) f_e}{n_{sinc}} \quad (22)$$

Remplazando la ecuación de velocidad síncrona (1) en (10):

$$F_r = \frac{P}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad (13)$$

2.5.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

La máquina de inducción funciona con el mismo principio del transformador, esto quiere decir que se puede extraer el circuito equivalente haciendo un símil con el circuito equivalente del transformador. También se puede representar la máquina de inducción en sus partes constitutivas como son: rotor, estator y entrehierro en un circuito equivalente clásico que es similar al del transformador [15]. La constitución de la máquina de inducción se muestra en la figura 2.9. Esto permite evaluar y estudiar sus características para determinadas aplicaciones obteniendo el máximo potencial [15].

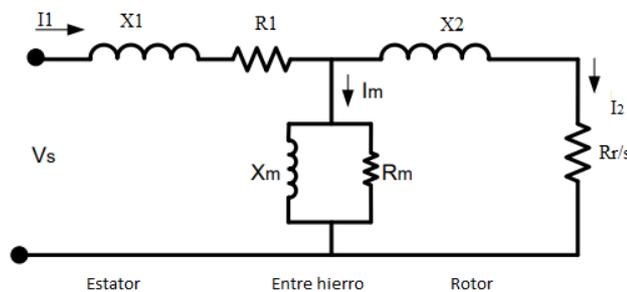


Figura 2.9 Circuito equivalente de la máquina inducción [15].

R_1 Resistencia del estator

X_1 Reactancia de dispersión del estator

X_m Reactancia de magnetización

R_m Pérdidas del núcleo

X_2 Reactancia del rotor

R_r Resistencia del rotor

A partir del circuito equivalente de la máquina se obtienen las ecuaciones de par y potencia, así como la corriente de fase del motor.

Corriente de fase del motor:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (14)$$

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{\frac{V_2}{s} + jX_2 V_2}} \quad (15)$$

Pérdidas del cobre del rotor:

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (16)$$

Pérdidas en el núcleo:

$$P_{nucl} = 3E_1^2 G_C \quad (17)$$

Potencia en el entrehierro:

$$P_{EH} = P_{entr} - P_{PCE} - P_{nucl} \quad (18)$$

$$P_{EH} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (19)$$

Pérdidas resistivas en el circuito del rotor:

$$P_{PCR} = 3I_R^2 R_R \quad (20)$$

Potencia mecánica:

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (21)$$

Las pérdidas en el cobre del rotor son igual a la potencia del entrehierro multiplicada por el deslizamiento

$$P_{PCR} = sP_{EH} \quad (22)$$

Potencia de salida

$$P_{sal} = P_{conv} - P_{FYR} - P_{misc} \quad (23)$$

P_{misc} Pérdidas adicionales

P_{FYR} Pérdidas de rozamiento y fricción

Par inducido

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{w_m} \quad (24)$$

2.5.3.1 Equivalente Thévenin

Para obtener la corriente del rotor es más factible calcular el circuito equivalente visto desde el estator. El teorema de Thévenin menciona que todo circuito lineal se puede desprender del sistema en dos terminales, representando en un circuito equivalente de una fuente de voltaje en serie con impedancia equivalente [15]. Al aplicar el teorema de Thévenin al circuito equivalente del motor de inducción se obtiene un circuito resultante, véase la figura 2.10



Figura 2.10 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción [15].

Voltaje de Thévenin:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \quad (25)$$

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (26)$$

Impedancia de Thévenin:

$$Z_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (27)$$

Si la reactancia de magnetización $X_m \gg x_1$ y $X_m \gg R_1$

$$V_{TH} \approx V_{\phi} \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (28)$$

Dado que $X_m \gg X_1$ y $X_m + X_1 \gg R_1$

La aproximación de la resistencia de Thévenin está dada por la siguiente ecuación.

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (29)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (30)$$

Corriente del rotor:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2} \quad (31)$$

Magnitud de I_2 :

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (32)$$

Potencia del entrehierro:

$$P_{EH} = \frac{3V_{TH}^2 * \frac{R_2}{s}}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (33)$$

Par inducido del rotor:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EH}}{w_{sinc}} \quad (34)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{w_{sinc} \left(\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)} \quad (35)$$

2.5.4 CALCULO DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

La determinación de los parámetros del modelo de la máquina de inducción permite tener un mejor control. Para obtener los parámetros de la máquina se realiza dos pruebas o ensayos: ensayo de vacío o rotor libre y ensayo de rotor bloqueado, análogos a las pruebas de un transformador. Por lo general, el circuito equivalente de la máquina de inducción está constituido por seis elementos, tres reactancias que significan el flujo disperso y magnetización, y tres resistencias que representan las pérdidas [12].

2.5.5 PRUEBA DE VACÍO

Consiste en hacer funcionar el motor sin carga mecánica en el eje (rotor libre), aplicando valores de tensión y frecuencia nominal [12].

De esta prueba se pueden obtener la potencia de vacío P_o y la corriente de vacío I_o , y, para determinar cada una de las pérdidas de la máquina es necesario realizar medidas

adicionales (medición de la resistencia del estator, pérdidas en el hierro, pérdidas de magnetización) [12].

La resistencia y reactancia de magnetización se calcula a través de:

$$S_o = \sqrt{3}V_o \cdot I_o \quad (36)$$

$$P_o = P_{Fe} + P_m + P_{cu1} \quad (37)$$

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} \quad (38)$$

$$R_m = \frac{V_o^2}{P_o} \quad ; \quad X_m \approx \frac{V_o^2}{P_o} \quad (39)$$

En la figura 2.11 se puede observar el circuito equivalente en vacío de la máquina de inducción.

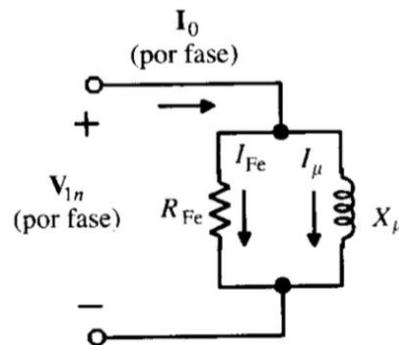


Figura 2.11 Circuito equivalente en vacío [12].

2.5.6 PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO

Este ensayo se realiza bloqueando el rotor impidiéndole que gire, es decir, con una velocidad mecánica en el eje igual a cero, por lo que se tendrá: $s = 1$, $R_c = 0$, indicando que el motor se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito. Al estator se le aplica una tensión creciente, partiendo de cero hasta que la corriente absorbida sea la asignada. De las medidas efectuadas puede obtenerse el factor de potencia en cortocircuito:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}} \quad (40)$$

Y de aquí se obtienen los valores:

$$R_{cc} = R_1 + R_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos\varphi_{cc} ; X_{cc} = X_1 + X_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \text{sen}\varphi_{cc} \quad (41)$$

En consecuencia, el ensayo de cortocircuito permite obtener los parámetros de la rama serie del motor (ver figura 2.12).

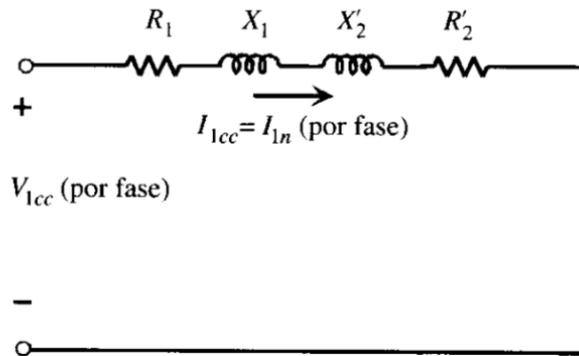


Figura 2.12 Circuito equivalente en cortocircuito [12].

2.6 REGULACIÓN DE VELOCIDAD AL MOTOR DE INDUCCIÓN

El motor asíncrono funciona mediante C.A. suministrando corriente al rotor por medio de inducción electromagnética. Esta clase de motores son utilizados a nivel industrial, principalmente los polifásicos debido a su robustez mecánica. La velocidad depende de la frecuencia de la tensión suministrada. Son generalmente utilizados a velocidad constante, pero en muchas aplicaciones se requiere que tengan varias velocidades. [17].

La operación del motor de inducción de la clase de diseño A, B y C está por debajo del 5% de deslizamiento. Dentro de este intervalo, la variación de la velocidad síncrona es correspondiente a la carga en el eje del motor [15, 17]. Al incrementar el deslizamiento, se afecta la eficiencia del motor, por el hecho de que las pérdidas en el cobre son proporcionales al deslizamiento del motor [17].

Para variar la velocidad del motor de inducción es necesario modificar la velocidad síncrona, debido a que esto cambia la velocidad de los campos magnéticos en el estator [17]. Para variar la frecuencia en el estator, se requiere convertidores electrónicos que modifique la frecuencia y la tensión de alimentación a la máquina, para que el flujo permanezca constante y no se sature [17]. A continuación, se describe la fuerza electromotriz en una máquina de inducción.

Fuerza electromotriz en las bobinas de la máquina AC:

$$E_1 = 4.44K_{wl}\Phi_m f_1 T_1 \quad (42)$$

K_{wl} Factor en devanado de estado f_1 Frecuencia del suministro de energía.

Φ_m Flujo de entrehierro máximo T_1 Numero de vueltas por fase en el estator

La fuerza electromotriz magnética (FEM) del inducido es aproximadamente igual al voltaje suministrado:

$$V_\phi = E_1 \quad (43)$$

V_ϕ Voltaje de fase

Flujo:

$$\Phi_m \approx \frac{V_\phi}{k_b f_1} \quad (44)$$

$$k_b = 4.44K_{wl}T_1 \quad (45)$$

El flujo aproximado a la tensión de alimentación y frecuencia:

$$\Phi_m \propto \frac{V_\phi}{f_1} \quad (46)$$

En la ecuación (46) se muestra la relación necesaria para mantener constante el flujo. Así como se varía la frecuencia en el estator también cambia la velocidad del motor. En consecuencia, es necesario cambiar el voltaje de alimentación para garantizar que el flujo se mantenga constante [17].

2.6.1 MÉTODOS DE CONTROL

El avance de la electrónica de potencia y la presencia de microcontroladores han permitido trabajar con control vectorial, mejorando la precisión y garantizando mayor robustez ante los cambios en la carga [18].

Las técnicas de control actuales están enfocadas en el suministro de energía a la máquina por medio de convertidores electrónicos de potencia, con la finalidad de controlar la frecuencia y el voltaje aplicado a las bobinas. La etapa de convertidor se constituye mediante dispositivos (interruptores) de electrónica de potencia y

microcontroladores encargados de realizar las acciones de control sobre estos interruptores [18].

Las técnicas de control se clasifican en:

2.6.1.1 Regulación por variación de número de polos

Esta técnica de control de velocidad se conoce desde 1897. Consiste en modificar el número de polos en el devanado del estator con un factor de 2:1 al modificar las conexiones de las bobinas [15].

Variando el número de polos del estator de la máquina, cambia la velocidad del campo giratorio y en consecuencia varía la velocidad de rotación del motor. El procedimiento utiliza diversos devanados en el estator dependiendo de las velocidades que se quieran obtener; generalmente, por limitación de espacio en las ranuras suelen emplearse dos combinaciones diferentes que dan lugar a dos velocidades en la máquina [12].

2.6.1.2 Regulación por variación de voltaje

El voltaje aplicado al motor de inducción es proporcional al par eléctrico. Si la característica par-velocidad de la carga es similar a la mostrada en la figura 2.13 es posible controlar la velocidad del motor dentro de un rango reducido [15]. Esta técnica es utilizada en motores de pequeña potencia, donde las pérdidas no son importantes.

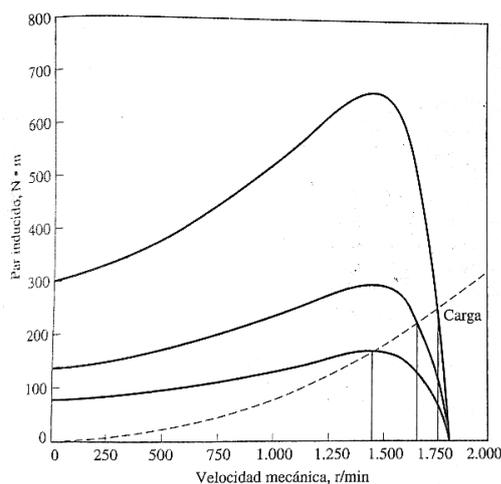


Figura 2.13 Control de velocidad mediante variación de voltaje de alimentación [15].

2.6.1.3 Control Voltaje-frecuencia (V/f)

La técnica voltaje/frecuencia constante, consiste en mantener el flujo del entre hierro constante en la zona de par fijo conservando la relación voltaje y frecuencia de excitación en el estator [17]. A partir del estado estable, el flujo en el entrehierro de la maquina se aproxima a la relación V/f , siendo V la amplitud de la tensión y f la frecuencia eléctrica síncrona alimentada al motor [20]. Se ilustra en la figura 2.14 los puntos base donde se desarrolla la excitación del motor por el vínculo donde se mantiene la relación voltaje-frecuencia constante [20, 21].

$$\Phi_{ag} = \frac{E_1}{f} \approx \frac{V_s}{f} \quad (47)$$

Para operación por debajo de la velocidad base, si la frecuencia se reduce a V_s , el flujo del entrehierro se satura. En cambio, si la frecuencia disminuye, el flujo en el entre hierro se incrementa, generando:

- Flujo excesivo de corriente
- Distorsión de la onda de flujo
- Aumento de pérdidas en el núcleo y pérdidas por cobre en estator.

Por lo tanto, la variación de voltaje en el estator tiene que ser proporcional al cambio de frecuencia.

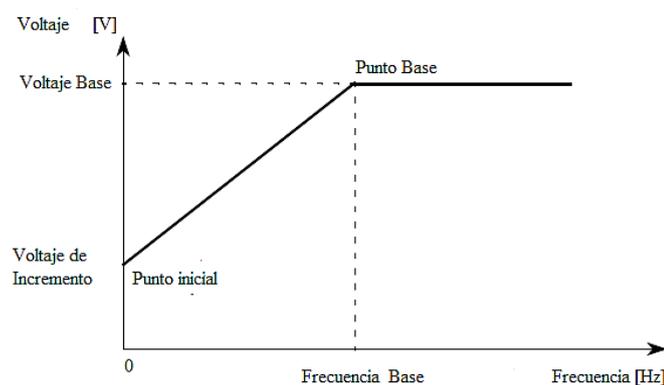


Figura 2.14 Control de Voltaje y frecuencia [21].

Si el motor trabaja para deslizamientos pequeños, el par producido por la máquina es proporcional a s , es decir, la curva par-velocidad en esta zona es lineal. En la figura 2.15 se muestran las curvas par-velocidad de un motor asíncrono cuando se

mantiene constante la relación V/f y en las que se aprecia que el valor del par máximo permanece inalterable para las diversas curvas y que la zona situada a la derecha del deslizamiento correspondiente al par máximo es prácticamente lineal.

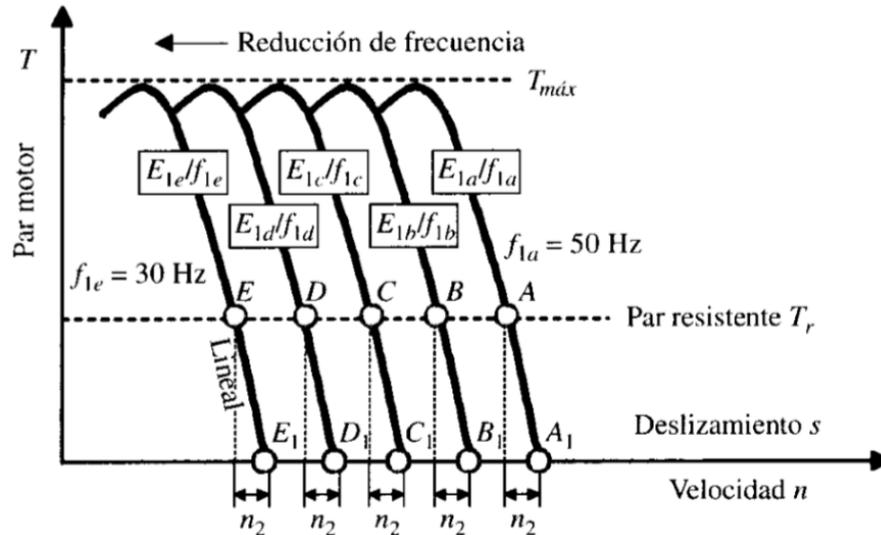


Figura 2.15 Curvas par-velocidad de un motor asíncrono para E_1/f_1 constante [12].

2.6.1.4 Ventajas

- Corriente de arranque reducida, alrededor del valor nominal.
- El punto de operación del motor es estable, además puede desarrollar sin inconvenientes entre el 5% de la velocidad síncrona y la velocidad base estableciendo el par constante dentro de esta región [20].
- El par nominal es constante en un extenso rango de operación, haciendo que el rango de variación de la velocidad del motor sea amplió, para que el usuario configure la velocidad según la carga [17, 20].

3 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN ACCIONADO A VELOCIDAD VARIABLE Y SISTEMA CONVENCIONAL

Para llegar a desarrollar la simulación del sistema de refrigeración se tuvo que determinar dos modelos matemáticos:

- Modelo del compresor.
- Modelo de la máquina de inducción.

Estos dos modelos son subsistemas que se pueden desarrollar de manera independiente, pero están directamente relacionados entre sí.

Para realizar el modelo matemático del compresor se utilizó la ecuación (1) y (2) que determina la tasa de flujo másico y la entrada de potencia necesaria para el compresor en base a los coeficientes $a_1 - a_6$ y $b_1 - b_6$ que fueron determinados de la tabla 3.1. Estos coeficientes son para un compresor de desplazamiento positivo de marca Mitsubishi.

Tabla 3.1 Coeficientes de correlación polinómica [30].

Constantes dependientes Compresor	MITSUBISHI
a1	-0,0005
a2	-0,3581
a3	-0,0095
a4	0,0443
a5	3,3256
a6	93,4180
b1	0,0610
b2	14,2260
b3	0,4006
b4	-0,1708
b5	-12,5140
b6	408,9100

Al aplicar la ecuación (1) se determina la tasa de flujo másico para distintas temperaturas de evaporación y condensación como se muestra en la tabla 3.2. Esta tabla contiene distintos valores para cada una de las temperaturas de evaporación y condensación determinadas, permitiendo obtener distintos valores de calor absorbido del ambiente. Esto quiere decir que al modificar la tasa de flujo másico se puede encontrar distintos valores de calor absorbido del ambiente y a su vez las correspondientes potencias de entrada necesarias para el compresor por medio de (2), permitiendo así un fácil diseño de un sistema de refrigeración según se requiera.

Tabla 3.2 Tasa de flujo másico del compresor Mitsubishi [Kg/s].

TASA DE FLUJO MÁSSICO [kg/s]			
Mitsubishi			
Te [°C]	Tc= 40°C	Tc= 50°C	Tc= 60°C
-10	0,01480	0,01395	0,01380
-9	0,01539	0,01451	0,01436
-8	0,01600	0,01509	0,01495
-7	0,01663	0,01570	0,01555
-6	0,01729	0,01633	0,01619
-5	0,01797	0,01699	0,01684
-4	0,01868	0,01767	0,01752
-3	0,01941	0,01838	0,01823
-2	0,02017	0,01911	0,01896
-1	0,02095	0,01986	0,01972
0	0,02176	0,02064	0,02050
1	0,02259	0,02145	0,02130
2	0,02344	0,02228	0,02213
3	0,02432	0,02313	0,02298
4	0,02523	0,02401	0,02386
5	0,02616	0,02491	0,02476
6	0,02711	0,02584	0,02569
7	0,02809	0,02679	0,02664
8	0,02909	0,02777	0,02762
9	0,03012	0,02877	0,02862
10	0,03117	0,02980	0,02965
11	0,03225	0,03085	0,03070
12	0,03335	0,03192	0,03177
13	0,03448	0,03302	0,03287
14	0,03563	0,03414	0,03400
15	0,03680	0,03529	0,03515

Para determinar el calor absorbido, calor rechazado, la potencia del compresor y el coeficiente de operación del sistema de refrigeración es necesario determinar las

temperaturas de evaporación y condensación del fluido con las que se va a trabajar para determinar los valores de presión, volumen específico, entalpia y entropía que se encuentran en [37].

Para este caso se determinó que la $T_e = -10^\circ\text{C}$ y $T_c = 40^\circ\text{C}$ para ser aplicadas a las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{q_{\text{absorbido}}}{(h_1 - h_4)} \quad (48)$$

$$q_{\text{rechazado}} = m * (h_3 - h_2) \quad (49)$$

$$P_{\text{compresor}} = (h_2 - h_1) \quad (50)$$

$$COP = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (51)$$

$q_{\text{absorbido}}$ Calor absorbido del ambiente a enfriar

m Tasa de flujo másico

h_1, h_2, h_3, h_4 Entalpias específicas del refrigerante según T_e y T_c

$q_{\text{rechazado}}$ Calor rechazado al ambiente

$P_{\text{compresor}}$ Potencia del compresor

COP Coeficiente de operación del sistema

Se a determinado que el calor absorbido por el sistema es de 2.017 [kW], el calor rechazado es de 2.421 [kW] y la potencia necesaria para el compresor es de 0.404 [kW], cumpliéndose con la ecuación de balance de energía que dice:

$$q_{\text{absorbido}} + q_{\text{rechazado}} + P_{\text{compresor}} = 0 \quad (52)$$

Además, se conoce que el coeficiente de operación (COP) es de $4.99 \approx 5$ para estas condiciones del sistema. Esto quiere decir que se logra 5 kW de potencia de refrigeración por cada kW de potencia consumida por el compresor.

3.2 DESARROLLO DEL MODELO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.

Luego de determinar los parámetros del sistema de refrigeración, se inicia el desarrollo de la simulación del modelo de la máquina de inducción a partir de los

parámetros del motor expuestos en la tabla 3.3; datos obtenidos de placa y de las pruebas de ensayo de rotor vacío y rotor bloqueado del motor de inducción. Estos datos se consideran como los valores base de la máquina de inducción y representan las condiciones de funcionamiento nominal.

Tabla 3.3 Características de la máquina de inducción.

Descripción	Valor	Unidad
Tensión	220V	V
Frecuencia	60 Hz	Hz
Numero de Polos	2	-
Resistencia del estator	6.9	Ω
Reactancia del estator	16.88	Ω
Reactancia de magnetización	253.29	Ω
Resistencia del rotor	4.65	Ω
Reactancia del rotor	6.14	Ω

Por medio del circuito equivalente se determina el voltaje de Thévenin, impedancia de Thévenin, corriente del rotor, el par inducido y la potencia en el eje de la máquina de inducción a través de las siguientes ecuaciones:

$$V_{th} = V_n * \left(\frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \right) \quad (53)$$

$$Z_{th} = \left(\frac{(jX_m) * (R_1 + jX_m)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \quad (54)$$

$$I_r = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (55)$$

$$t_{ind} = \frac{3 * \frac{R_2}{s}}{w_{sinc} \left(\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2 \right)} \quad (56)$$

$$R_{carga} = \frac{R_2}{s} \quad (57)$$

En donde:

V_{th} Voltaje de Thévenin

Z_{th} Impedancia de Thévenin

I_r Corriente de rotor

t_{ind} Par inducido

V_n Voltaje nominal

X_1	Reactancia del estator
X_2	Reactancia del rotor
R_1	Resistencia en el estator
R_2	Resistencia en el rotor
R_{th}	Resistencia de Thévenin
X_{th}	Reactancia de Thévenin
ω_{sinc}	Velocidad angular síncrona
s	Deslizamiento

3.2.1 RELACIÓN LINEAL ENTRE TENSIÓN Y FRECUENCIA APLICADA AL MOTOR.

Para poder realizar la regulación de velocidad mediante la técnica Voltaje/Frecuencia se determina el voltaje base que es el cociente del voltaje nominal de la máquina y la frecuencia nominal:

$$V_{base} = \frac{V_n}{f} \quad (58)$$

El nuevo voltaje de fase, la velocidad síncrona, velocidad mecánica y las reactancias de la máquina de inducción serán igual a:

$$V_{fase} = V_{base} * f_1 \quad (59)$$

$$N_{sync}' = 1800 * \left(\frac{f_1}{f}\right) \quad (60)$$

$$N_{mec}' = (1 - s) * N_{sync}' \quad (61)$$

$$X_1' = X_1 * \left(\frac{f_1}{f}\right) ; X_2' = X_2 * \left(\frac{f_1}{f}\right) ; X_m' = X_m * \left(\frac{f_1}{f}\right) \quad (62)$$

Esto muestra que se puede tener una amplia gama de parámetros de la máquina para cada una de las frecuencias, siempre y cuando se considere la variación de la frecuencia y tensión dentro de velocidades menores a los valores nominales.

3.3 SIMULACIÓN DEL CONTROL DE TENSIÓN-FRECUENCIA CONSTANTE EN MATLAB

Al aplicar las ecuaciones (58) a (62) dentro del algoritmo desarrollado en Matlab se obtienen las distintas curvas de velocidad mecánica vs par inducido, velocidad mecánica vs corriente de rotor y velocidad mecánica vs potencia en el eje para diferentes frecuencias.

En la figura 3.1 se puede observar cada una de las curvas de par eléctrico y las velocidades de sincronismo que puede desarrollar el motor según la relación tensión-frecuencia. Además, se observa que el par que produce la máquina a frecuencias muy inferiores a la frecuencia base disminuye notablemente en el punto de arranque, pero si la regulación se la realiza para valores de frecuencia más elevados y menores a la frecuencia base se obtiene un par de arranque mayor al par de arranque a frecuencia nominal. Además, se ha resaltado dos frecuencias ($F_{Hz} = 32$ y $F_{Hz} = 60$) que representan curvas de funcionamiento con características especiales para el sistema de refrigeración doméstico desarrollado en la sección 3.4.

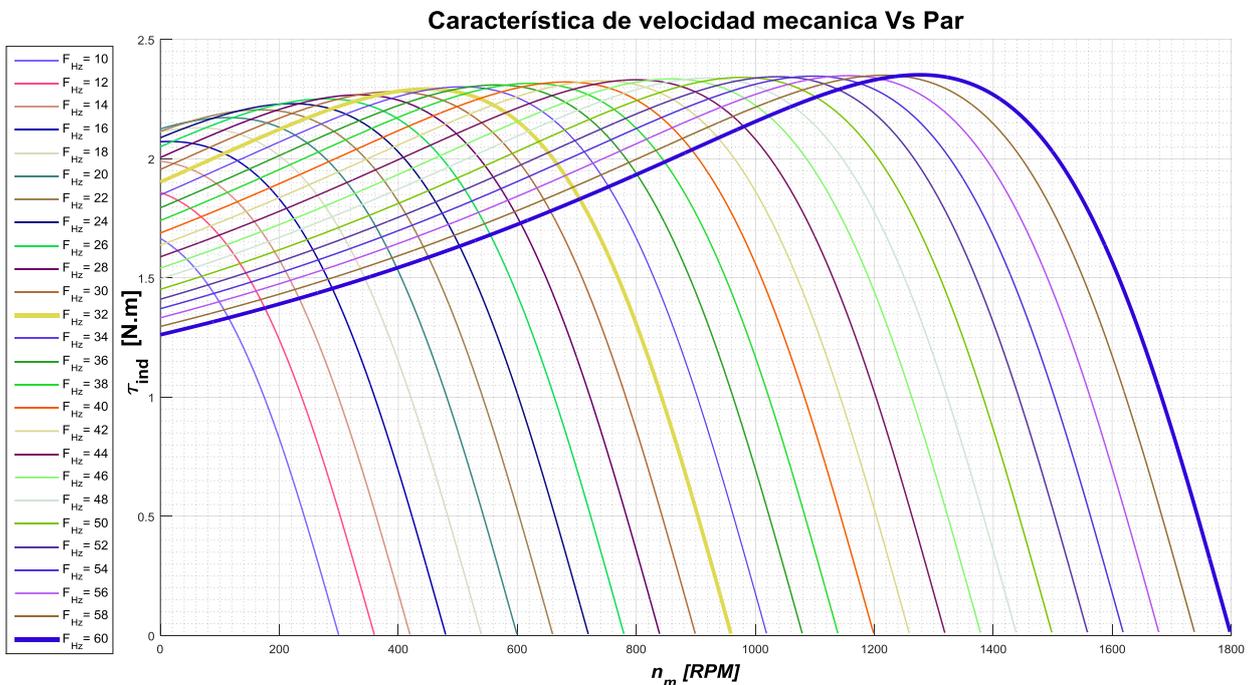


Figura 3.1 Velocidad mecánica vs par a diferentes frecuencias.

En la figura 3.2 se observa el comportamiento de la corriente del rotor en donde se observa que el mayor consumo de corriente se obtiene en el momento del arranque a frecuencia nominal. Esto demuestra que la máquina puede trabajar a velocidades reducidas, consumiendo menor corriente de la red eléctrica.

Además, si el sistema de refrigeración necesita alcanzar una temperatura cercana a la temperatura establecida como base, no necesita consumir la potencia nominal para llegar a dicho punto de funcionamiento, sino que puede funcionar a velocidades menores, consumiendo menor corriente y realizando el mismo trabajo; reduciendo el consumo y eliminando los picos de arranque del motor.

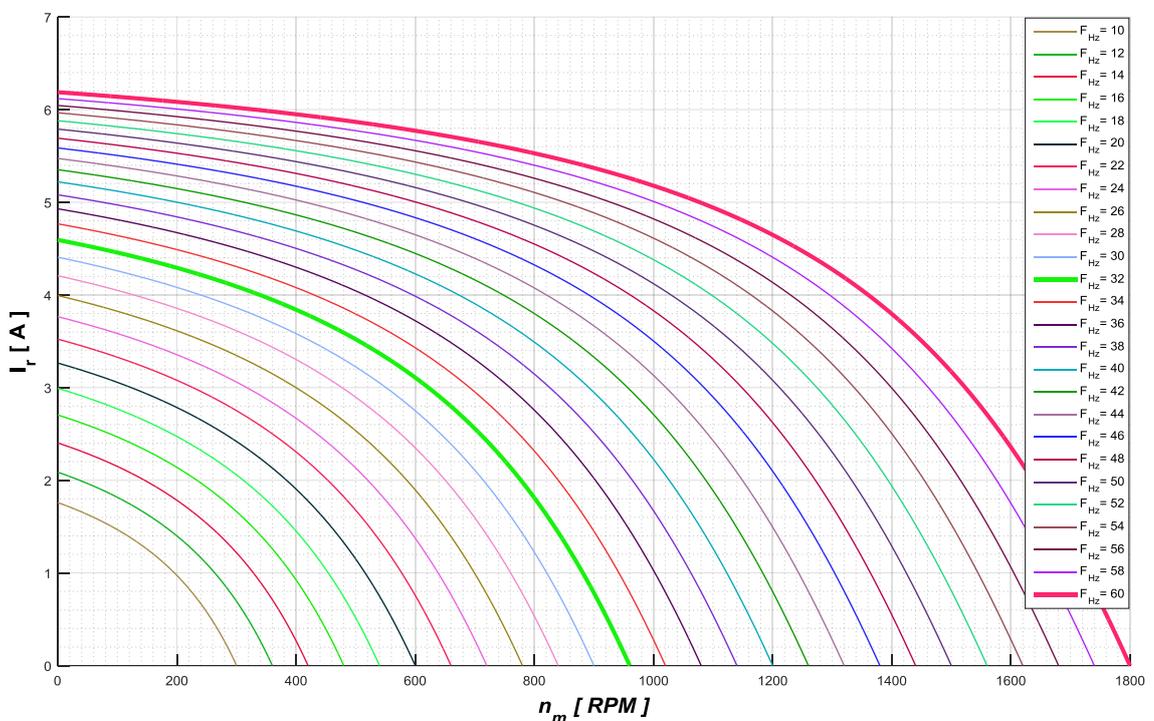


Figura 3.2 Velocidad mecánica vs corriente del rotor a distintas frecuencias.

En la figura 3.3 se presenta el comportamiento de la velocidad mecánica vs potencia en el eje a distintas frecuencias. El valor máximo de la potencia en el eje disminuye a frecuencias menores que la base. Esto permite a la máquina ajustarse a la potencia necesaria requerida para comprimir el refrigerante y elevar el nivel de presión a través

del evaporador ya que el nivel de calor absorbido depende del nivel de presión alcanzado en el evaporador.

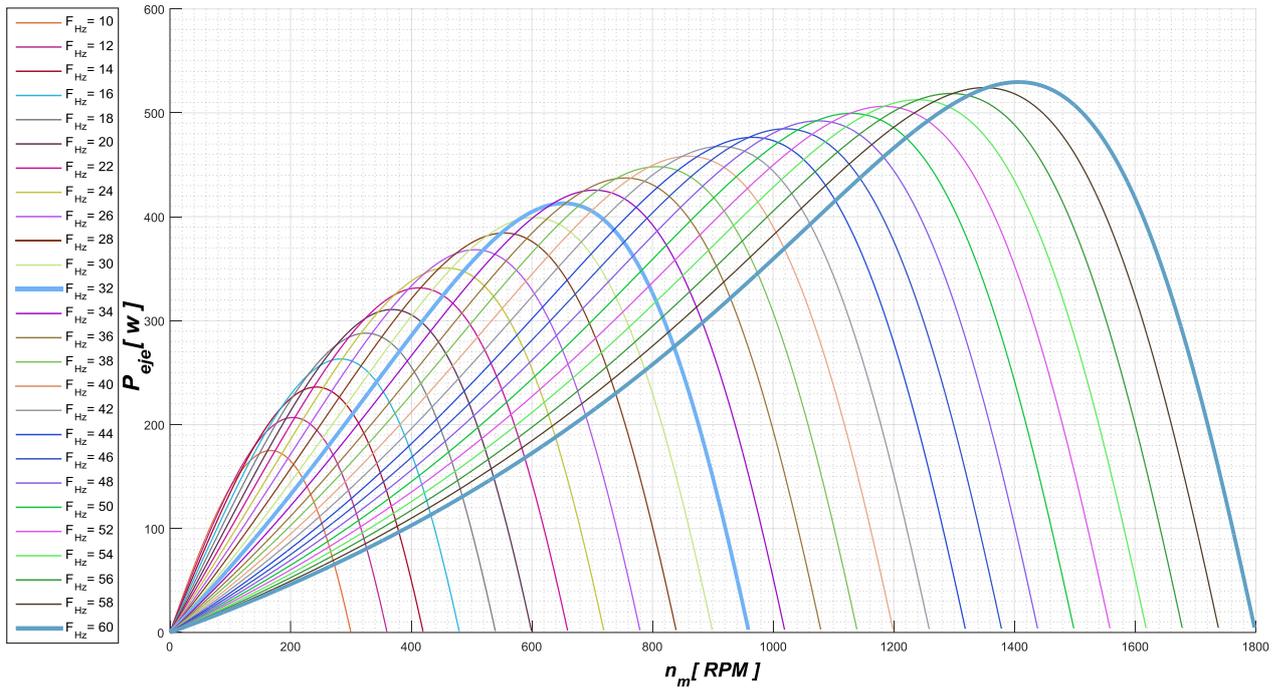


Figura 3.3 Velocidad mecánica vs potencia en el eje a diferente frecuencia.

Esto demuestra que la simulación de control de velocidad V/f desarrollada puede adaptarse a cualquier sistema de refrigeración siendo necesario únicamente ingresar los nuevos datos del motor de inducción que satisfaga la necesidad de par inicial y potencia necesaria para mover el compresor.

3.4 SIMULACIÓN DE CONTROL DE VELOCIDAD-FRECUENCIA PARA EL REFRIGERADOR DOMÉSTICO

Al aplicar las ecuaciones (48) a (51) se determinó que la potencia necesaria en el compresor para extraer 2.017 [Kw] de calor es de 404[W], potencia que se puede alcanzar desde una frecuencia de 32 Hz ya que para valores menores a 32Hz la potencia en el eje de la máquina será menor al valor de potencia necesaria en el compresor para extraer dicha cantidad de calor.

En la figura 3.4 se representan las posibles curvas de potencia en las cuales puede trabajar el sistema de refrigeración domestico en donde se muestran dos curvas limite.

La primera curva representa el límite mínimo de frecuencia para que el motor de inducción pueda extraer el calor necesario del sistema de refrigeración doméstico y la segunda curva representa el funcionamiento de la máquina a frecuencia nominal.

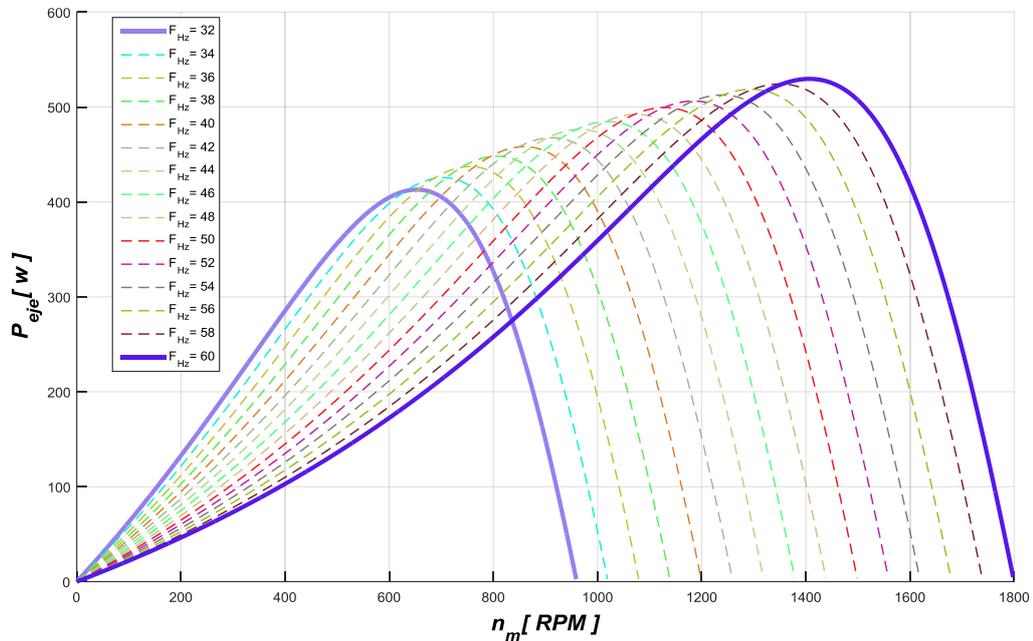


Figura 3.4 Velocidad mecánica vs potencia en el eje.

Como se puede apreciar, los valores de potencia en el eje desarrollados a velocidades menores a la velocidad mecánica nominal disminuyen según se realice el control escalar V/f , permitiendo al sistema adoptar diferentes puntos de operación según se requiera y por ende variar la potencia desarrollada en el eje del motor.

En la figura 3.5 se muestran las curvas de corriente que se producen al regular la velocidad del motor de inducción. Se indican únicamente las curvas de corriente en las cuales la potencia en el eje alcanza el valor necesario para comprimir el refrigerante. Además, se puede determinar que el mayor consumo de corriente al momento del arranque del motor se da cuando se trabaja a frecuencia nominal.

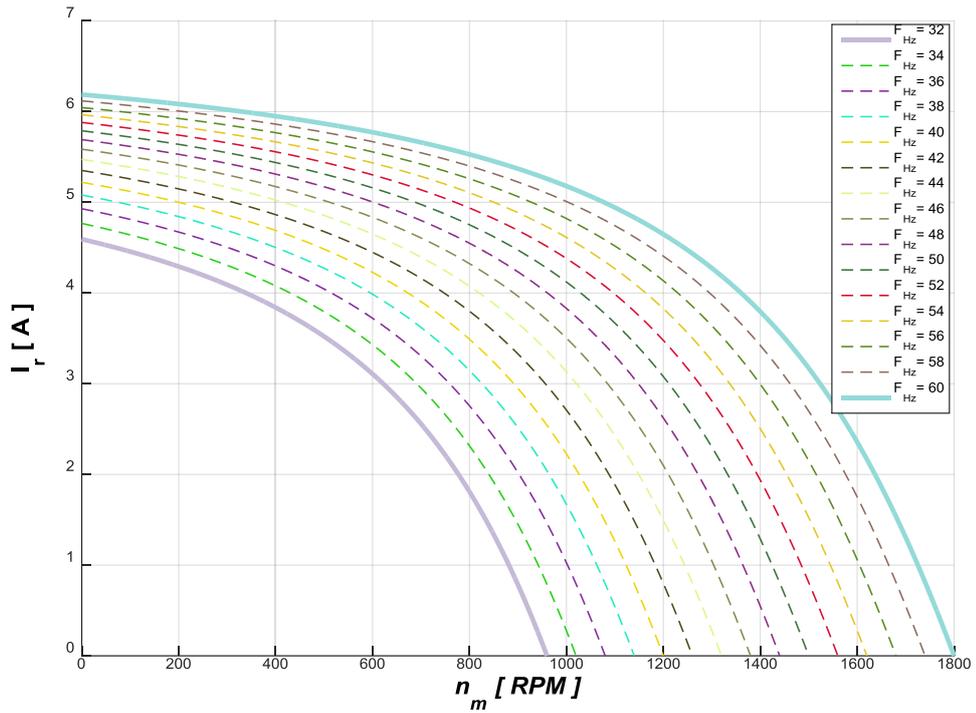


Figura 3.5 Velocidad mecánica vs potencia en el eje.

En la figura 3.6 se puede observar el comportamiento del par de la máquina en función de la velocidad mecánica desarrollada, de donde se constata que el valor de par máximo a frecuencia de 32Hz disminuye mínimamente con respecto al valor de par máximo de la máquina a frecuencia base al variar la velocidad mecánica.

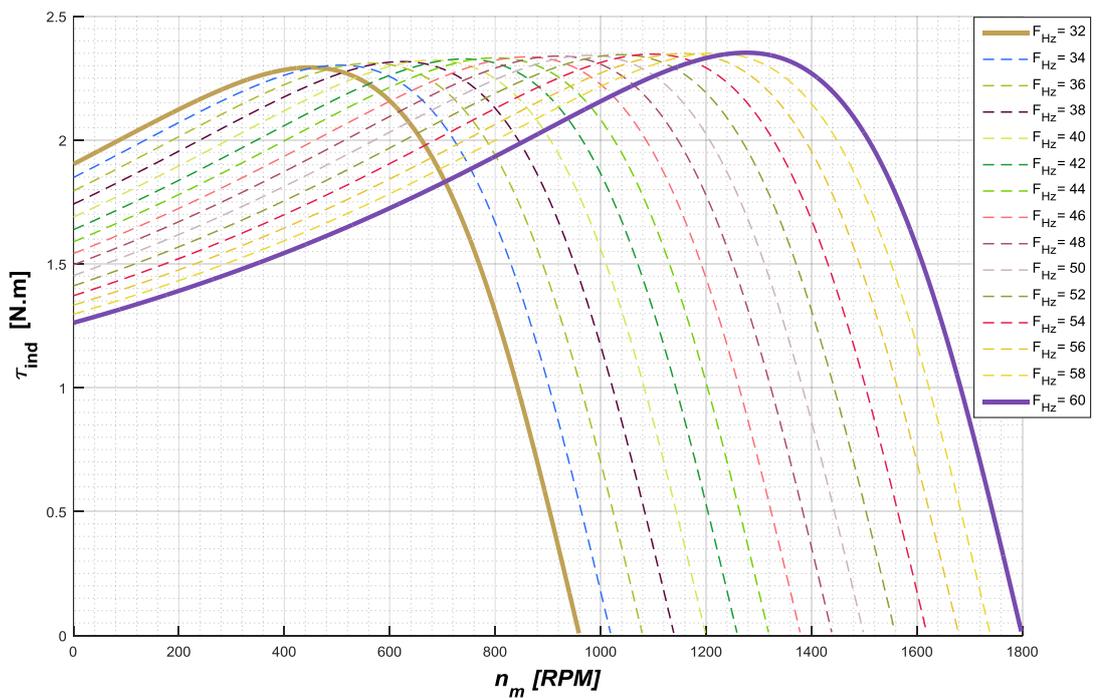


Figura 3.6 Velocidad mecánica vs par.

3.5 COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA TRADICIONAL VS CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Para comparar el sistema de refrigeración con accionamiento directo versus el sistema de refrigeración con regulación de velocidad es necesario mostrar el comportamiento de las potencias, corrientes y par desarrollados por la máquina de inducción para una condición de funcionamiento específica del sistema que fue establecida a través de la ecuación (50) en donde se establece que la cantidad de potencia en el eje del motor necesaria para poder extraer 2.017 [Kw] de calor es de 0.404 [Kw] .

En la figura 3.7 se muestra las dos curvas de potencia en el eje del motor en función de la velocidad mecánica de donde se puede diferenciar el consumo de potencia generado por estos dos accionamientos. Para la frecuencia base (60Hz), se obtiene una potencia máxima en el eje del motor de 0.529 [Kw] a 1402 [r.p.m], mientras que para la frecuencia de 32Hz se obtiene una potencia máxima en el eje de 0.412 [Kw] a 649 [r.p.m], demostrando que existe una diferencia de 0.116 [Kw] de potencia en el eje entre estas dos curvas y por ende una diferencia notable de consumo de potencia gracias a la implementación de regulación de velocidad en el sistema.

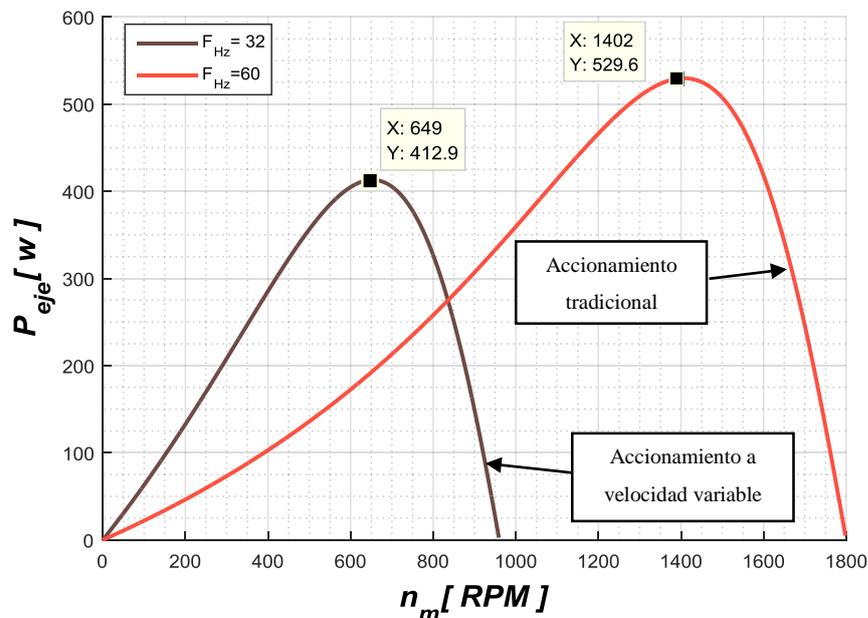


Figura 3.7 Control on/off vs control a velocidad variable (Velocidad mecánica vs potencia en el eje del motor).

Además, se puede apreciar que la potencia máxima en el eje desarrollada a una frecuencia de 32Hz se da a una velocidad mecánica menor a la mitad de la velocidad mecánica desarrollada a frecuencia base.

En la figura 3.8 se observa el comportamiento de las corrientes de rotor, de donde se deduce que la corriente de rotor al momento del arranque es mayor cuando el accionamiento se lo realiza de forma tradicional (on/off) en comparación con la magnitud de la corriente al ser accionado con el método de regulación de velocidad. Entonces, la disminución de consumo de corriente al momento del arranque es de 1.594[A] con respecto al accionamiento tradicional.

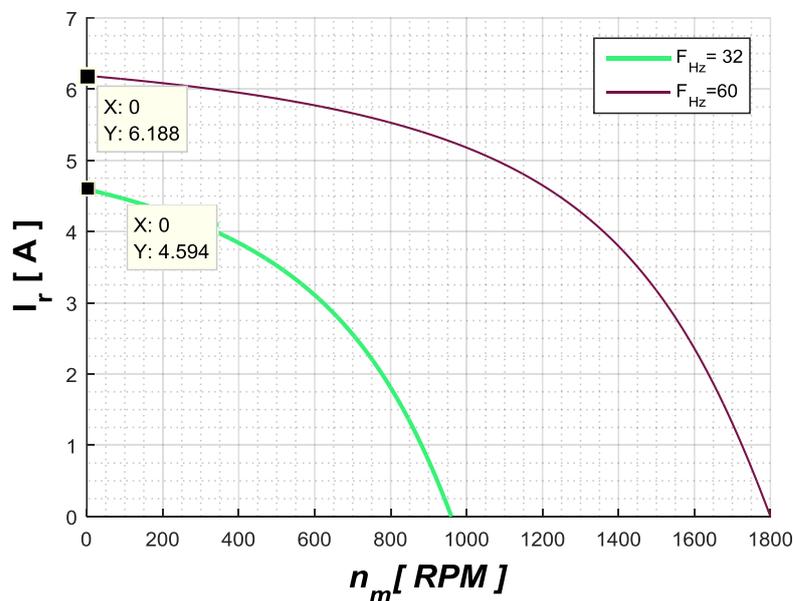


Figura 3.8 Control on/off vs control a velocidad variable (V/f).

A disminuir la magnitud de la corriente se esperaría que el par inicial también disminuyera, pero gracias al control tensión-frecuencia (V/f) se logra demostrar que el par inicial a 32Hz es mayor que el par inicial a frecuencia base y que el par máximo entre las dos curvas se mantiene relativamente constante como se puede observar en la figura 3.9. en donde se representa el par del motor de inducción con accionamiento a velocidad variable vs accionamiento tradicional. Aquí la máquina genera mayor par de arranque a menor frecuencia mientras que a frecuencia base se genera menor par de arranque; entonces si nos interesará obtener un alto par desde el arranque hasta la velocidad máxima se puede hacerlo variando la frecuencia de alimentación de la máquina.

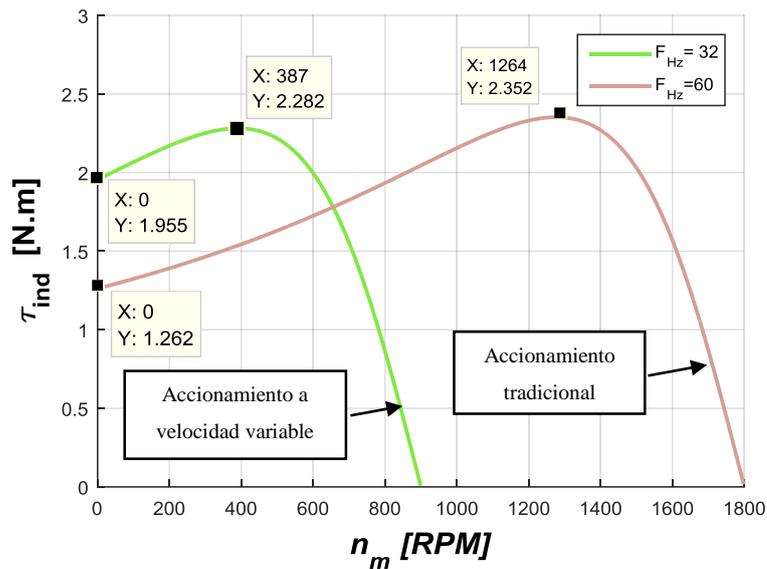


Figura 3.9 Control on/off vs control a velocidad variable (Velocidad mecánica Vs par inducido).

3.5.1 PROMEDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SISTEMA ACCIONADO A VELOCIDAD VARIABLE Y DEL SISTEMA CONVENCIONAL

En la tabla 3.4 se muestra el análisis del consumo energético de los dos tipos de accionamientos del sistema de refrigeración en donde se determina que el consumo de energía eléctrica es mayor en los sistemas con accionamiento directo a comparación de sistemas con regulación de velocidad.

La diferencia de consumo entre los dos tipos de control es de 0.125 KWh al día, es decir existe un ahorro económico de \$0.75 por día al usar el refrigerador 6 horas diarias y de \$22.50 por mes, valores que son reflejados en la factura de consumo energético; demostrando que la regulación de velocidad por medio de la técnica de control V/f es más eficiente no solo por las características de par-velocidad presentadas sino también en la facturación mensual de energía eléctrica. Además, esta diferencia se puede apreciar mayormente si en los hogares o industrias se estuviera utilizando más de un refrigerador.

Tabla 3.4 Comparación del consumo energético del sistema de refrigeración con los dos tipos de control.

Descripción	Unidad	Regulación de velocidad	Accionamiento ON/OFF
Potencia consumida	[KW]	0,404	0,529
Consumo diario	[horas]	6,00	6,00
Valor del KWh	[ctvs.]	9,33	9,33
Costo Energía por día	[\$]	0,23	0,30
Costo Energía por mes	[\$]	6,78	8,88

3.5.1.1 Análisis en el Sector Industrial

Los resultados obtenidos con la regulación de velocidad vs el accionamiento On/Off para un refrigerador doméstico muestran claramente que se logra un ahorro de energía eléctrica, más aún en el sector industrial en donde las fábricas cuentan con procesos en los cuales se puede regular la velocidad de las máquinas para obtener mejores resultados tanto en el consumo eléctrico como en la característica de par-velocidad que presentan. Esto quiere decir que las fabricas o industrias pueden realizar tareas de alta precisión a través del control de la velocidad del motor aun cuando la carga varíe.

Este método presenta las siguientes ventajas:

- Incremento en la vida útil del motor
- Ahorro de energía suministrada
- Incremento de eficiencia del proceso y de los elementos del sistema

La característica de este control a velocidad variable es que mantiene constante el par a diferentes velocidades haciendo que sea idóneo para varias aplicaciones, especialmente aquellas en las que el par de arranque es elevado (compresores).

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

De la tasa de flujo másico del refrigerante y del tipo del refrigerante a utilizar depende la cantidad de calor que se pueda extraer del ambiente refrigerado, ya que de la diferencia de entalpías de cada uno de los estados del sistema se encuentra el trabajo del compresor, evaporador y condensador respectivamente. Es decir que para extraer mayor cantidad de calor de un ambiente se necesita elevar el flujo másico del refrigerante en el sistema o incrementar la presión en el mismo; representando mayor potencia en el eje del motor que accionará el compresor y por ende mayor consumo eléctrico.

La evaluación del sistema accionado a velocidad variable simulado en Matlab requiere parámetros iniciales del motor como la resistencia, reactancia de la rama de magnetización, reactancia del estator y reactancia del rotor como también los datos típicos proporcionados en la placa del motor que permiten ingresar parámetros de cualquier motor de inducción para analizar su comportamiento y a su vez poder manejar distintas velocidades con tan solo variar la frecuencia.

La técnica de control escalar voltaje-frecuencia es utilizada por su simplicidad en comparación con el control de velocidad vectorial, además de incrementar la eficiencia en comparación con accionamientos directos; genera un amplio rango de puntos de operación de la máquina; permitiendo desarrollar un par que se adapta a la carga.

El accionamiento a velocidad variable aplicando la técnica de control voltaje-frecuencia en un compresor de refrigerador doméstico permite obtener reducción de consumo energético por parte del motor con respecto al control ON/OFF, ya que la potencia del eje del motor se acopla a la carga, que para este caso sería el compresor. Además, cuando se aplica el control tradicional el motor queda expuesto a picos altos de corriente de arranque, dejando sin control la característica par-velocidad. Esto hace que se desperdicie energía en ciertos intervalos de tiempo, mientras que el control V/f posee ventajas como: Arranque suave, aceleración y desaceleración suave generando disminución de consumo energético.

El modelo de regulación de voltaje / frecuencia no solo se lo puede aplicar para sistemas de refrigeración ya que posee un amplio campo de aplicación en donde el par de arranque y velocidad del motor son parámetros imprescindibles para el funcionamiento del sistema.

4.2 RECOMENDACIONES:

Hay que tener en cuenta cada uno de los estados del sistema de refrigeración para poder obtener mediante entalpías específicas de los procedimientos valores de calor absorbido, calor rechazado y potencia en el compresor que estén correctos, además de realizar el respectivo balance de energías del sistema.

Se recomienda reducir el voltaje de alimentación linealmente conforme disminuye la frecuencia para evitar saturación en el núcleo del motor de inducción y excesiva corriente de magnetización de la máquina.

La implementación de un sistema de refrigeración con el sistema de regulación de velocidad por medio de la técnica escalar V/f permitirá obtener ahorros energéticos representativos a niveles domésticos comerciales e industriales por lo que se recomienda tomar en consideración el diseño de estos sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Gelys. (2010). Sistema de refrigeración termodinámica aplicada. Available: <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/02/guia-tecnica-electiva1.pdf>
- [2] I. M. Morocho Cajamarca and B. A. Ruiz Jaramillo, "Instrumentación de un refrigerador doméstico para la toma de datos de presión y temperatura," 2016.
- [3] R. Koury, L. Machado, and K. Ismail, "Numerical simulation of a variable speed refrigeration system," *International journal of refrigeration*, vol. 24, no. 2, pp. 192-200, 2001.
- [4] S. K. Wang and S. K. Wang, *Handbook of air conditioning and refrigeration*. McGrawHill New York, 2000.
- [5] I. Dincer, *Refrigeration systems and applications*. John Wiley & Sons, 2017.
- [6] M. F. M. ENGINEERING. Difference between Hermetic, Semi-hermetic And Open Compressor Advantages and Disadvantages. Available: <https://www.mecholic.com/2016/07/difference-between-hermetic-semi-hermeticopen-compressor.html>
- [7] P. C. Hanlon, *Compressor handbook*. McGraw-Hill, 2001.
- [8] L. Molinaroli, C. M. Joppolo, and S. De Antonellis, "A semi-empirical model for hermetic rolling piston compressors," *International Journal of Refrigeration*, vol. 79, pp. 226-237, 2017.
- [9] M. Järvisalo, T. Ahonen, J. Ahola, A. Kosonen, and M. Niemelä, "Soft-sensor-based flow rate and specific energy estimation of industrial variable-speed-driven twin rotary screw compressor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 3282- 3289, 2016.
- [10] B. Li and A. G. Alleyne, "Optimal on-off control of an air conditioning and refrigeration system," in *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010, pp. 5892- 5897: IEEE.
- [11] B. Saleh and A. A. Aly, "Flow Control Methods in Refrigeration Systems: A," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 4, no. 1, 2015.
- [12] J. F. Mora, "Maquinas Eléctricas," 2012.
- [13] G. E. Harper, *Curso de transformadores y motores de inducción*. Editorial Limusa, 2000.

- [14] E. C. Quispe and L. F. Mantilla Peñalba, "Motores eléctricos de alta eficiencia," *Revista Energía y Computación*, vol. 12, no. 1, 2004.
- [15] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas* (5a. McGraw Hill México, 2012).
- [16] W. C. Whitman and W. M. Johnson, *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado*. Editorial Paraninfo, 2000.
- [17] M. M. Patel and A. K. Sharma, "MODELING & SIMULATION OF VOLT/Hz SPEED CONTROL FOR INDUCTION MOTOR USING DSPACE PLATFORM."
- [18] R. Arnanz, F. J. García, and L. J. Miguel, "Métodos de control de motores de inducción: síntesis de la situación actual," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 13, no. 4, pp. 381-392, 2016.
- [19] A. M. Trzynadlowski, *Control of induction motors*. Elsevier, 2000.
- [20] M. Aspolli, R. Asha, and P. Hunagund, "Three phase induction motor drive using IGBTs and constant v/f method," *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, vol. 1, no. 5, pp. 463-469, 2012.
- [21] B. Akin and N. Garg, "Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors," Texas Instruments Incorporated, Texas, 2013.
- [22] V. Kumar, S. S. Kumar, and K. Reddy, "Implementation of Scalar Control Technique in SVPWM Switched Three-Level Inverter Fed Induction Motor Using DSP Controller," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, no. 2, p. 83, 2011.
- [23] A. M. Gajare and N. R. Bhasme, "A review on speed control techniques of single phase induction motor," *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 5, pp. 33-39, 2012.
- [24] M. Popescu, *Induction motor modelling for vector control purposes*. Helsinki University of Technology, 2000.
- [25] J. M. Aller, "Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general," Editorial Equinoccio, 2006.
- [26] J. Belman-Flores, J. Barroso-Maldonado, A. Rodríguez-Muñoz, and G. CamachoVázquez, "Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 955- 968, 2015.

- [27] B. Bolaji, "Experimental study of R152a and R32 to replace R134a in a domestic refrigerator," *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3793-3798, 2010.
- [28] M.Kaliamoorthy, Induction Motor – Scalar Control, disponible en: <http://kaliasgoldmedal.yolasite.com/resources/SSD/Induction%20Motor%20-%20Scalar%20Control.ppt> [2019, 3 de enero].
- [29] BOSE, Bimal K., et al. *Modern power electronics and AC drives*. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 2002.
- [30] SHAO, Shuangquan, et al. Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data. *International journal of refrigeration*, 2004, vol. 27, no 8, p. 805-815.
- [31] Giz, Sistemas de Refrigeración Tutorial para el trabajo en campo, Disponible en: https://energypedia.info/images/2/27/GIZ_Tutorial_Refrigeración_2015.pdf
- [32] D. H. Robinson, P. J. Beaty, Compressor types, classifications, and applications, *Proceedings of the twenty-first turbomachinery symposium*, 2001, p. 184-185.
- [33] M. L. Ruz, S. Fragoso, F. Vázquez, J. Garrido, D. Rodríguez, Planta experimental para supervisión y control del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, *Jornadas de Automática*, 2016.
- [34] PEDIAPRESS, Sistema de Refrigeración por compresión, 2016, Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>
- [35] C. K. Rice, W. L. Jackson, Purez -- the mark v ornl heat pump design model for chlorine-free, pure and near-azeotropic refrigerant alternatives, Oak Ridge National Laboratory, 1994.
- [36] J. L. Guinudinik, Motores asincrónicos, 2015
- [37] DuPont Fluorochemicals, Thermodynamic Properties of HFC-134a, 2004

APÉNDICES

APÉNDICE A: ALGORITMO IMPLEMENTADO EN MATLAB

```
%%*****Simulación del control voltaje-
frecuencia*****
clear all
clc
%----- Ingrese parámetros del motor de Inducción-----
%-----
p=2;
f=60; %Frecuencia base
f1=10:2:60; %Variación de frecuencia
%----- Inicialización de parámetros del motor de lhp--
%-----%
vn=220/sqrt(3); %tension nominal
x1 = 16.88; % Reactancia del estator
x2 = 6.14; % Reactancia del rotor
xm = 253.29; % Reatancia de magnetizacion
r1 = 6.9; % Resistencia del estator
r2 = 4.65; % Resistencia del rotor

vbase=(vn/f); %Tension base
for n=1:length(f1)
v_phase1(n) = f1(n)*vbase;%Variación de la tensión de acuerdo a la
disminución de frecuencia
n_sync(n) = 1800*(f1(n)/f);
w_sync(n)= n_sync(n)*2*pi/f;% velocidad sincrona
end

%----- velocidad mecanica y deslizamiento -----
%-----%
s = (1:-0.001:0) ; % Deslizamiento
for k1=1:length(f1)
for k=1:length(s)
nm(k,k1)= (1 - s(k)) * n_sync(k1); % Velocidad mecanica
end
end

%----- Reactancias a diferentes frecuencias [Hz]-----
%-----
for nn=1:length(f1)
x11(nn)= x1*(f1(nn)/f);
x21(nn,n)=x2*(f1(nn)/f);
xm1(nn)=xm*(f1(nn)/f);
end

%----- Resistencia de Carga%-----
r_carga=r2./s;

%----- V y Z THEVENIN a diferentes frecuencias -----
%-----
v_th1 = v_phase1.*(xm1./sqrt(r1^2+(x11+xm1).^2));
z_th1 = ((j*xm1).*(r1 + j*x11))./(r1 + j*(x11+xm1));
r_th1 = real(z_th1);
x_th1 = imag(z_th1);
```

```

for d=1:length(f1)
for dd=1:length(s)
ir_1(d,dd)=v_th1(d)/sqrt((r_th1(d)+r_carga(dd))^2+(x_th1(d)+x21(d))^2);
end
end

%----- Calculo del par a distintas Frecuencia -----
-----
for k1=1:length(f1)
for ii = 1:length(s)
t_ind1(k1,ii) = v_th1(k1)^2 * (r2/s(ii)) / (w_sync(k1)* (( +
r2/s(ii))^2 + (x_th1(k1) + x21(k1))^2));
p_ejel1(k1,ii)=t_ind1(k1,ii)*nm(ii);
end
end

%----- graficos de Velocidad mecanica Vs Par -----
-----
figure(1)
hold on;
grid on;
grid minor;

for kd=1:length(f1)
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,kd))];
plot(nm(:,kd), t_ind1(kd,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 1.2,
'color', rand(1,3) );
xlabel('\bf\itn_{m}
[RPM]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bf\tau_{ind }
[N.m]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfCaracterística de velocidad mecanica Vs
Par', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
end
legend show

%----- Grafico de velocidad mecanica Vs Corriente de
Rotor -----
figure(2)
hold on;
grid on;
grid minor;
for k3=1:(length(f1))

txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,k3))];
plot(nm(:,k3), ir_1(k3,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 2, 'color', rand(1,3))
xlabel('\bf\itn_{m} [ RPM
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bfI_{r} [ A
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfCaracterística de velocidad mecánica Vs Corriente de
Rotor', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
end
legend show

%% velocidad sincrona Vs potencia del eje

```

```

figure(3)
hold on;
grid on;
grid minor;
for k4=1:length(f1)
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,k4))];
plot(nm(:,k4), p_eje1(k4,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 1, 'color', r
and(1,3))
xlabel('\bf\itn_{m} [ RPM
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bf\itP_{eje} [ w
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfVelocidad mecánica Vs Potencia en el
eje', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
end
legend show

%----- Sistema de refrigeracion domestico (404 w)%-----
-----

figure(5)
hold on;
grid on;
grid minor;
L=12; %numero de frecuencias a graficar
for kd=L:length(f1)

txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,kd))];
plot(nm(:,kd), t_ind1(kd,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 1,
'color', rand(1,3) );
xlabel('\bf\itn_{m}
[RPM]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bf\tau_{ind }
[N.m]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfCaracterística de velocidad mecanica Vs
Par', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
end
axis auto
legend show

figure(6)
hold on;
grid on;
grid minor;
for k3=L:length(f1)
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,k3))];
plot(nm(:,k3), ir_1(k3,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 2, 'color', ran
d(1,3))
xlabel('\bf\itn_{m} [ RPM
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bfI_{r} [ A
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfCaracterística de velocidad mecánica Vs Corriente de
Rotor', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
end
axis auto
legend show

figure(7)
hold on;

```

```

grid on;
grid minor;
for k4=L:length(f1)
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,k4))];
plot(nm(:,k4), p_eje1(k4,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 2, 'color', r
and(1,3))
xlabel('\bf\itn_{m}[ RPM
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bf\itP_{eje}[ w
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfVelocidad mecánica Vs Potencia en el
eje', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
end
legend show

```

```

figure(8)
hold on;
grid on;
grid minor;
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,L))];
plot(nm(:,L-1), t_ind1(L-1,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 1.9,
'color', rand(1,3) );
plot(nm(:,end), t_ind1(end,:), 'DisplayName', 'F_{Hz}=60', 'LineWidth', 1
.9, 'color', rand(1,3) );
xlabel('\bf\itn_{m}
[RPM]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bf\tau_{ind }
[N.m]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfCaracterística de velocidad mecanica Vs
Par', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
axis([0 1800 0 3])
legend show

```

```

figure(9)
hold on;
grid on;
grid minor;
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,L))];
plot(nm(:,L), p_eje1(L,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 2, 'color', ran
d(1,3))
plot(nm(:,end), p_eje1(end,:), 'DisplayName', 'F_{Hz}=60', 'LineWidth', 2
, 'color', rand(1,3))
xlabel('\bf\itn_{m}[ RPM
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
ylabel('\bf\itP_{eje}[ w
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
title ('\bfVelocidad mecánica Vs Potencia en el
eje', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
legend show

```

```

figure(10)
hold on;
grid on;
grid minor;
txt = ['F_{Hz}= ', num2str(f1(:,L))];
plot(nm(:,L), ir_1(L,:), 'DisplayName', txt, 'LineWidth', 2, 'color', rand(
1,3))
plot(nm(:,end), ir_1(end,:), 'DisplayName', 'F_{Hz}=60', 'LineWidth', 1, '
color', rand(1,3))
xlabel('\bf\itn_{m}[ RPM
]', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');

```

```
ylabel('\bfI_{r} [ A  
'], 'FontSize',16, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');  
title ('\bfVelocidad mecánica Vs Potencia en el  
eje', 'FontSize',20, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');  
legend show
```

