



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Eduardo Antonio Larenas León

Simulación y Ensayos del VDF SD 700 Accionando un Motor con Diferentes Tipos de Cargas

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



Simulación y Ensayos del VDF SD 700 Accionando un Motor con Diferentes Tipos de Cargas

Eduardo Antonio Larenas León

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

conformada por

Sr. Rene Sanhueza Robles

Profesor Guía

Sr. Domingo Ruíz Caballero

Segundo Revisor

Sr. Sebastian Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 04 de julio de 2017

Resumen

Hoy día la escuela de ingeniería eléctrica, cuenta con un nuevo variador de frecuencia, donado por la empresa AVI S.A, este es el variador de frecuencia SD 700, el cual es utilizado en las diferentes industrias del mundo. Este fue ubicado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la escuela de ingeniería eléctrica para ser utilizado por los estudiantes para el desarrollo de sus conocimientos teóricos-prácticos.

Siendo un dispositivo nuevo en la escuela de ingeniería eléctrica el variador de frecuencia SD 700, es necesario conocer su comportamiento y dejar un registro del mismo para su estudio, por lo que el presente informe de tesis, está dirigido al conocimiento del comportamiento del variador de frecuencia SD 700 bajo diferentes cargas, estudiar y analizar el circuito del VDF, aprender su funcionamiento y registrar y analizar los resultados que se obtengan mediante ensayos y simulaciones.

En esta investigación se presentarán los distintos ensayos y simulaciones realizados con el accionamiento de un motor de 30 HP con carga de tipo lineal, constante y cuadrática, los cuales revelarán distintos resultados y conclusiones.

Palabras claves: motor, variador de frecuencia, cargas, torque, VDF SD700

Abstract

Today the school of electrical engineering, has a new frequency inverter, donated by the company AVI S.A, this is the frequency inverter SD 700, which is used in different industries in the world. This was located in the electrical machinery laboratory of the electrical engineering school to be used by students to develop their theoretical-practical knowledge.

Being a new device in the school of electrical engineering the frequency inverter SD 700, it is necessary to know its behavior and to leave a record of it for its study, reason why this thesis report, is directed to the knowledge of the behavior of the inverter of Frequency SD 700 under different loads, study and analyze the VDF circuit, learn its operation and record and analyze the results that are obtained through tests and simulations.

In this research the different tests and simulations will be presented with the operation of a 30 HP motor with load of linear, constant and quadratic type, which will reveal different results and conclusions.

Key words: motor, frequency inverter, loads.

Índice general

Introducción.....	1
Planteamiento del problema	2
Objetivos.....	2
Objetivos Generales	2
Objetivos Específicos	3
Justificación.....	3
1 Motor de Inducción	4
1.1 Introducción al Motor de Inducción.....	4
1.2 Características Principales del Motor de Inducción	5
1.2.1 Deslizamiento	5
1.2.2 Factor de Potencia.....	7
1.2.3 Corriente de Arranque	8
1.2.4 Momento de Inercia.....	8
1.2.5 Par de Arranque y Par Máximo.....	8
1.2.6 Rendimiento	9
1.3 Circuito Equivalente	10
1.4 Tipos de Torques de Carga.....	11
1.4.1 Conceptos Básicos de los Torques de Carga	11
1.4.2 Clasificación de las Cargas según el Tipo de Torques	11
1.5 Fundamentos de Control de Velocidad de Motores de Inducción	15
2 Variador de Frecuencia	16
2.1 Qué es un Variador de Frecuencia.....	16
2.2 Motivos para Emplear Variadores de Frecuencia	16
2.3 Velocidad como una Forma de Controlar un Proceso.....	17
2.4 Fomentar el Ahorro de Energía Mediante el uso de Variadores de Velocidad	17
2.5 Tipos de Control Asociados a un Variador de Frecuencia	17
2.5.1 Control Escalar	17
2.5.1.1 Control de velocidad a través de la relación Tensión/Frecuencia	18
2.5.2 Control Vectorial	19
2.5.2.1 Control Directo	20

2.5.2.2 Control Indirecto	21
3 Variador de Frecuencia SD 700	23
3.1 Características del Variador de Frecuencia SD 700	23
3.1.1 Características Básicas del Variador de Frecuencia SD 700	23
3.1.2 Características Físicas del Variador de Frecuencia SD 700.....	25
3.1.3 Características Topológicas del Variador de Frecuencia SD 700	27
3.2 Ensayo Experimental del Variador de Frecuencia SD 700 con un Motor de 30 Hp	29
3.3 Simulación del Variador de Frecuencia SD 700 con un Motor de 30 Hp	31
3.3.1 Análisis de la Simulación	31
3.3.2 Resultados de la Simulación del VDF SD 700 con un Motor de 30Hp	36
3.3.3 Comparación entre Ensayos y Simulaciones del Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30 Hp	38
3.4 Simulaciones del Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30 Hp con un Torque Constante	46
3.4.1 Resumen de la Simulaciones con 20 Nm	47
3.5 Simulaciones de Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30 Hp con un Torque Cuadrático	51
3.5.1 Resumen de las Simulaciones con Torques Cuadráticos	51
3.5.2 Ahorro de Energía.....	56
4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700	57
4.1 Configuración y uso del Variador de Frecuencia SD700	57
4.2 Mediciones del Comportamiento del Motor a Diferentes Cargas.....	61
4.3 Medición del Ensayo en Vacío del Motor	65
4.4 Medición Ensayo de Rotor Bloqueado.....	68
4.5 Medición con Diferentes Cargas Resistivas.....	70
4.6 Medición de Regeneración	74
4.7 Ejemplo para mediciones futuras.....	79
4.7.1 Cargas Resistivas a 40 Hz	80
4.7.2 Carga Resistiva fija y variando la frecuencia entre 10 y 50 Hz.....	83
Discusión y conclusiones.....	86
Bibliografía	89

Introducción

A lo largo de los años el hombre ha ido creando muchas máquinas para realizar un mismo trabajo con el fin de satisfacer las necesidades que se le han presentado, éstas a pesar de cumplir una misma tarea se han diferenciado por tener mecanismos de accionamiento distintos, así como también funciones diferentes. Lo que ha hecho que cada empresa pueda crear máquinas dentro de una competencia sana. En materia eléctrica y electrónica los avances tecnológicos han hecho que las máquinas cada día tengan más funciones y facilidades para manejarlas, pero para ponerlas en marcha y sacar la mayor productividad de las mismas, es necesario conocer completamente el funcionamiento interno y externo.

Una de las máquinas eléctricas más utilizada en la industria moderna son los motores, especialmente los eléctricos, debido a sus buenas características de rendimiento y a su baja contaminación, aspecto que se tiene muy en cuenta en nuestros días. Estos podemos encontrarlos en todo tipo de industria y dentro de máquinas más complejas como por ejemplo lo son cintas transportadoras, bombas, ascensores, ventiladores, entre otros. Además, para obtener la máxima productividad y un importante ahorro energético estos motores suelen trabajar a velocidades variables controladas.

Sin embargo, el control de velocidad de los motores se puede realizar de diversas maneras, cambiando el número de polos, el voltaje o la frecuencia de alimentación. El método que mayor aceptación ha tenido es una combinación de los dos últimos, debido al mayor rango de controlabilidad, tanto en torque como en velocidad. Por otra parte, si bien el control de velocidad, torque o posición de los motores de inducción es más complejo que el de los motores de corriente continua, la electrónica de potencia ha ayudado a solucionar estos problemas y ha posicionado a este motor como el de menor precio y mayor robustez, sumándole su casi nulo mantenimiento.

Actualmente, el control de velocidad se puede realizar a través de diferentes variadores de velocidad, la presente investigación se enfoca en el variador de frecuencia SD 700, el cual permite variar la velocidad y voltaje de un motor eléctrico asíncrono trifásico, por medio de la regulación de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Este es el método más eficiente en el manejo de la velocidad en procesos industriales y permite el ahorro energético. A continuación, se expone la investigación “Análisis y Ensayos del Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor con Diferentes Cargas”, la cual contiene la descripción de un motor de inducción, el estudio de los variadores de frecuencia y la descripción del variador de frecuencia SD 700; así

como también, el ensayo y simulación del variador de frecuencia SD 700 accionando un motor de 30HP.

Planteamiento del problema

El hombre para desarrollar sus habilidades ha ido realizando estudios, análisis, simulaciones y ensayos, sobre diferentes situaciones con el fin de obtener conocimientos que utiliza para crear, modificar o reparar nuevas cosas. En el campo de la electricidad y la electrónica es importante lo expuesto anteriormente, para así poder avanzar en las mejoras de los diferentes dispositivos con los que se cuenta, el conocer el comportamiento de los mismo, es clave también para su reparación y aplicación en el campo laboral.

El día martes 22 de Diciembre de 2015, la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso recibió una importante donación de la empresa AVI S.A, entre los cuales está el Variador de Frecuencia SD 700 de “Power Electronics”, que es utilizado en las diferentes ramas industriales, como por ejemplo en la minería, destacándose en la empresa “Codelco división Andina” de Los Andes.

El variador fue ubicado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, donde se realizan diferentes experimentos para los cuales es necesario tener referencias y parámetros sobre el comportamiento de las máquinas en distintas situaciones. Estos ensayos son guiados con los datos recopilados en investigaciones realizadas con anterioridad, con el fin de que los alumnos aprendan, conozcan y comparen el conocimiento teórico con las pruebas prácticas que realicen en el laboratorio.

Tomando en cuenta lo anterior, el Variador SD 700 es un equipo nuevo en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y solo se cuenta con el manual de “Software y programación” y el de “Hardware e Instalación”, por lo que se crea la necesidad de realizar una investigación para recopilar información y nuevos datos sobre la puesta en marcha y el funcionamiento del mismo bajo diferentes cargas.

Objetivos

Objetivos Generales

- Estudiar el comportamiento del Variador de frecuencia SD 700 bajo diferentes cargas

Objetivos Específicos

- Estudiar y analizar el circuito del VDF
- Aprender el funcionamiento del VDF en cuestión accionando un motor con diferentes tipos de cargas.
- Registrar curvas y análisis de resultados
- Análisis mediante simulación para realizar una comparación con los ensayos
- Crear un protocolo de ensayos.

Justificación

Con el paso de los años la tecnología avanza rápidamente, exigiendo que los institutos de estudios se actualicen en las áreas prácticas para así dar las herramientas necesarias a los estudiantes y egresar profesionales de primera calidad. Por lo que los laboratorios de estudios son de gran importancia, ya que en ellos los alumnos amplían y llevan a la práctica los conocimientos teóricos obtenidos a lo largo de las carreras.

De igual forma, la competitividad en el área técnica se hace más marcada a medida que avanza la tecnología de los controles y los procedimientos, por lo cual se debe crear el camino para que los estudiantes de las carreras Ingeniería Civil Eléctrica e Ingeniería Eléctrica obtengan el conocimiento teórico y práctico suficiente como para competir en el área de desempeño y así adaptarse más cómodamente a los sistemas reales aplicados a las empresas que buscan mejoras tecnológicas de forma continua.

La Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, cuenta con un laboratorio de máquinas, en el cual los alumnos aprenden y desarrollan sus conocimientos teóricos-prácticos, por medio de la ejecución de pruebas. Estas son guiadas y se basan en investigaciones realizadas por los mismos alumnos de la universidad, donde exponen el comportamiento de las diferentes máquinas y dispositivos electrónicos.

De lo anterior, se denota la importancia de realizar investigaciones que ayuden en el conocimiento de las máquinas y dispositivos, que existen en el laboratorio de máquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. La cual cuenta con una nueva dotación, entre ellos está el variador SD 700, del que no se tienen antecedentes de estudios ni experimentos sobre el comportamiento del mismo.

La presente investigación tiene como fin estudiar el comportamiento del variador de frecuencia SD 700 bajo diferentes cargas; estudiar y analizar el circuito del VDF; aprender el funcionamiento del VDF en cuestión y registrar curvas y análisis de resultados, para así, aportar un material de apoyo y ayuda a los profesores y alumnos en la educación de los laboratorios de simulación o prácticas.

1 Motor de Inducción

1.1 Introducción al Motor de Inducción

La diferencia de la máquina asíncrona con los demás tipos de máquinas se debe a que el voltaje en el rotor (que produce la corriente en el rotor y el campo magnético del rotor) se induce en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectados por cables. La corriente que circula por uno de los devanados (situado en el rotor) se debe a la f.e.m. inducida por la acción del flujo del otro y por esta razón se denominan máquinas de inducción.

El motor de inducción está formado por un estator y un rotor. En el estator se coloca normalmente el inductor, alimentado por una red monofásica o trifásica. El rotor es el inducido y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator.

En un motor de inducción, las corrientes que circulan por el estator generan un campo magnético giratorio que gira a la velocidad de sincronismo y los polos del rotor son inducidos por acción de transformador, y también giran a la velocidad de sincronismo.

El rotor gira físicamente a una velocidad ligeramente menor que la velocidad de sincronismo, y la velocidad de giro se reduce un poco a medida que el par de carga y las necesidades de potencia aumentan.

El estator está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio que disponen de unas ranuras en su periferia interior en las que se sitúa un devanado trifásico distribuido, alimentado por una corriente del mismo tipo, de tal forma que se obtiene un flujo giratorio de estator rodeado por la carcasa.

El rotor está constituido por un conjunto de chapas apiladas, formando un cilindro, que tienen unas ranuras en la circunferencia exterior, donde se coloca el devanado.

Un detalle importante a considerar en los motores asíncronos trifásicos es la disposición de los terminales del devanado del estator en la llamada caja de bornes del motor tal como se muestra en la Figura 1-1 [1].

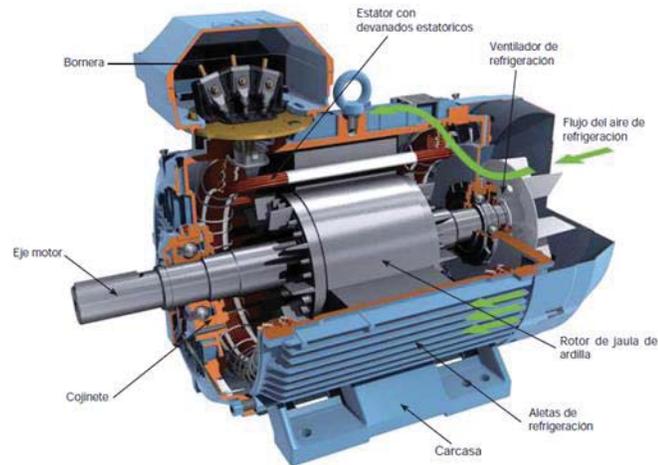


Figura 1-1: Análisis interno de un motor jaula ardilla

1.2 Características Principales del Motor de Inducción

1.2.1 Deslizamiento

Existen dos términos utilizados para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos. Uno es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (1-1)$$

Dónde:

n_{des} : Velocidad de deslizamiento de la máquina [*rpm*]

n_{sinc} : Velocidad del campo magnético giratorio [*rpm*]

n_m : Velocidad mecánica del eje del motor [*rpm*]

El otro concepto utilizado es el deslizamiento, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje, es decir que se define así:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} * 100 \quad (1-2)$$

Al poner en funcionamiento el motor, el rotor este estacionario así que la velocidad es $n = 0$ y el deslizamiento es unitario $s = 1$, en cambio cuando el rotor gira a una velocidad nominal $s = 0$. Todas las velocidades normales del motor caen dentro de estos dos límites [1].

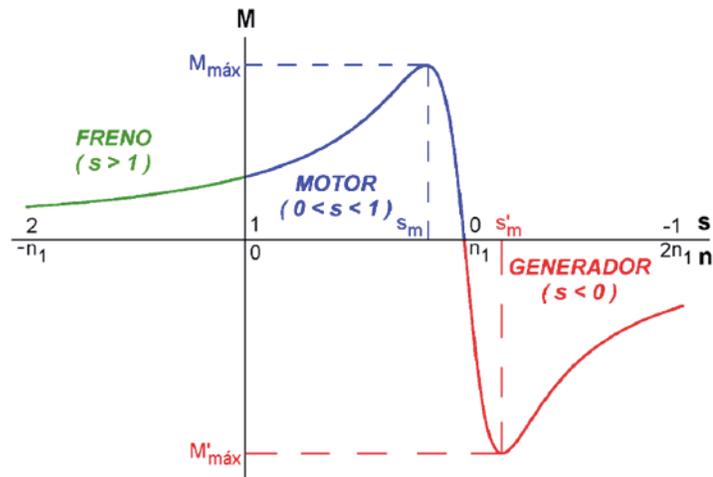


Figura 1-2: Curva Par-Velocidad de una Máquina Asíncrona

Dependiendo del valor del deslizamiento, se distinguen tres zonas distintas que caracterizan tres modos de funcionamiento: motor, generador y freno. El modo de funcionamiento más característico es el de motor y corresponde al rango de deslizamiento comprendido entre 0 y 1. Si se considera el campo de variación de s en el régimen motor, se tiene:

- La potencia mecánica interna es positiva. Es decir, se transmite energía mecánica al eje.
- La potencia en el entrehierro es positiva, lo que indica un par electromagnético positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere energía en el sentido estator-rotor.

Cuando una máquina eléctrica trabaja como generador, significa que gira a velocidades superiores a la de sincronismo lo que conlleva a deslizamientos negativos. El motor de inducción funciona como generador recibiendo energía mecánica de un motor externo que gira a una velocidad superior a la del sincronismo, y entregando energía eléctrica a la red por el estator. En el régimen generador, al ser el deslizamiento negativo, se tiene:

- La potencia mecánica interna se hace negativa. La máquina absorbe potencia mecánica por el eje.
- La potencia en el entrehierro se hace negativa, por lo que el par electromagnético cambia de signo respecto al comportamiento como motor.

- Si la potencia en el entrehierro se hace negativa, la transferencia de energía se hace de rotor a estator.

El régimen de frenado de una máquina asíncrona se produce para deslizamientos superiores a la unidad, lo que corresponde a velocidades negativas. En esta situación el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio, de tal forma que la máquina recibe energía de la red y energía mecánica por el eje. Cuando s es mayor a 1 resulta:

- La resistencia de carga se hace negativa y por tanto también es negativa la potencia mecánica interna. La máquina recibe energía mecánica por el eje.
- La potencia de entrehierro es el cociente de dos cantidades negativas; por consiguiente, la Potencia es positiva y el par electromagnético es positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere la energía en el sentido estator-rotor. Por ello la potencia que se absorbe de la red es positiva.

Durante el período de frenado la máquina recibe energía mecánica por el eje y también energía eléctrica de la red; Este régimen de frenado se utiliza en la práctica cuando se desea parar rápidamente un motor. La maniobra se realiza invirtiendo dos fases de la alimentación, de forma que el campo giratorio pase súbitamente a girar en sentido contrario al del rotor.

1.2.2 Factor de Potencia

Depreciando las armónicas, la ecuación del factor de potencia del motor sería:

$$\cos\varphi = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} * V_{ll}} \quad (1-3)$$

Donde:

P_{ab} : Potencia absorbida por la maquina (W)

V_{ll} : Voltaje línea a línea (V)

En la curva característica par- velocidad hay tres zonas diferenciadas donde el factor de potencia actúa diferente. En la primera zona, que es la región de bajo deslizamiento, donde la reactancia del rotor es despreciable, por lo que el factor de potencia del rotor es aproximadamente unitario. La segunda región, es de deslizamiento moderado, donde la reactancia del rotor tiene el mismo orden de magnitud que la resistencia del rotor. En esta zona el factor de potencia comienza a disminuir. Por último, la tercera región se llama de alto deslizamiento. En esta zona el aumento de la carga aumenta y el aumento en la corriente del rotor no se percibe debido a la disminución en el factor de potencia en el rotor.

1.2.3 Corriente de Arranque

Los motores de inducción se pueden poner en funcionamiento conectándolos a la línea de potencia. Pero no es lo más recomendado ya que la corriente de arranque requerida acusa un peak importante, que puede ser entre 5 y 7 veces la corriente nominal del motor, por lo que debe utilizarse en la práctica algún método para disminuir este peak, como aplicar una tensión reducida mediante arranque estrella-triángulo o mediante convertidores estáticos.

La corriente de arranque puede variar en forma amplia, depende de la potencia nominal del motor y de la efectividad de la resistencia del rotor en condiciones de arranque. La corriente de arranque de un motor de inducción se puede reducir con un circuito de arranque, pero también reducirá el par de arranque del motor.

Cuando se reduce la corriente de arranque en proporción directa a la disminución del voltaje en los terminales, el par de arranque disminuye con el cuadrado del voltaje aplicado. Sólo se puede lograr una cierta reducción de la cantidad de corriente si el motor debe arrancar con una carga en su eje [6].

1.2.4 Momento de Inercia

El arranque de la máquina es afectado directamente por el momento de inercia, el cual es vencido gracias al gran par de arranque de los motores de inducción, dicho par es superior al par nominal en varias unidades. Pero cuanto mayor sea el momento de inercia, mayor será el par de arranque necesario y más tiempo tardará la máquina en alcanzar la velocidad nominal asignada y por tanto la corriente será elevada durante más tiempo.

Como el momento de inercia depende del peso del rotor, cuanto mayor sea el motor más elevado será el momento de inercia, la relación peso/momento de inercia es prácticamente una relación lineal [6].

1.2.5 Par de Arranque y Par Máximo

Hay un par máximo posible que el motor puede desarrollar. Este par, llamado par máximo o par de desviación, es dos o tres veces el par nominal a plena carga del motor. El par máximo se obtiene cuando la potencia en el entrehierro es máxima. Ya que cuando la potencia en el entrehierro es igual a la potencia consumida por el resistor R_2/s , el par máximo inducido se produce cuando la potencia consumida por este resistor es máxima.

El deslizamiento del rotor para el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor.

Este par es proporcional al cuadrado del voltaje suministrado e inversamente al tamaño de las impedancias del estator y de la reactancia del rotor, a pesar que el deslizamiento en el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor, el par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor

El par de arranque del motor es un poco mayor al par a plena carga, por lo que este motor puede arrancar con cualquier carga que pueda alimentar a plena potencia.

En un motor de inducción, el par máximo en la curva será de 200% a 250% del par nominal a plena carga de máquina y el par de arranque (el par a velocidad cero) será de aproximadamente entre 1,1 y 1,5 veces el par nominal del motor.

1.2.6 Rendimiento

Como en cualquier otro dispositivo de transformación de la energía, existen unas pérdidas, de tal forma que solamente se entrega a la salida una parte de la energía absorbida en la entrada. El rendimiento o la eficacia de un motor vienen determinados por las pérdidas que se producen en la máquina. El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil y la potencia absorbida o total, de acuerdo con la expresión:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} \quad (1-4)$$

En donde:

P_U : Potencia útil (W)

P_T : Potencia total (W)

P_p : Potencia perdida (W)

La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida de una máquina son las pérdidas que se presentan dentro de ella. Por lo tanto, la ecuación se puede representar así:

$$\eta = \frac{P_U}{P_U + P_p} \quad (1-5)$$

Las primeras pérdidas que se observan son las pérdidas $I^2 \cdot R$ en los devanados del estator también llamadas las pérdidas en el cobre del estator. Luego se pierde cierta cantidad de potencia por los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas de Foucault que aparecen en el material ferromagnético del núcleo, que conforman las pérdidas en el hierro.

La potencia restante pasa a través del entrehierro entre el estator y el rotor. Una vez transferida dicha potencia, una parte de ella se pierde $I^2 \cdot R$ a esta se le llama, perdidas en el cobre del rotor. Por último, las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire P_{FYZ} . La potencia restante es la salida del motor, es decir, la potencia de salida P_{SAL} .

Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción, por rozamiento con el aire, por lo tanto, serán más pequeñas las pérdidas en el núcleo [1].

1.3 Circuito Equivalente

Los motores de inducción dependen de la inducción de tensiones y corrientes en el circuito del rotor desde el circuito del estator. La inducción de tensiones y corrientes en el circuito del rotor de un motor de inducción es esencialmente una operación transformadora, el circuito equivalente de un motor de inducción es similar al circuito equivalente de un transformador.

El circuito equivalente de un motor asíncrono tiene como objetivo analizar el comportamiento de la máquina a partir de un circuito eléctrico que traduzca, el comportamiento real del motor, de la manera más aproximada posible.

Es posible obtener el circuito equivalente para una fase, con el hecho de obtener las tensiones y las corrientes de las fases restantes, simplemente mediante un desplazamiento de fase, es decir, $\pm 120^\circ$ en el caso de una máquina trifásica.

El modelo de circuito equivalente de la figura 1-3 por fase analizado tiene los siguientes valores de sus parámetros:

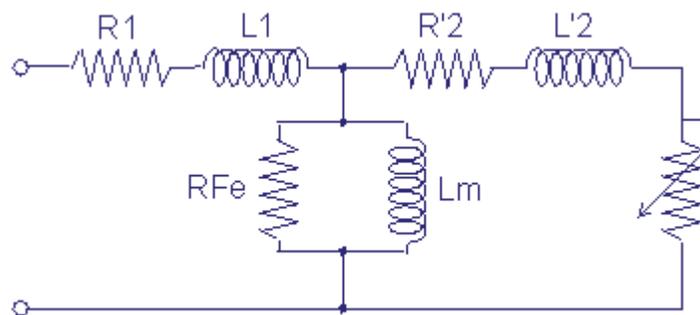


Figura 1-3: Circuito equivalente en régimen permanente por fase en un motor de inducción

Donde:

- V_ϕ : Tensión nominal por fase [V]
- I_1 : Corriente de alimentación por fase [A]
- R_1 : Resistencia de los conductores del estator [Ω]
- X_1 : Reactancia que presenta el devanado del estator [Ω]
- I_M : Corriente de vacío por fase [A]

- R_C : Resistencia que evalúa las pérdidas en el hierro [Ω]
- X_M : Reactancia magnética [Ω]
- X_2 : Reactancia presentada por el rotor referida al estator [Ω]
- R_2 : Resistencia del rotor referida al estator [Ω]
- s : Deslizamiento [%]

Para obtener dicho circuito equivalente por fase final de un motor de inducción, es necesario referir la parte del rotor del modelo al lado del estator.

1.4 Tipos de Torques de Carga

1.4.1 Conceptos Básicos de los Torques de Carga

A continuación, se analizará el comportamiento de las cargas respecto a la velocidad. En forma general, la dependencia del torque requerido por una carga en función de la velocidad, se puede escribir como:

$$Tl = T_0 + K_T * n^X \quad (1-6)$$

Donde:

Tl : Torque de carga a velocidad n

T_0 : Es el torque a velocidad 0

K_T : Constante que depende de la carga

X : Parámetro que depende del tipo de carga

El término T_0 corresponde al torque en reposo, o aquel que hay que vencer para empezar a mover el accionamiento y es causado, principalmente, por el roce estático de los componentes de accionamiento, de donde recibe el nombre de stickcion.

1.4.2 Clasificación de las Cargas según el Tipo de Torques

De acuerdo a la ecuación anterior, se ve que el torque ejercido por la carga varía con la velocidad de rotación y la dependencia es función de los valores que vaya tomando el parámetro X .

Según lo planteado en el párrafo anterior y restringiendo los valores de X a 0, 1, 2, 3 y -1, se observa que las cargas se pueden clasificar en cinco:

a) Torque Constante

El torque constante se produce cuando el parámetro T queda en la ecuación:

$$Tl = T_0 + K_T \quad (1-7)$$

El torque de carga permanece constante y es independiente de la velocidad de rotación. La relación teórica no debe ser tomada en cuenta totalmente debido a que en la realidad existen diversos factores que hacen que otros elementos afecten lo planteado anteriormente.

Cuando el torque desarrollado no depende de la velocidad, la potencia requerida para mover la carga, variara proporcionalmente con ella.

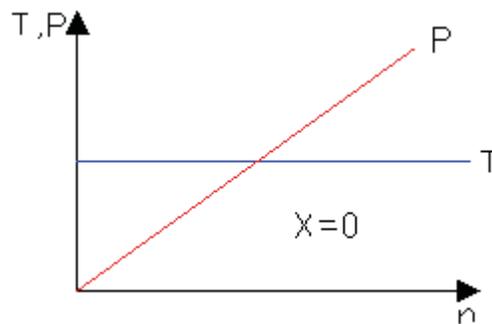


Figura 1-4: Gráfico Torque constante

Ejemplos de cargas con torque independiente de la velocidad son:

- Compresores de pistón
- Bombas de pistón
- Cabrestantes
- Correas transportadoras

b) Torque Lineal

Cuando el valor del exponente de la expresión anterior es uno, la ecuación queda:

$$Tl = T_0 + K_T * n \quad (1-8)$$

En este tipo de carga, el torque varía en forma directamente proporcional a la velocidad de rotación de la carga, mientras que la potencia lo hace en proporción al cuadrado de la velocidad.

La característica de este tipo de torque es inusual, ejemplos de cargas con torque proporcional a la velocidad son:

- Calentadoras
- Pulidoras
- Esmeriles

En la Figura 1-5, se muestran las relaciones de potencia y torque contra la velocidad para una carga cuyo $X=1$

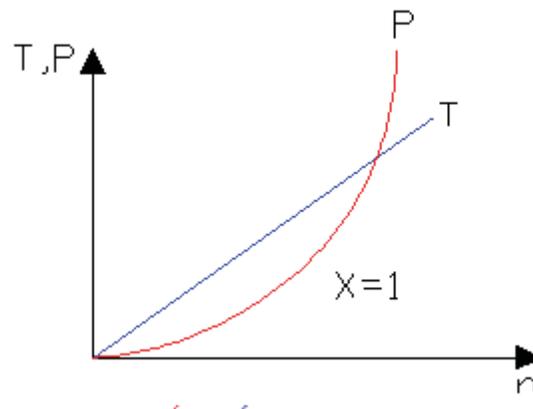


Figura 1-5: Torque Proporcional a la velocidad

c) Torque Cuadrático o Parabólico

El tipo de torque más usado en aplicaciones industriales y mineras es el de este tipo cuadrático o parabólico. Ejemplos de cargas con torque cuadrático a la velocidad son:

- Ventiladores
- Sopladores
- Bombas centrifugas

El torque de tipo parabólico resulta cuando se sustituye el valor de $X=2$ en la ecuación principal; por lo que queda:

$$Tl = T_0 + K_T * n^2 \quad (1-9)$$

La potencia requerida por la carga, es el producto de torque por velocidad, luego:

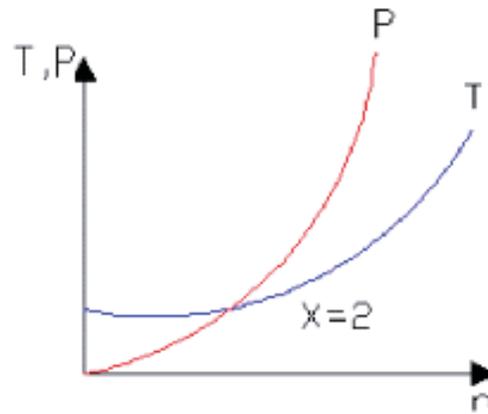


Figura 1-6: Torque cuadrático

Las cargas de este tipo de representación tienen una importante aplicación para sistemas de velocidad variable, puesto que el consumo de energía se reduce drásticamente con la reducción de velocidad.

d) Torque de Tipo inverso o Hiperbólico

Cuando el parámetro X de la ecuación principal toma el valor -1, la ecuación queda:

$$Tl = T_0 + K_T * n^{-1} \quad (1-10)$$

La potencia no varía o es poco afectada por la velocidad como aparece a continuación:

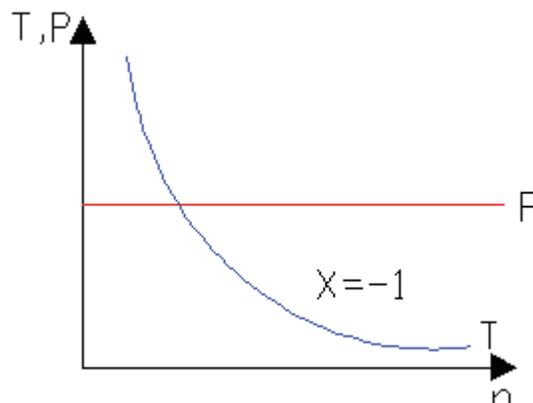


Figura 1-7: Torque Inverso

e) Torque No Definido

La ecuación principal tiene la limitación de conocer el valor de X o del tipo de carga que se puede aplicar. La forma más práctica de proceder en estos casos, es considerarlo como carga constante, cuyo valor es el máximo obtenido en el rango de velocidad.

1.5 Fundamentos de Control de Velocidad de Motores de Inducción

Teniendo en cuenta la expresión de la velocidad síncrona del motor, vemos que tenemos la posibilidad de controlar la velocidad del motor variando la frecuencia de la tensión de alimentación, cambiando el número de polos o el deslizamiento.

El método más sencillo y usado hasta ahora es el de variar la frecuencia de alimentación del motor y es en el que se centra este trabajo.

Como ventajas dentro del control por variación de la frecuencia de alimentación podemos destacar el amplio rango de velocidades que podemos usar, con su máximo par, de este modo se obtiene un buen rendimiento. Además, podemos usarlo para arrancar y frenar motores, el cual es un momento crítico para el motor debido a las altas corrientes que circulan por él.

De igual forma, es muy beneficioso el uso de este método de cara al ahorro de energía, dado que solo usamos la potencia necesaria en cada momento. Por estos motivos, está totalmente extendido el uso de variadores de frecuencia en la industria y es usada como primera opción a la hora de controlar un motor.

En el siguiente capítulo se va a hacer una descripción general de un variador de frecuencia, así como sus posibles aplicaciones en distintos campos de la industria. Conjuntamente, se describirá el variador de frecuencia SD700 de Power Electronics, el cual se encuentra en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de PUCV.

2 Variador de Frecuencia

2.1 Qué es un Variador de Frecuencia

El variador de velocidad para motores asincrónicos trifásicos (VSD, por sus siglas en inglés Variable Speed Drive), llamado también "inverters" utilizando un término técnico inglés, son dispositivos automatizados de control para poder controlar la velocidad en los motores asincrónicos.

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua también puede ser designada como variador de velocidad.



Figura 2-1: Variador de Frecuencia

2.2 Motivos para Emplear Variadores de Frecuencia

El control de procesos y el ahorro de la energía son las dos de las principales razones para el empleo de variadores de frecuencia. Históricamente, los variadores de frecuencia fueron desarrollados originalmente para el control de procesos, pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero.

2.3 Velocidad como una Forma de Controlar un Proceso

Entre las diversas ventajas en el control del proceso proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad destacan:

- Operaciones más suaves.
- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables en procesos variables.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Control del Par motor (torque).

2.4 Fomentar el Ahorro de Energía Mediante el uso de Variadores de Velocidad

Un equipo accionado mediante un variador de velocidad emplea generalmente menor energía que si dicho equipo fuera activado a una velocidad fija constante. Los ventiladores y bombas representan las aplicaciones más llamativas. Por ejemplo, cuando una bomba es impulsada por un motor que opera a velocidad fija, el flujo producido puede ser mayor al necesario. Para ello, el flujo podría regularse mediante una válvula de control dejando estable la velocidad de la bomba, pero resulta mucho más eficiente regular dicho flujo controlando la velocidad del motor, en lugar de restringirlo por medio de la válvula, ya que el motor no tendrá que consumir una energía no aprovechada.

2.5 Tipos de Control Asociados a un Variador de Frecuencia

Los esquemas de control de motores se pueden clasificar en dos categorías:

- Control Escalar
- Control Vectorial

2.5.1 Control Escalar

En general un controlador de velocidad de un motor de corriente alterna se alimenta con la tensión y frecuencia de manera controlada, esto es denominado control escalar, el cual consiste en sólo controlar la magnitud de las variables. A pesar de ser un excelente método de control de velocidad, presenta limitaciones de respuesta dinámica especialmente en baja velocidad y control del torque.

Esta estrategia generalmente no presenta lazos de realimentación (lazo abierto), por lo que su implementación es relativamente sencilla y de bajo costo. Trabajando con este tipo de control, no se requiere de un alto conocimiento del motor para el control de la frecuencia, por lo que es ampliamente utilizado. Una desventaja de este esquema de control es que el torque desarrollado es dependiente de la carga y no es controlado directamente.

Por otra parte, el motor y la carga desde el punto de vista mecánico, son caracterizados por un torque y una velocidad, que en el punto de acoplo deben ser iguales para lograr la operación estable del accionamiento.

Con el fin de estudiar el comportamiento de un accionamiento, es necesario conocer la dependencia de las características torque, tanto de la carga como del motor respecto a la velocidad de rotación.

2.5.1.1 Control de velocidad a través de la relación Tensión/Frecuencia

Esta técnica se basa en modelos estáticos del motor de inducción, la cual, con el objetivo de obtener la mayor relación de torque por corriente consumida en el estator, el flujo se debe mantener en un valor constante y muy cercano al nominal, para todas las condiciones de operación, lo que a su vez permitirá un mejor nivel de utilización de la capacidad de corriente del accionamiento.

Para conseguir el flujo constante se deben variar dos parámetros controlables, los cuales son la amplitud y frecuencia de la tensión de alimentación. Si se trabaja con velocidades menores a la velocidad base, se hace necesario reducir la tensión aplicada al estator, la cual deberá disminuir linealmente con la disminución de frecuencia, todo esto debido a la saturación del núcleo del motor que produciría altas corrientes de magnetización, lo que se puede demostrar aplicando la ley de Faraday:

Sea:

$$v(t) = V \text{sen}(wt) \quad (2-1)$$

Luego:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2-2)$$

El flujo resultante sería:

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int v(t) dt = \frac{1}{N} \int V \text{sen}(wt) dt \quad (2-3)$$

$$\phi(t) = \frac{V}{w \cdot N} \cos(wt) \quad (2-4)$$

Donde:

N = Número de espiras

V = Valor máximo de la tensión aplicada

W = Velocidad angular

Se observa que la frecuencia, pertenece al denominador de la expresión, por lo tanto, para mantener el flujo constante, ante variaciones de la frecuencia, el valor de la tensión aplicada debe variar en el mismo porcentaje que lo hizo la frecuencia, si dicha variación en la tensión no se produce, el flujo aumentará, en el mismo porcentaje de variación de la frecuencia, al igual que la corriente de magnetización.

2.5.2 Control Vectorial

El control por separado, de la corriente de excitación y de la corriente del inducido es posible en los motores de corriente continua de excitación independiente, donde la corriente del estator determina el flujo magnético y la corriente del rotor se puede utilizar como medio directo para controlar el torque. En ellos la posición de las escobillas con respecto al campo del estator asegura la condición óptima para el torque. En los motores de inducción el campo se genera por las corrientes del estator y los devanados del inducido están en el rotor, por lo tanto, la corriente del rotor se genera a partir de la fuerza electromotriz generada en los devanados, a causa del movimiento relativo de los conductores del rotor con respecto al estator.

A diferencia del motor de corriente continua, en el motor de inducción no existe un colector con delgas, por lo tanto, las posiciones relativas entre los flujos del estator y del rotor son variables, con lo cual la expresión del torque del motor deja de ser lineal.

Específicamente al utilizar control vectorial, el motor de inducción se asemeja al de continua con excitación independiente en:

- 1-El torque óptimo se produce tanto con el motor en estado estable como transitorio
- 2-Tanto el torque como el campo magnético se pueden controlar independientemente.

En los motores de inducción el campo rotativo del estator, crea una corriente entre las barras del rotor, la cual a su vez crea el flujo del rotor, la interacción de éstos produce el torque rotacional. Al controlar la magnitud y fase, las corrientes que ingresan al estator, tanto el torque y el flujo se pueden controlar con gran exactitud. A este proceso se le denomina control por orientación del campo o control vectorial.

El control vectorial es un método que permite mejorar la respuesta dinámica del motor, asemejándola a la del motor de corriente continua.

El control de velocidad del motor de inducción, no es simple, si se desea aprovechar al máximo las cualidades del motor, en cualquier punto de trabajo. Al variar la frecuencia de la tensión aplicada, se varía la velocidad del motor, pero además se altera el torque y el flujo, ya que las variables están fuertemente acopladas. El control escalar, o V/F constante, maneja esta consecuencia y trata mantener el flujo constante para poder suministrar el torque máximo a cualquier velocidad, pero la respuesta dinámica es lenta e imprecisa.

Para implementar esta estrategia de control, el motor se refiere a los ejes de coordenadas cartesianos, generalmente a los ejes d-q, con lo que se obtiene una máquina bifásica equivalente, donde las variables trifásicas se transforman en valores constantes (si el sistema es simétrico y equilibrado).

El control vectorial desacopla las variables, con lo cual se consigue un control independiente del torque y la velocidad, asemejando la sencillez de control de un motor de corriente continua. La respuesta dinámica es de mayor precisión que la del control escalar, específicamente, las corrientes del estator se refieren a un sistema de referencia ficticio, logrando que la componente directa i_{ds} , controle el flujo y la componente de cuadratura i_{qs} , controle el torque.

2.5.2.1 Control Directo

En este esquema de control directo, tanto el módulo, como el ángulo del fasor de flujo del rotor, se miden a través de sensores. En la figura 2-2 se observa un esquema simple de este tipo de control. La generación del vector de corriente depende de las señales de flujo del estator o del entrehierro. El flujo del entrehierro puede ser medido directamente o estimando mediante los valores de voltaje y corrientes del estator. Las componentes del flujo del estator pueden ser directamente calculadas a través de sus magnitudes. En este método la velocidad del rotor no es necesaria para obtener la información del ángulo espacial del campo o flujo del rotor (este ángulo también se conoce como ángulo de desacoplo).

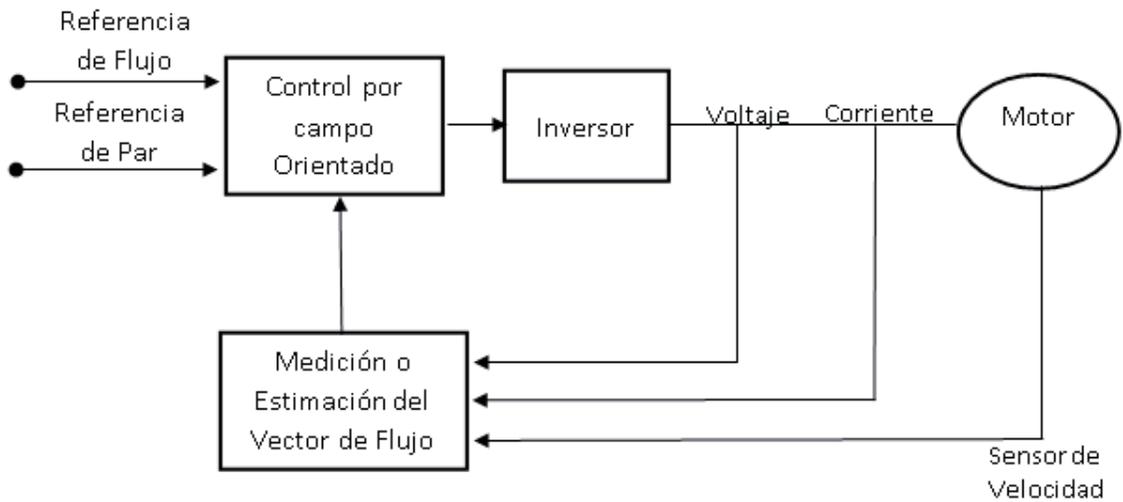


Figura 2-2: Control Directo

2.5.2.2 Control Indirecto

En el esquema del control indirecto, tanto el módulo, como el ángulo del fasor de flujo del rotor, se miden indirectamente con medidas de corriente en el estator y velocidad del rotor. En este modelo la velocidad del flujo del rotor (ω_k), se obtiene de la suma de la velocidad angular del rotor (ω_r) y la del deslizamiento (ω_s).

En la Figura 2-3, se observa un esquema de este método de control. Es más sencillo de implementar un control indirecto, ya que no se necesita medir el vector de flujo. El vector de la corriente se calcula con la medición de la velocidad del rotor y el valor de las referencias de flujo y torque (con las cuales se determina la frecuencia del deslizamiento).

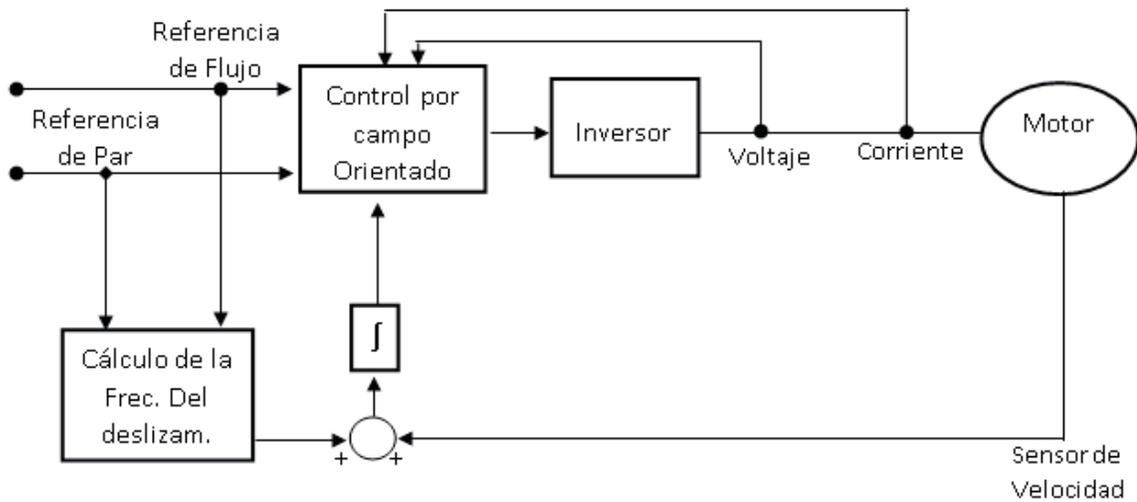


Figura 2-3: Control Indirecto

Al utilizar el control vectorial se logra una regulación precisa de la velocidad, un torque máximo disponible a cualquier velocidad, operación en los cuatro cuadrantes y excelente respuesta dinámica.

A pesar de todo lo mencionado anteriormente, el control vectorial también presenta una principal desventaja, ya que el éxito de esta estrategia depende del conocimiento correcto de la posición del flujo del rotor, y en el caso del control indirecto, éste se estima basado en la constante de tiempo del rotor, el que varía con la temperatura y nivel de saturación de la máquina, lo cual produce, que tanto el comportamiento dinámico como el de régimen permanente se vean afectados considerablemente

3 Variador de Frecuencia SD 700

El Variador de Frecuencia de la serie SD700 es fabricado por la empresa “Power Electronics”, la empresa “AVI.SA” donó un VDF SD700 a la escuela de ingeniería eléctrica, con el objetivo de que los estudiantes desarrollen distintos estudios del comportamiento acoplado a un motor con diferentes cargas, a continuación, se describirán las diversas características de este variador de Frecuencia.

3.1 Características del Variador de Frecuencia SD 700

Seguidamente se detallarán las características básicas, físicas y topologías del Variador de Frecuencia SD700.

3.1.1 Características Básicas del Variador de Frecuencia SD 700

El modelo donado según la placa es el Variador de Frecuencia SD 7021055 esto significa que sus parámetros son:

- La potencia Máxima para un motor: 150 Hp
- Corriente de salida: 210 A

Grado de Protección es IP54, lo que indica:

- Protección contra el polvo que puede interferir con el correcto funcionamiento de los equipos
- Chorros de agua contra el equipo desde cualquier dirección

Tabla 3-1: Modelos del Variador de Frecuencia Según sus Características

Serie SD700	Modelo		Corriente de Salida ^[1]		Tensión de Entrada ^[2]		Grado de Protección		Número de Pulsos	
SD7	-	SD700	0006	6A	2	230Vca	2	IP20	-	6 pulsos
			0100	100A	5	380-500Vca	5	IP54	12	12 pulsos
			7	525Vca			18	18 pulsos
			2500	2500A	6	690Vca			24	24 pulsos

Tabla 3-2: Características del VDF SD 700

Plataformas ^[2]		Filtro CEM (EMC)		Tierra Flotante		Frecuencia de Alimentación	
-	Estándar	-	Segundo Entorno	-	Sin Tierra Flotante	-	50Hz
20	Altura total 2000mm	E	Primer Entorno ^[3]	T	Con Tierra Flotante	6	60Hz ^[4]
22	Altura total 2200mm	M	Filtro opcional IT				

3.1.2 Características Físicas del Variador de Frecuencia SD 700

El variador de frecuencia SD700 se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas.



Figura 3-1: Variador de Frecuencia SD 700

Dimensiones del Variador de Frecuencia.

El Variador de Frecuencia SD 700 pertenece al tipo 5 según la Figura 3, por lo tanto, sus dimensiones son;

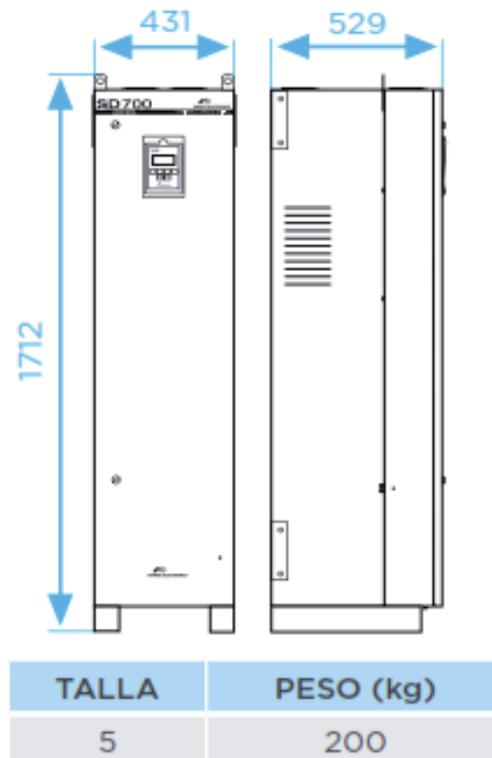


Figura 3-2: Dimensiones del VDF SD 700

El variador de frecuencia se puede controlar mediante el panel de control.

Panel de control

El panel de control tiene las siguientes características:

- Tipo: Extraíble
- Distancia: 3 metros
- Conexión: RJ45
- Display Alfanumérico 4 líneas de 16 caracteres cada una
- Leds de Estado LED ON: Alimentación en la tarjeta de control

- LED RUN: Encendido, el motor recibe alimentación del SD700
- LED FAULT: Intermitente indica que el equipo está en fallo
- Teclado de Membrana 6 teclas de configuración, control marcha y paro/reset del equipo.
- Display Gráfico Display gráfico con pantalla TFT táctil de 3,5" opcional
- Memoria independiente



Figura 3-3: Panel de Control

3.1.3 Características Topológicas del Variador de Frecuencia SD 700

El VDF SD700 tiene la siguiente estructura topológica básica:

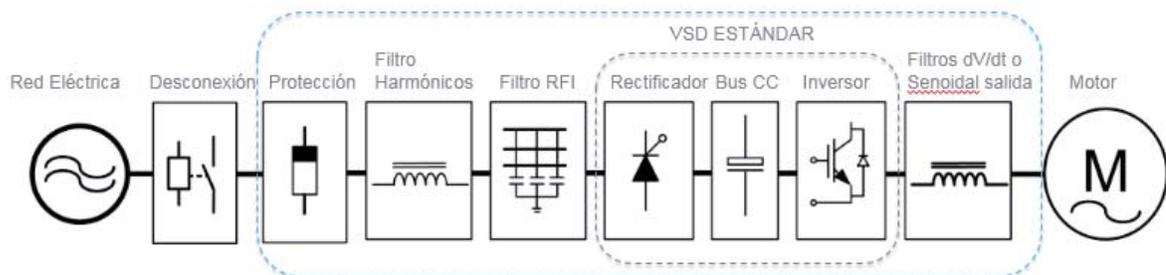


Figura 3-4: Estructura interna del VDF SD 700

El VDF SD 700 se secciona por las siguientes partes:

- Protección de entrada: Fusibles
- Filtro de armónicos desde la red
- Filtro RFI: Filtro para la interferencia electromagnéticas
- Rectificador (AC-DC)
- Bus CC: Capacitador para linealizar la onda
- Inversor: Inversor de 6 pulsos por IGBTs
- Filtro dv/dt: Protección para el motor por aumentos de voltajes

Variador de Frecuencia Estándar

El variador de frecuencia estándar corresponde a la sección interior de la estructura interna del Variador de Frecuencia SD700

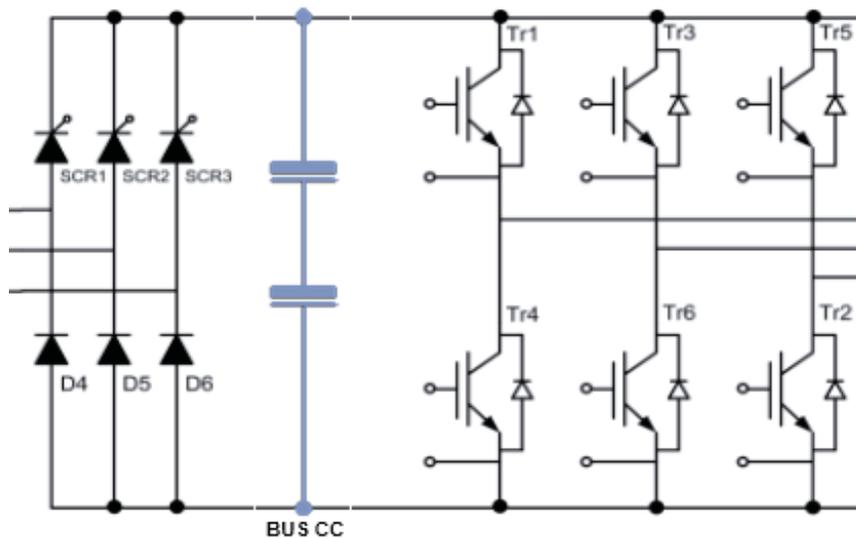


Figura 3-5: Análisis topológico del VDF SD 700

El esquema interno del variador de frecuencia se puede dividir claramente en 3 partes:

- Rectificador semicontrolado: Un Rectificador Trifásico semicontrolado está compuesto por tres diodos y tres SCR. El alfa que maneja los SCR de un Rectificador semicontrolado es hasta de 180 grados para carga resistiva. Cada diodo conduce durante 120 grados
- Capacitor para linealizar la onda

- Inversor de 6 pulsos: El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que alimentan al motor.

Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal senoidal.

Además, existe una etapa de control que es la encargada de activar o desactivar los IGBTs para crear la señal de salida deseada. También tiene funciones de vigilancia de un correcto funcionamiento y monitorización de tensiones, corriente. La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 8 kHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor, pero disminuye el rendimiento. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor.

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad están aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

3.2 Ensayo Experimental del Variador de Frecuencia SD 700 con un Motor de 30 Hp

En el Laboratorio de Maquinas Eléctrica, el Variador de Frecuencia SD700 se conectó a un motor de inducción de 30 Hp, el cual se acopló a un generador de corriente continua con excitación independiente, este tenía como carga un banco de ampollas (ver la conexión en el anexo 1). Se realizaron múltiples ensayos en donde se varió la frecuencia entre 5 y 50 Hz, manteniendo el banco de ampollas consumiendo su máxima capacidad (todas las ampollas encendidas), midiendo: Voltaje, Corriente, Velocidad del Rotor, Potencia activa del estator, Potencia Reactiva del estator, Factor de Potencia y deslizamiento

Asumiendo un rendimiento de 0,85 se calcula el torque para cada frecuencia de la siguiente manera:

$$t = \frac{P\eta}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (3-1)$$

Donde:

P: Potencia Activa del Rotor

η : Rendimiento del Motor (0,85)

n: Velocidad del Motor

t: Torque aplicado al Motor

Considerando todo lo anterior, los resultados de los ensayos son los siguientes:

Tabla 3-3: Ensayo Experimental con el Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30Hp (1).

Frecuencia (Hz)	Voltaje(v)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)	Torque (Nm)	Potencia Rotor (w)
50	389	12,2	1488	9,95	1550
45	352	11,9	1340	9,49	1332
40	313	11,6	1188	9,00	1120
35	279	11,3	1038	8,46	920
30	242	11	887	7,89	732
25	204	10,8	738	7,36	569
20	168	10,6	588	6,82	420
15	128	10,2	440	6,18	285
10	88	9,9	292	5,56	170

Tabla 3-4: Ensayo Experimental con el Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30Hp (2).

Frecuencia (Hz)	Cos (θ)	Potencia estator (w)	Preac (VAR)	Deslizamiento
50	0,75	2583,33	3170,79	0,0080
45	0,69	2219,47	2931,43	0,0074
40	0,65	1866,67	2674,97	0,0100
35	0,63	1532,66	2425,31	0,0114
30	0,55	1220,80	2206,51	0,0144
25	0,49	948,01	1990,14	0,0160
20	0,41	700,00	1835,12	0,0200
15	0,28	474,59	1659,01	0,0222
10	0,22	283,33	1307,05	0,0267

Se aprecia que la siguiente gráfica de torque:

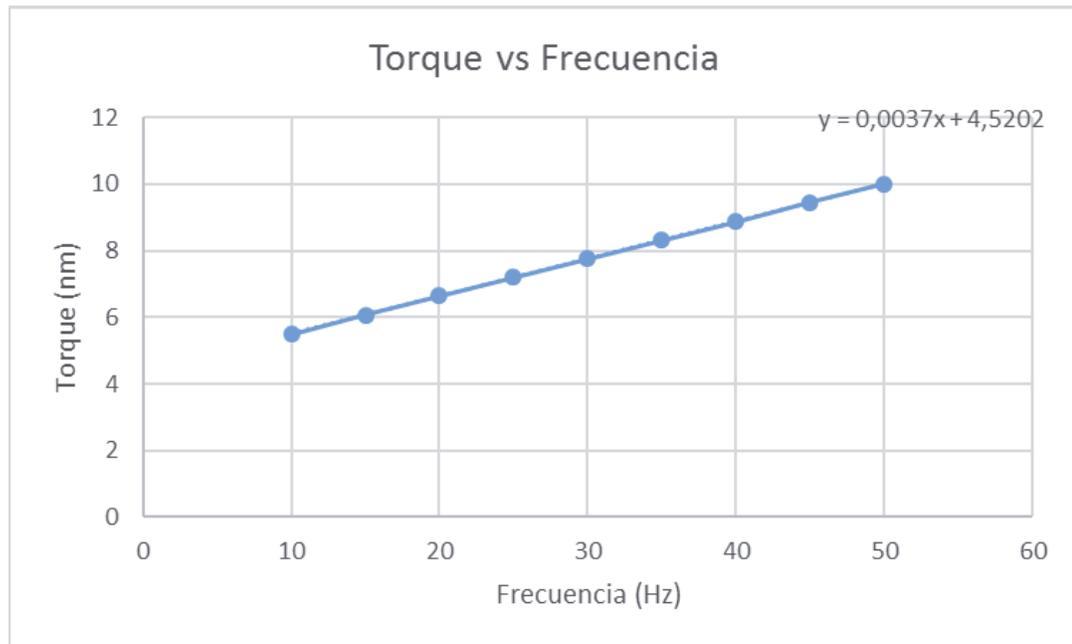


Figura 3-6: Gráfico Torque vs Frecuencia

Esta figura muestra que el Torque tiene la forma de un Torque tipo Lineal de la forma $ax+b$ en donde:

a: 0,0037

b:4,5202

Ya sabiendo el tipo de torque, se procede a corroborar los datos obtenidos mediante las simulaciones.

3.3 Simulación del Variador de Frecuencia SD 700 con un Motor de 30 Hp

3.3.1 Análisis de la Simulación

Para poder modelar y simular el variador de frecuencia junto al motor de 30 Hp acoplado a diferentes cargas se utilizó el programa PSIM.

La simulación se divide en 4 etapas:

-Rectificador

-Inversor

-Motor

-Tipo de torque

- Rectificador

El rectificador fue simulado de la siguiente manera:

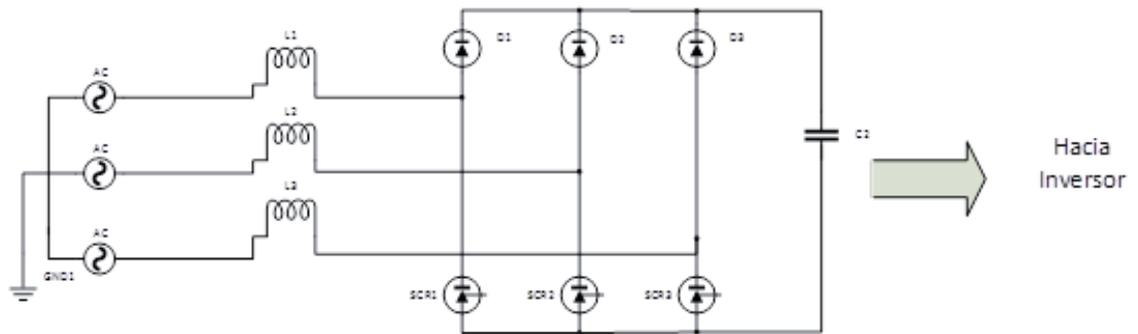


Figura 3-7: Simulación de un rectificador

En donde el circuito tiene las siguientes características:

Fuente de poder Trifásica: 380 V línea a línea, 50 Hz

Capacitor: 235 μ F (2 capacitores en serie de 470 μ F)

- Inversor

El inversor fue simulado de la siguiente manera:

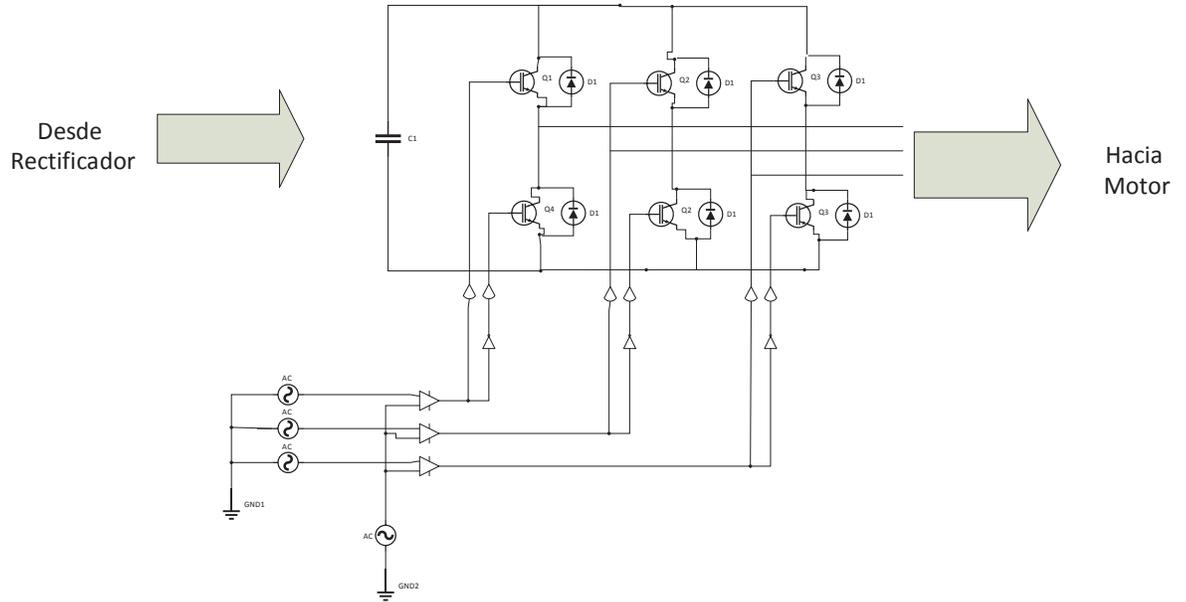


Figura 3-8: Simulación de un inversor

Donde la señal Portadora tiene las siguientes características:

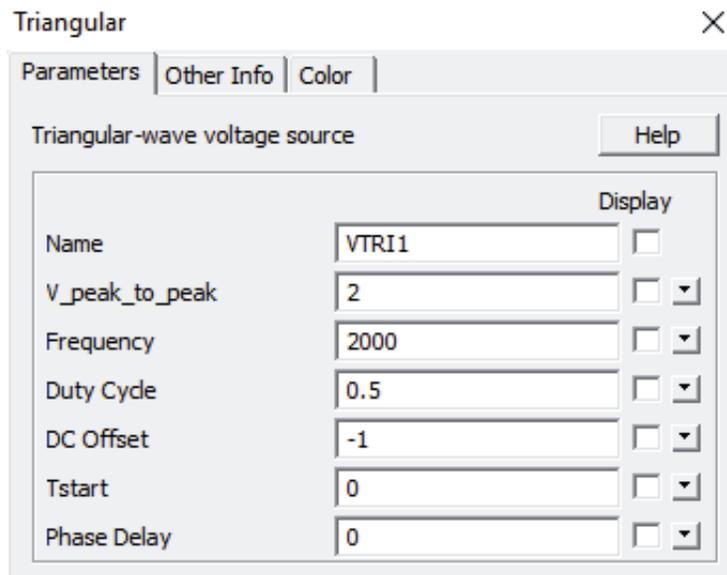


Figura 3-9: Señal Portadora en Psim

La Señal portadora es una señal triangular que tiene V peak de 1v para que el cálculo mediante el índice de modulación sea más simple, además tiene una frecuencia de conmutación de los inversores de 2000 Hz, como lo tiene también el VDF SD 700.

La señal moduladora tiene las siguientes características:

La señal moduladora va variando el voltaje de línea a línea según el índice de modulación y va variando la frecuencia según sea conveniente.

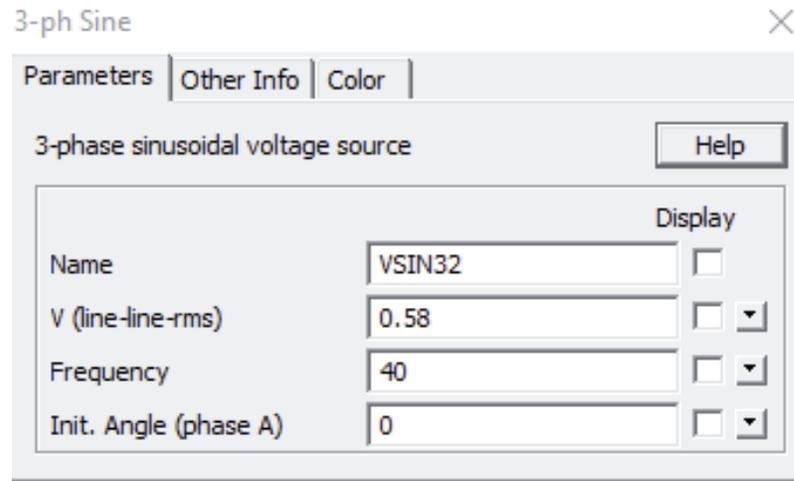


Figura 3-10: Señal Moduladora en Psim

Índice de modulación

El índice de modulación se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$mi = \frac{V_{Mmax}}{V_{Tmax}} \quad (3-2)$$

Donde:

V_M = Amplitud de la moduladora

V_T = Amplitud de la portadora

En donde también existe una relación de voltaje de entrada y voltaje de salida del inversor:

$$mi = \frac{2 \cdot V_{LLpeak}}{\sqrt{3} \cdot V_{DC}} \quad (3-3)$$

Obteniendo el voltaje de entrada (continua) y según el voltaje de salida (alterno) que se necesite, se obtiene el índice de modulación y así también el voltaje de la moduladora y el voltaje de la portadora (1 v para efectos prácticos).

Índice de Frecuencia

El Índice de Frecuencia relaciona la frecuencia de la señal portadora f_p y la señal moduladora f_m a través de la siguiente ecuación:

$$mf = \frac{f_p}{f_m} > \text{que } 1$$

En donde para las simulaciones, la Frecuencia de la señal portadora es 2000 (Hz) y la frecuencia de la señal moduladora varía entre 10 y 50 Hz.

- **Motor**

El motor simulado es el mismo que se utilizó para los ensayos en el laboratorio de máquinas eléctricas, el cual tiene los siguientes parámetros:

$$R_1 = R'_2 = 0,3621 \Omega$$

$$L_1 \approx L'_2 = 2,42 \text{ mH}$$

$$R_{Fe} = 1077 \Omega$$

$$L_\mu = 68,61 \text{ mH}$$

Luego los datos anteriores se anotaron el bloque de la simulación:

Parameter	Value	Display
Name	IM4	<input type="checkbox"/>
Rs (stator)	0.3621	<input type="checkbox"/> ▾
Ls (stator)	0.00242	<input type="checkbox"/> ▾
Rr (rotor)	0.3621	<input type="checkbox"/> ▾
Lr (rotor)	0.00242	<input type="checkbox"/> ▾
Lm (magnetizing)	0.06861	<input type="checkbox"/> ▾
No. of Poles P	4	<input type="checkbox"/> ▾
Moment of Inertia	0.4	<input type="checkbox"/> ▾
Torque Flag	1	<input checked="" type="checkbox"/> ▾
Master/Slave Flag	1	<input type="checkbox"/> ▾

Figura 3-11: Parámetros del Motor de 30 Hp en Psim

El bloque completo de la simulación es el siguiente:

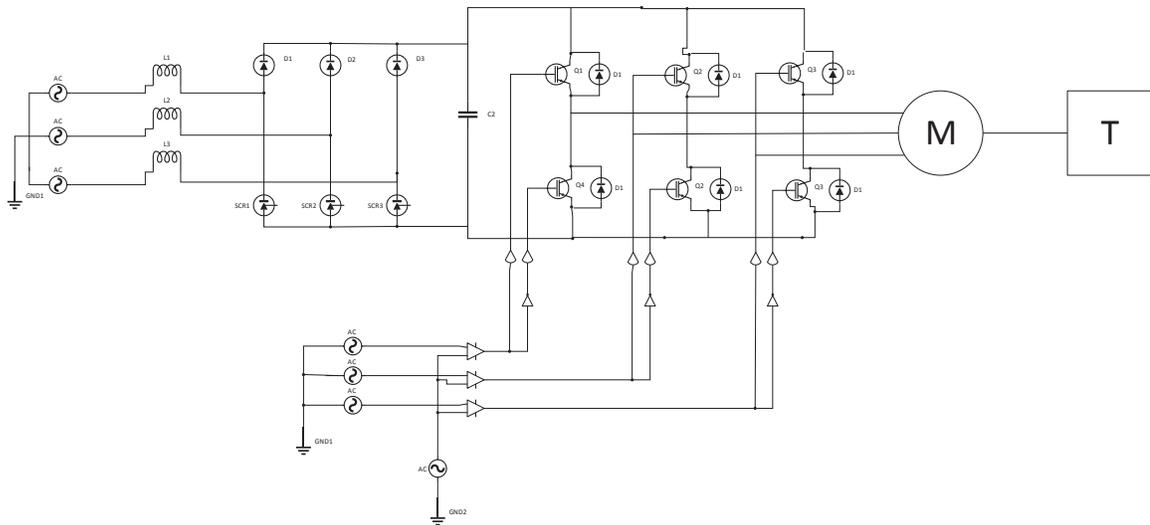


Figura 3-12: Bloque simulación Variador de Frecuencia SD700

3.3.2 Resultados de la Simulación del VDF SD 700 con un Motor de 30Hp

Con el análisis de la simulación y los parámetros del motor se realizó una simulación en donde se varió la frecuencia entre 10 y 50 Hz, con un torque lineal calculado en el ensayo real de $0,0037x+4,52$, de esta simulación se midió: Voltaje, Corriente, Velocidad del Rotor, Potencia activa del estator, Potencia Reactiva del estator, Factor de Potencia y deslizamiento.

Los resultados de la simulación son los siguientes:

Tabla 3-5 Resultados de la simulación del ensayo del VDF SD700 Parte 1

Frecuencia (Hz)	Voltaje(v)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)	Torque (Nm)	Potencia rotor(w)
50	387	12,5	1488	10	1558
45	350	12,1	1342	9,44	1327
40	313	11,8	1185	8,88	1102
35	278	11,5	1035	8,32	902
30	240	11,3	880	7,76	715
25	203	10,9	732	7,205	552
20	168	10,5	584	6,65	407
15	125	9,9	436	6,07	277
10	88	9,3	287	5,49	165

Tabla 3-6 Resultados de la simulación del ensayo del VDF SD700 Parte 2

Frecuencia (Hz)	Cos (θ)	Potencia estator (w)	Preac (VAR)	Deslizamiento
50	0,77	2597,06	2151,95	0,0080
45	0,72	2211,07	2131,08	0,0059
40	0,67	1836,58	2035,4	0,0125
35	0,61	1502,94	1952,43	0,0143
30	0,54	1191,85	1857	0,0222
25	0,47	920,50	1727	0,0240
20	0,39	677,82	1600	0,0267
15	0,33	461,91	1321,57	0,0311
10	0,25	275,00	1065,07	0,0433

3.3.3 Comparación entre Ensayos y Simulaciones del Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30 Hp

Dadas las tablas 3-5 y tabla 3-6, se procederá a realizar una comparación entre los ensayos y las simulaciones realizadas con el variador de frecuencia SD700 accionando un motor de 30 Hp con un tipo de carga de la forma $0,0037+0,45202$ mediante los distintos gráficos y calculando el error de estos mediante la siguiente fórmula:

$$error = \frac{\text{Valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \quad (3.4)$$

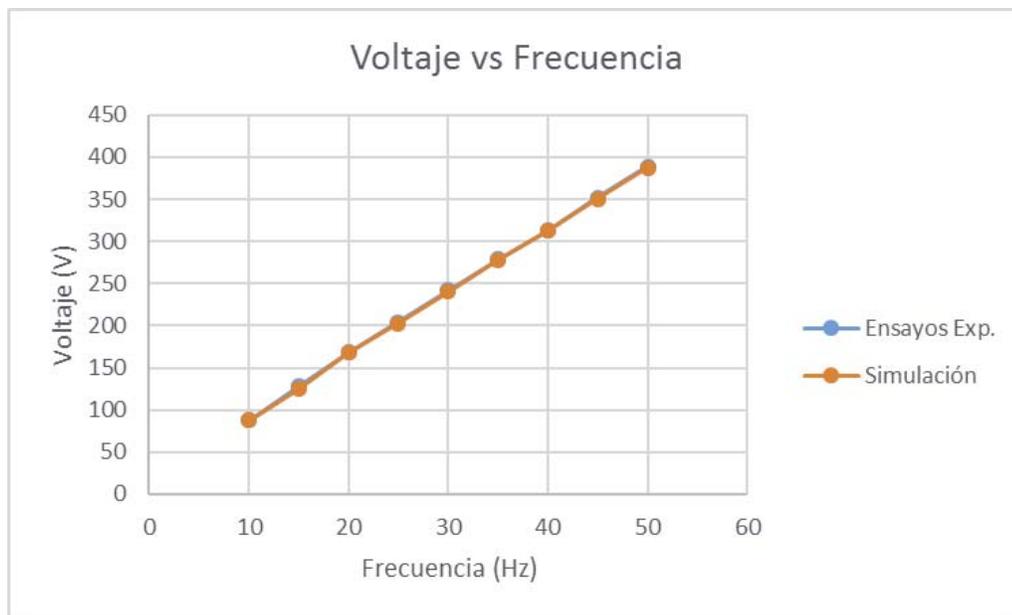


Figura 3-13 Comparación Voltaje vs Frecuencia de torque lineal

En la figura 3-13 se puede apreciar una proporcionalidad que existe entre el voltaje y la frecuencia, esto significa que se utilizó un control escalar, es decir, el flujo es constante.

Tabla 3-7 Tabla Comparativa Voltaje vs Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Voltaje Real (V)	Voltaje Sim (V)	Error de Voltaje %
50	389	387	0,0051
45	352	350	0,0046
40	313	313	0,0000
35	279	278	0,0031
30	242	240	0,0083
25	204	203	0,0068
20	168	168	0,0000
15	128	125	0,0247
10	88	88	0,0000

Mediante la tabla 3-7 se puede observar que el comportamiento del voltaje medido en el laboratorio es similar al simulado, ya que el máximo error que existió fue en 15 Hz con un error de 2,47%.

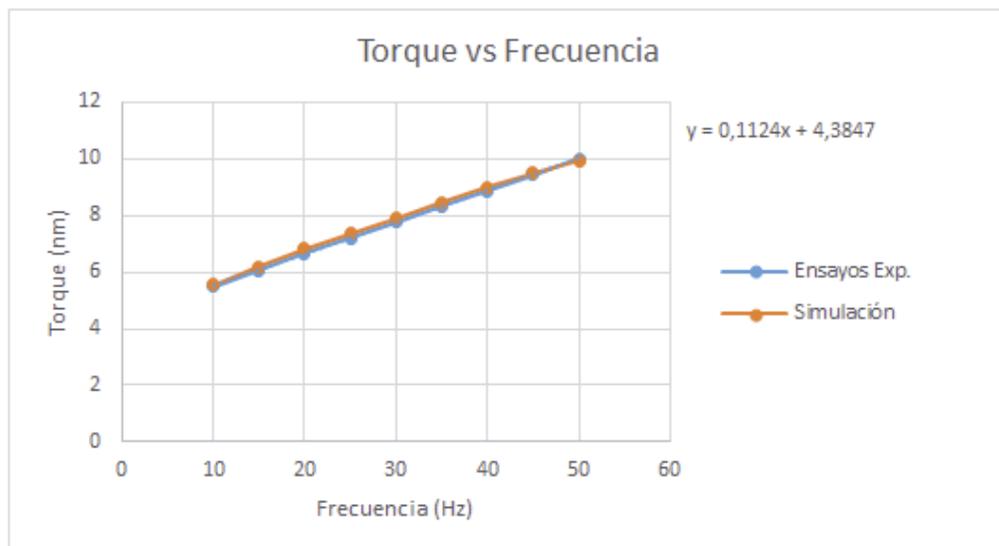


Figura 3-14 Gráfico Torque vs Frecuencia

En el gráfico anterior se aprecia el torque lineal de la forma $ax+b$ que se utilizó tanto en las simulaciones y en los ensayos.

Tabla 3-8 Tabla comparativa Torque vs Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Torque Real (V)	Torque Sim (V)	Error de Torque	%
50	9,95	10	0,0053	0,5312
45	9,49	9,44	0,0053	0,5269
40	9,00	8,88	0,0136	1,3627
35	8,46	8,32	0,0165	1,6548
30	7,89	7,76	0,0159	1,5942
25	7,36	7,205	0,0211	2,1060
20	6,82	6,65	0,0251	2,5057
15	6,18	6,07	0,0178	1,7799
10	5,56	5,49	0,0125	1,2503

Con la tabla y el gráfico anterior se puede observar que el torque calculado mediante los ensayos del laboratorio se logró reflejar en las simulaciones con un error inferior al 3%.

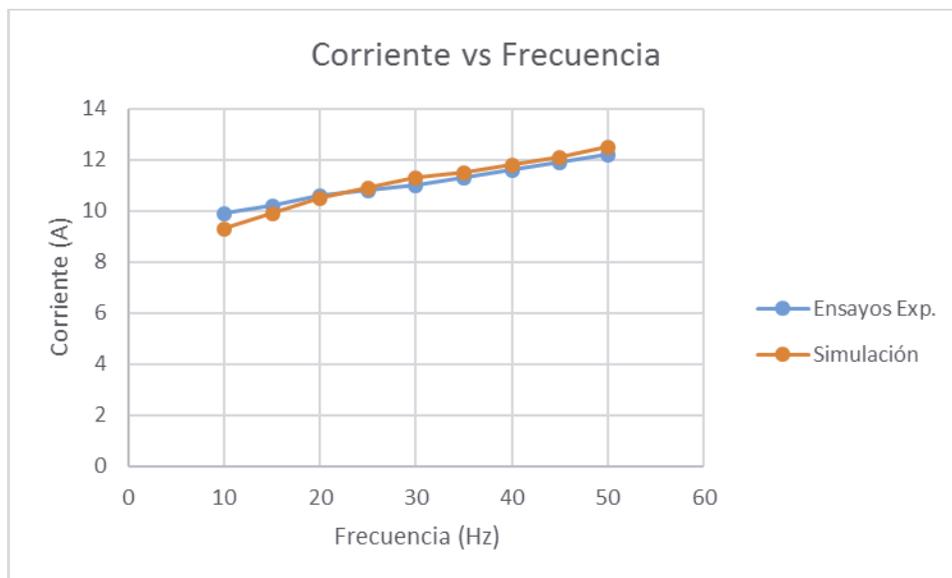


Figura 3-15: Gráfico Corriente vs Frecuencia de torque lineal

En la figura 3-15 se logra apreciar una disminución de la corriente a medida que la frecuencia disminuye, esto indica que independiente del ahorro de energía, si el motor gira a velocidades baja, este no provocará mayores problemas en la red por un amento de corriente.

Tabla 3-9 Tabla Comparativa corriente vs Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Corriente Real (A)	Corriente Sim (A)	Error de Corriente	%
50	12,2	12,5	0,0246	2,4590
45	11,9	12,1	0,0168	1,6807
40	11,6	11,8	0,0172	1,7241
35	11,3	11,5	0,0177	1,7699
30	11	11,3	0,0273	2,7273
25	10,8	10,9	0,0093	0,9259
20	10,6	10,5	0,0094	0,9434
15	10,2	9,9	0,0294	2,9412
10	9,9	9,3	0,0606	6,0606

En la tabla 3-9 se observa que el error observado entre la corriente simulada y la corriente medida es inferior al 6% para 10 Hz e inferior al 3% para el resto de las frecuencias.

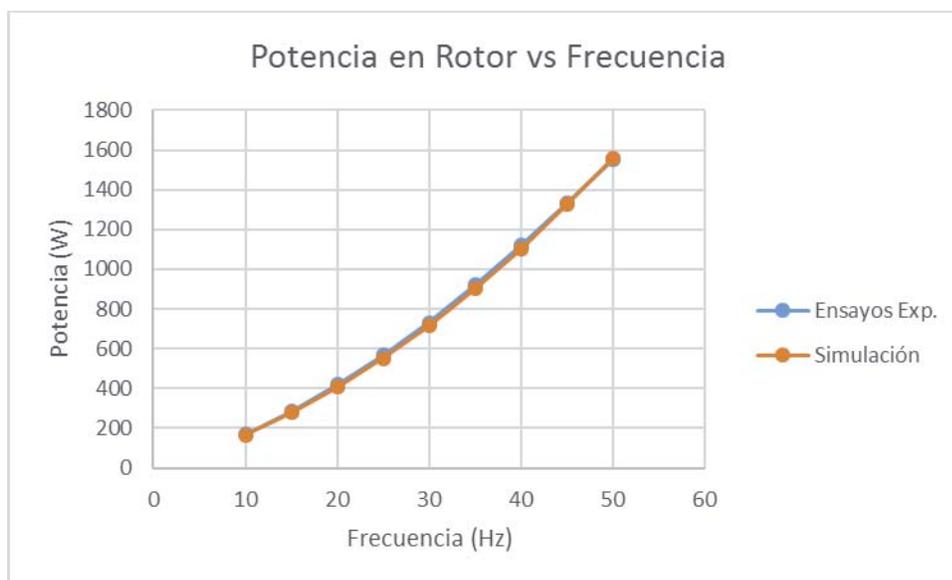


Figura 3-16: Gráfico Potencia vs Frecuencia de torque lineal

En la figura 3-16, se observa un comportamiento cuadrático de la potencia con respecto a la frecuencia, la potencia del rotor tiene este patrón debido a la ecuación 3-4

Tabla 3-10 Tabla comparativa Potencia vs Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Potencia Real (w)	Potencia Sim (w)	Error de Potencia %
50	1550,000	1558,234	0,005
45	1331,682	1326,643	0,004
40	1120,000	1101,948	0,016
35	919,597	901,765	0,019
30	732,477	715,112	0,024
25	568,806	552,300	0,029
20	420,000	406,691	0,032
15	284,755	277,144	0,027
10	170,000	165,000	0,029

En la tabla anterior, se logra observar que para 20 Hz tiene un error inferior a 3,2% en la potencia medida y simulada a diferencia del resto de las frecuencias que el error es inferior al 3%.

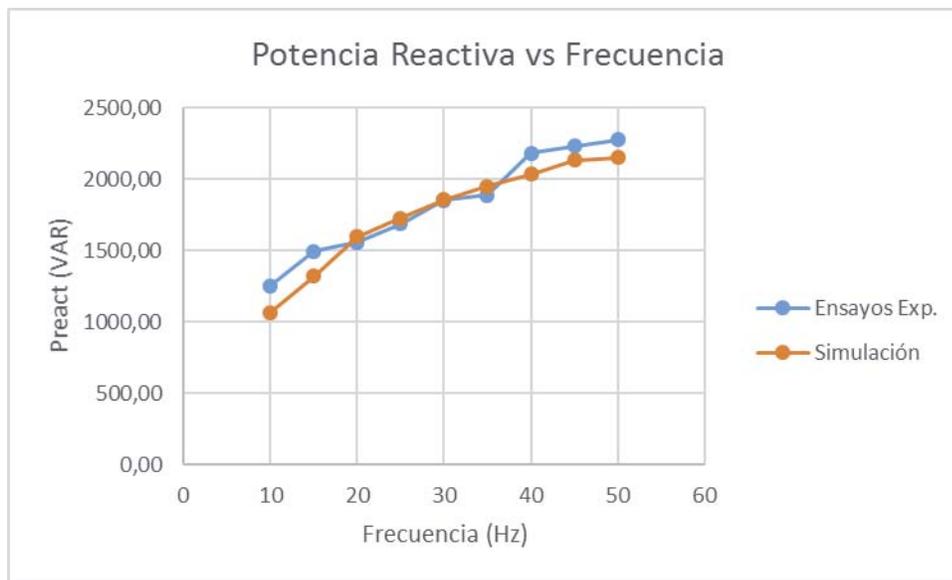


Figura 3-17 Gráfico Potencia reactiva vs Frecuencia de torque lineal

En la figura anterior se observa un patrón parabólico horizontal que existe entre la potencia reactiva y la frecuencia, esto se produce según la ecuación 3-6.

Tabla 3-11 Tabla Comparativa Potencia reactiva vs Frecuencia

Frecuencia(Hz)	Preact (VAR)	Real	Preact (VAR)	Sim	Error de Preact	%
50	3170,794		2849,235		0,101	10,141
45	2931,428		2645,429		0,098	9,756
40	2674,968		2445,337		0,086	8,584
35	2425,307		2282,116		0,059	5,904
30	2206,505		2083,121		0,056	5,592
25	1990,142		1910,090		0,040	4,022
20	1835,116		1771,648		0,035	3,459
15	1659,008		1601,936		0,034	3,440
10	1307,048		1192,879		0,087	8,735

A partir de la tabla 3-8, se produce un error superior al 10% para 50 Hz. No obstante, este disminuye para el resto de las frecuencias.

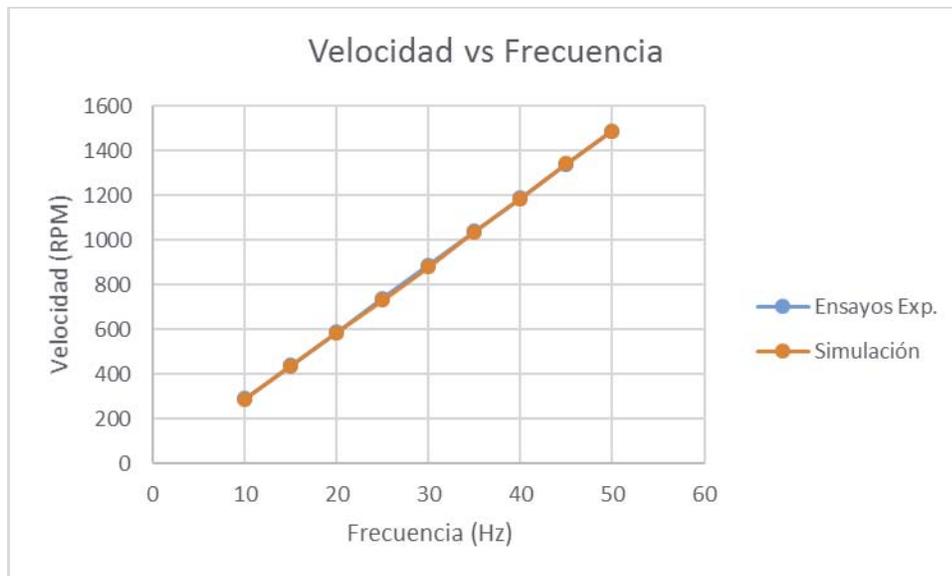


Figura 3-18 Gráfico Velocidad vs Frecuencia de torque lineal

En la figura anterior se logra apreciar la proporcionalidad entre la frecuencia y la velocidad, esto se debe a la fórmula 3-7.

Tabla 3-12 Tabla comparativa de Velocidad de rotor vs Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Velocidad Real (V)	Velocidad Sim (V)	Error Velocidad	%
50	1488	1488	0	0
45	1340	1342	0,00149	0,149
40	1188	1185	0,00253	0,253
35	1038	1035	0,00289	0,289
30	887	880	0,00789	0,789
25	738	732	0,00813	0,813
20	588	584	0,00680	0,680
15	440	436	0,00909	0,909
10	292	287	0,01712	1,712

Con respecto a la velocidad se puede decir que a pesar que el deslizamiento a frecuencias bajas sea muy distinto, la velocidad simulada y medida solamente tiene un error inferior al 2%

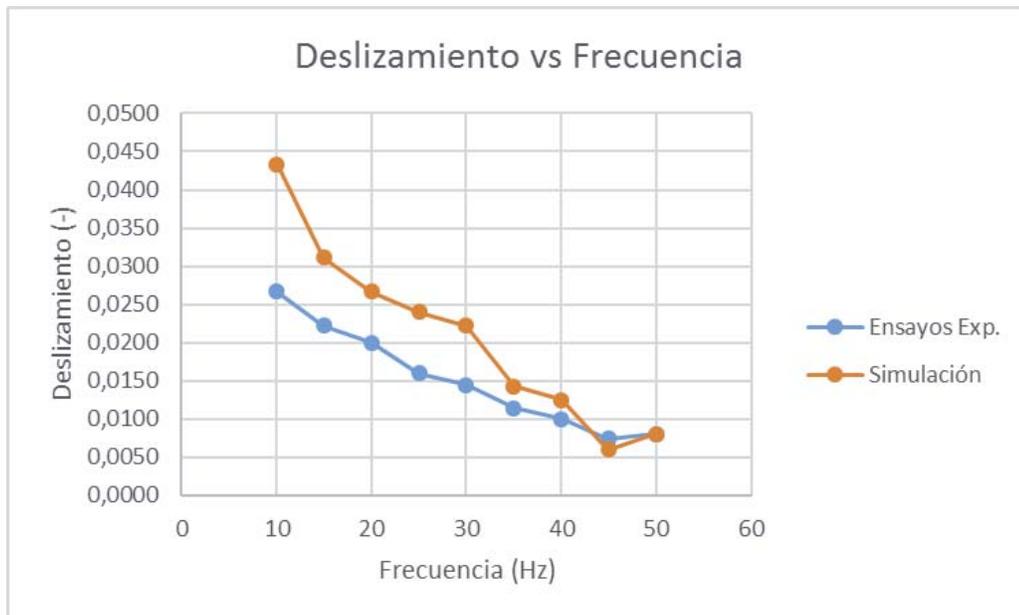


Figura 3-19 Gráfico deslizamiento vs frecuencia de torque lineal

En la gráfica anterior, se puede denotar que a medida que la frecuencia disminuye aumenta drásticamente el deslizamiento, esto se debe a que al disminuir la frecuencia al motor le cuesta más mover la carga, por lo que aumenta la diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad sincrónica, esto se analiza según la ecuación 1-2.

Tabla 3-13 Tabla comparativa desplazamiento vs Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Deslizamiento Real	Deslizamiento Sim	Error de deslizamiento	%
50	0,008	0,008	0,000	0,00
45	0,007	0,006	0,200	20,00
40	0,010	0,013	0,250	25,00
35	0,011	0,014	0,250	25,00
30	0,014	0,022	0,538	53,85
25	0,016	0,024	0,500	50,00
20	0,020	0,027	0,333	33,33
15	0,022	0,031	0,400	40,00
10	0,027	0,043	0,625	62,50

Se logra apreciar que a medida que la frecuencia disminuye, se produce un aumento significativo en el deslizamiento, y además el error aumenta hasta el 62,5%, esto se debe a que el deslizamiento para frecuencias bajas se trabaja con cantidades muy pequeñas lo provoca que cualquier error por más ínfimo que sea, se vea de manera significativa, esto se puede comprobar con la Tabla 3-13, donde muestra el error de la velocidad del rotor lo cual indica que la velocidad a 10 Hz tiene un error de 1,72%.

En resumen, estos gráficos se rigen según las siguientes fórmulas:

- $P_{rotor} = torque * Velocidad$ (3-5)

En donde la potencia del rotor se ve sometida según sea el torque aplicado al motor y la velocidad con la que gira

- $Potencia\ estator = Voltaje * Corriente * Factor\ de\ Potencia$ (3-6)

En la ecuación anterior el voltaje es sometido mediante el VDF según la frecuencia con que accione el motor, la potencia depende del torque aplicado al motor, el factor de potencia depende únicamente del modelo del motor, el único parámetro que varía independiente es la corriente, despreciando las armónicas.

- $$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3-7)$$

Con respecto a la ecuación 3-6 se puede agregar que la incógnita es la potencia reactiva ya que la potencia se puede deducir de las ecuaciones anteriores y el factor de potencia es un dato de placa.

- $$Torque = \frac{3 \cdot \frac{R_s}{s} \cdot \left(\frac{V_{rms}}{\sqrt{3}}\right)^2}{W_{sinc} \cdot \left(\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2\right)} \quad (3-8)$$

En donde los parámetros R_s , R_r , X_s y X_r son conocidos ya que fueron calculados mediante los ensayos de rotor en vacío y rotor bloqueado, la velocidad sincrónica es 1500 RPM ya que el motor utilizado tiene 4 polos, el torque sometido al rotor fue calculado mediante los ensayos realizados al motor, por lo que la incógnita de esta ecuación es el deslizamiento.

- $$n_m = \frac{60F}{2P} \quad (3-8)$$

En la ecuación 3-8 se puede observar la relación lineal que existe entre la velocidad del rotor y la frecuencia puesto a que P es 2 ya que indica el número de polos.

3.4 Simulaciones del Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30 Hp con un Torque Constante

Para las siguientes simulaciones se utilizó un torque de tipo:

$$T_l = T_0 + K_T \quad (3-7)$$

Donde:

$$K_t = 0$$

$$T_0 = 20$$

Por lo que se utilizó un torque constante de 20 Nm, a continuación, se presentan las curvas de torque en la carga, velocidad del rotor, Voltaje de línea a línea, y la potencia aplicada al rotor para las frecuencias de 50 Hz, 45 Hz, 40 Hz, 35 Hz, 30 Hz, 25 Hz, 20 Hz, 15 Hz y 10 Hz

3.4.1 Resumen de la Simulaciones con 20 Nm

Tabla 3-14 Tabla Simulación para un torque de 20 Nm parte 1

Frecuencia (Hz)	Voltaje(v)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)	torque (Nm)	Potencia rotor(w)
50	382	11,6	1475	20	3089,24
45	342	11,2	1328	20	2781,36
40	304	10,3	1168	20	2446,26
35	266	10	1017	20	2130,00
30	224	10,1	864	20	1809,56
25	190	10,3	679	20	1422,10
20	153	10,4	521	20	1091,18
15	114	10,9	321	20	672,30
10	74,4	11,3	130	20	272,27

Tabla 3-15 Tabla Simulación para un torque de 20 Nm parte 2

Frecuencia (Hz)	Cos (θ)	Potencia estator (w)	Preac (VAR)	Deslizamiento
50	0,78	3089,24	3097,6	0,01667
45	0,74	2781,3632	3159,4	0,01630
40	0,687	2446,2592	3297,0	0,02667
35	0,623	2130,0048	3368,7	0,03143
30	0,543	1809,5616	3521,1	0,04000
25	0,46	1422,0976	3132,0	0,09467
20	0,38	1091,1824	3317,2	0,13167
15	0,3	672,3024	2671,0	0,28667
10	0,24	272,272	1375,0	0,56667

Con las tablas anteriores, se concluye los siguientes gráficos:

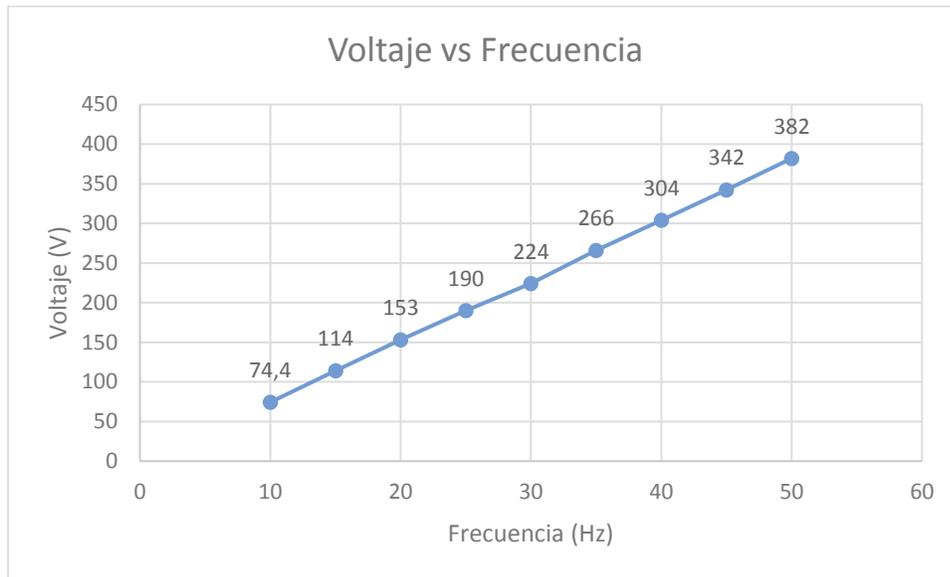


Figura 3-20 Gráfico de Voltaje vs Frecuencia para 20 Nm

En el gráfico anterior, se logra apreciar la proporcionalidad entre la curva de voltaje y frecuencia, lo cual indica que se está en presencia de un control escalar ya que el flujo es constante

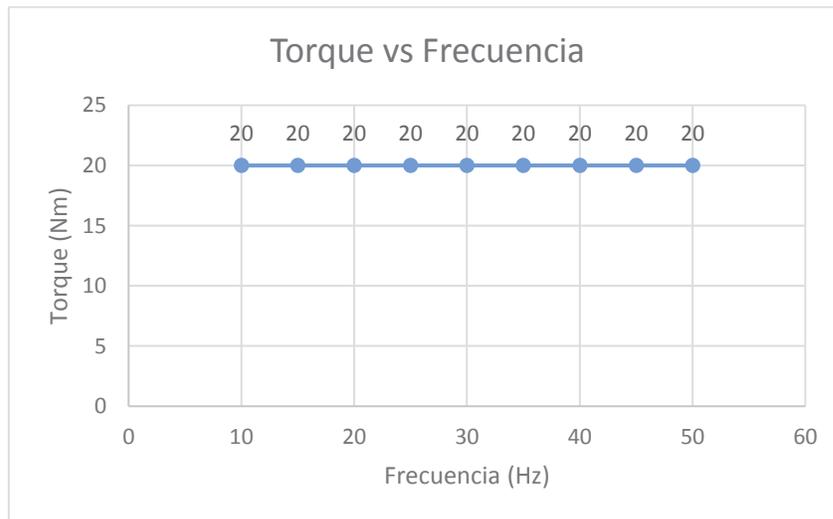


Figura 3-21 Gráfico torque vs Frecuencia para 20 Nm

Con esta gráfica se corrobora el torque constante de 20 Nm

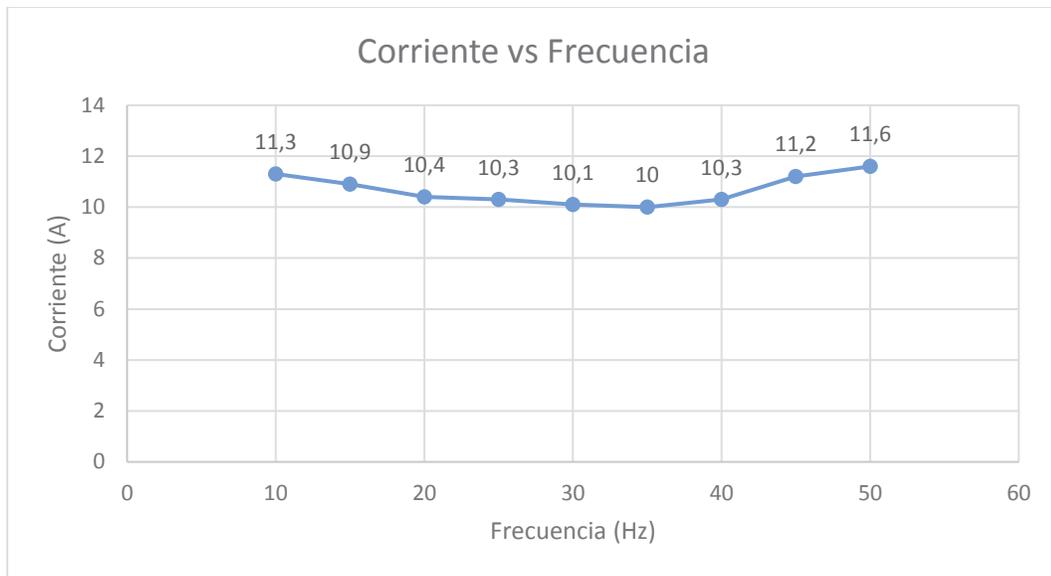


Figura 3-22 Gráfico Corriente vs Frecuencia para 20 Nm

Se observa que entre las frecuencias de 30 Hz y 50 Hz la corriente disminuye, no así con las frecuencias inferiores que tienen a aumentar levemente la corriente, por lo que para torques de tipo lineal solo se recomienda trabajar hasta solo un 50% de la frecuencia nominal del sistema.

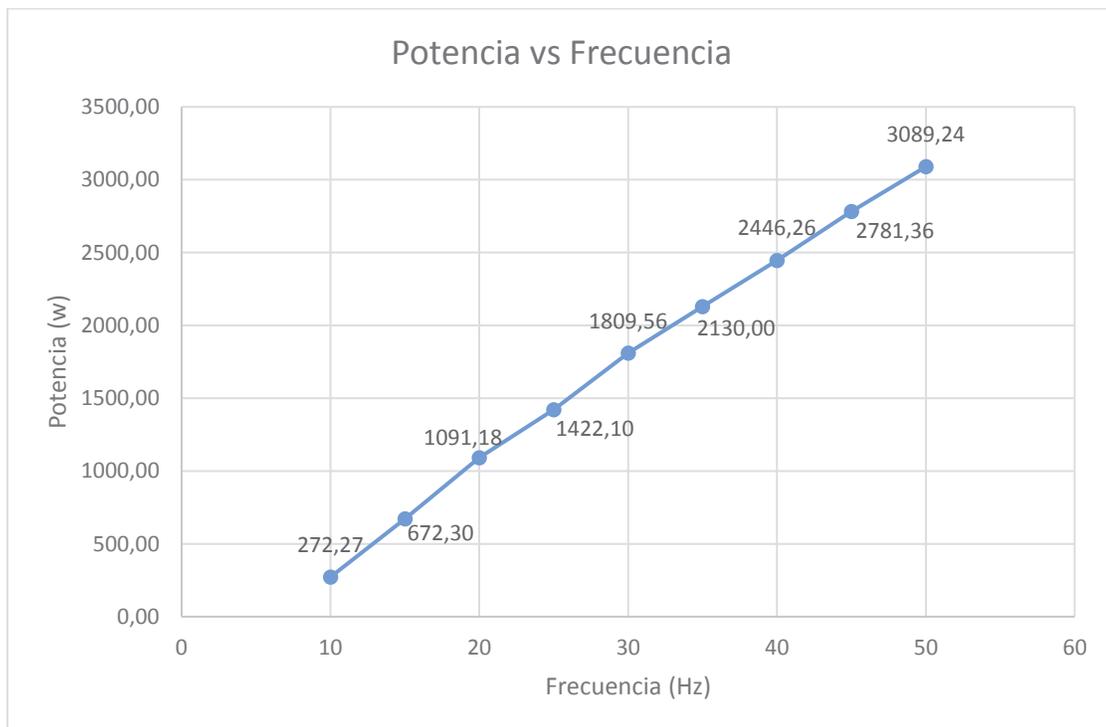


Figura 3-23 Gráfico Potencia del rotor vs Frecuencia para 20 Nm

En la figura anterior se aprecia que la potencia se comporta de manera lineal con respecto a la frecuencia, por lo que para el torque tipo lineal es el peor caso para querer provocar un ahorro energético.

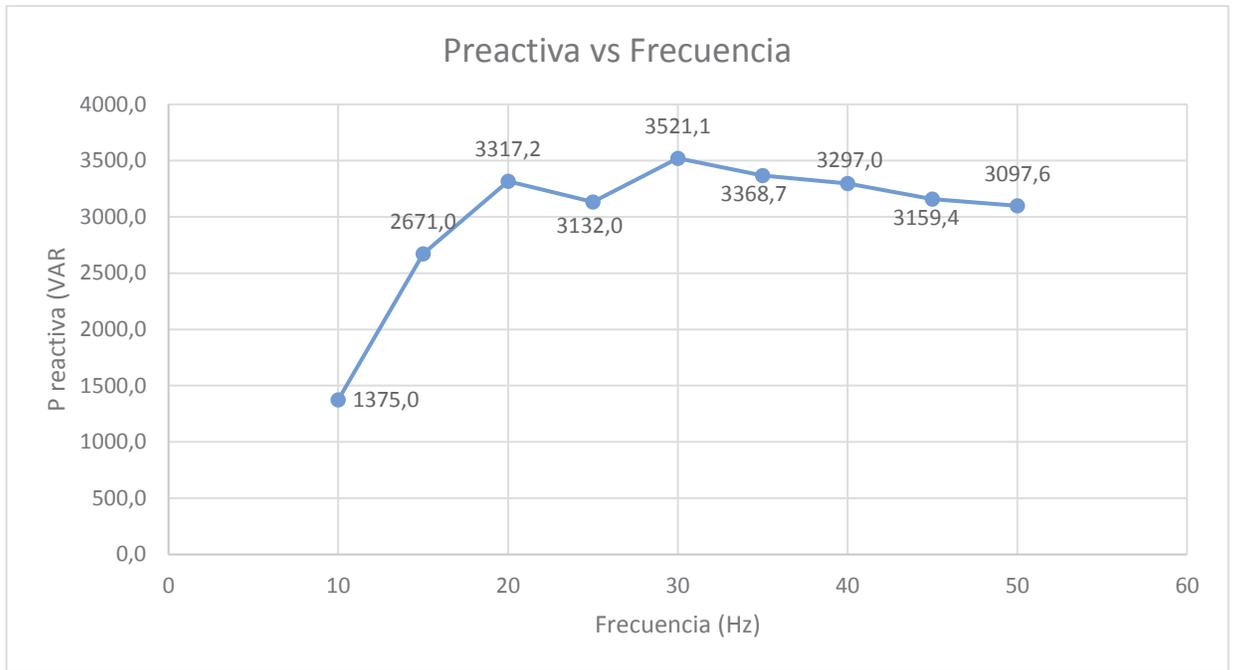


Figura 3-24 Gráfico Potencia reactiva vs Frecuencia para 20 Nm

La Potencia reactiva tiene un comportamiento parejo entre 20 y 50 Hz sin embargo tiende a descender bruscamente para 15Hz y 10 Hz.

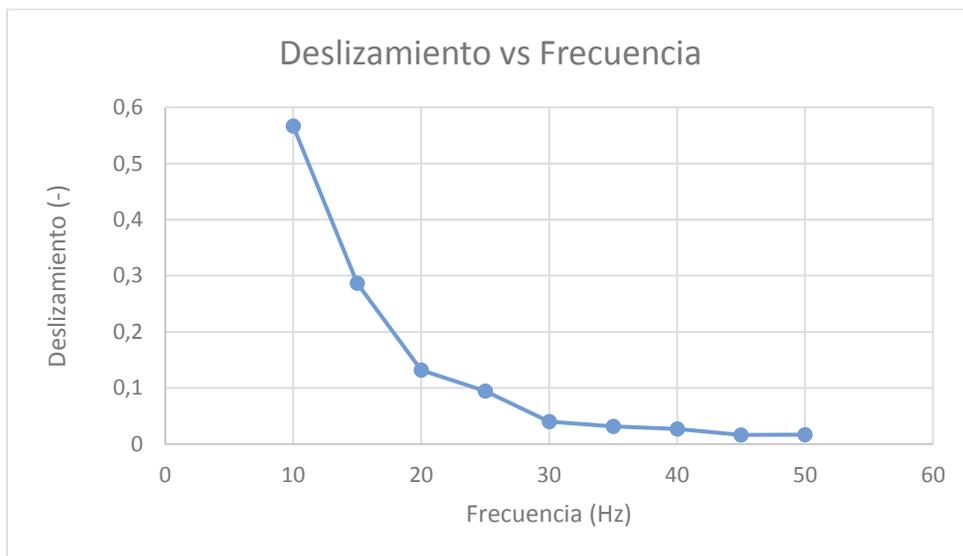


Figura 3-25 Gráfico deslizamiento vs Frecuencia para 20 Nm

En la figura 3-25 se observa que a medida que disminuye la frecuencia, el deslizamiento va aumentando significativamente ya que al bajar la frecuencia el motor tiene más problemas para mover la carga por sus características internas por lo que tiende a disminuir drásticamente la velocidad del rotor y hay una mayor diferencia entre esta y la velocidad nominal.

3.5 Simulaciones de Variador de Frecuencia SD 700 Accionando un Motor de 30 Hp con un Torque Cuadrático

Para las siguientes simulaciones se utilizó un torque tipo $ax^2 + bx + c$ donde:

a: 0.0008

b: 0

c: 10

A continuación, se presentan las curvas de torque en la carga, velocidad del rotor, Voltaje de línea a línea, y la potencia aplicada al rotor para las frecuencias de 50 Hz, 45 Hz, 40 Hz, 35 Hz, 30 Hz, 25 Hz, 20 Hz, 15 Hz y 10 Hz

3.5.1 Resumen de las Simulaciones con Torques Cuadráticos

Tabla 3-16 Tabla simulaciones de torque cuadrático parte 1

Frecuencia (Hz)	Voltaje(v)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)	torque (Nm)	Potencia rotor(w)
50	382	11,6	1475	26,7	4194,04
45	342	11,3	1325	23,01	3252,97
40	304	10,7	1168	19,21	2414,01
35	266	10,5	1018	15,88	1746,10
30	224	10,1	864	13,2	1244,07
25	190	9,6	715	10,55	828,60
20	153	8,5	521	8,55	537,21
15	114	8,2	363	6,99	329,40
10	74,4	8,1	130	5,88	184,73

Tabla 3-17 Tabla simulaciones torque cuadrático parte 2

Frecuencia (Hz)	Cos (θ)	Potencia Estator (w)	Preac (VAR)	Deslizamiento
50	0,78	5242,5	4205,56	0,01667
45	0,73	4066,2	3806,00	0,01852
40	0,67	3017,5	3342,00	0,02667
35	0,62	2182,6	2761,00	0,03048
30	0,53	1555,1	2487,00	0,04000
25	0,45	1035,7	2053,00	0,04667
20	0,38	671,5	1633,00	0,13167
15	0,31	411,7	1260,00	0,19333
10	0,22	230,9	1019,00	0,56667

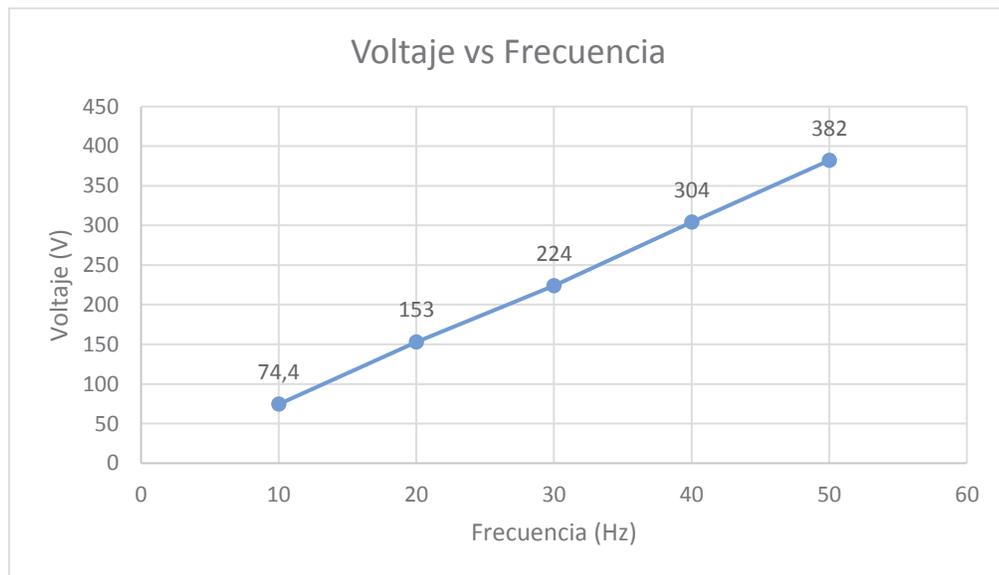


Figura 3-26 Gráfico Voltaje vs Frecuencia para torque cuadrático

Se logra apreciar la proporcionalidad entre la curva de voltaje y frecuencia, lo cual indica que se está en presencia de un control escalar ya que el flujo es constante.

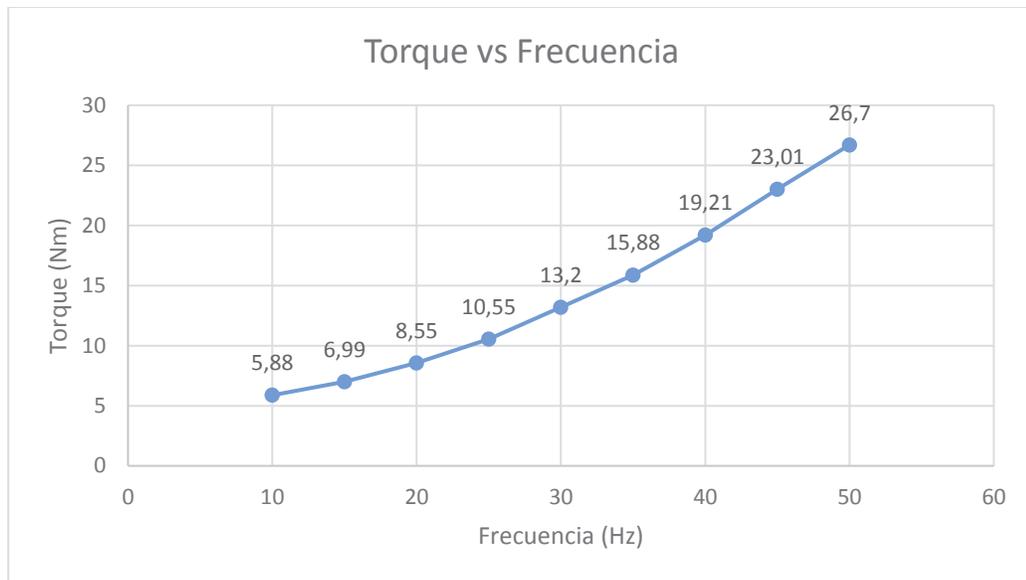


Figura 3-27 Gráfico de torque cuadrático vs Frecuencia

Con esta gráfica se observa un torque de tipo cuadrático impuesto al motor de inducción de 30 Hp,

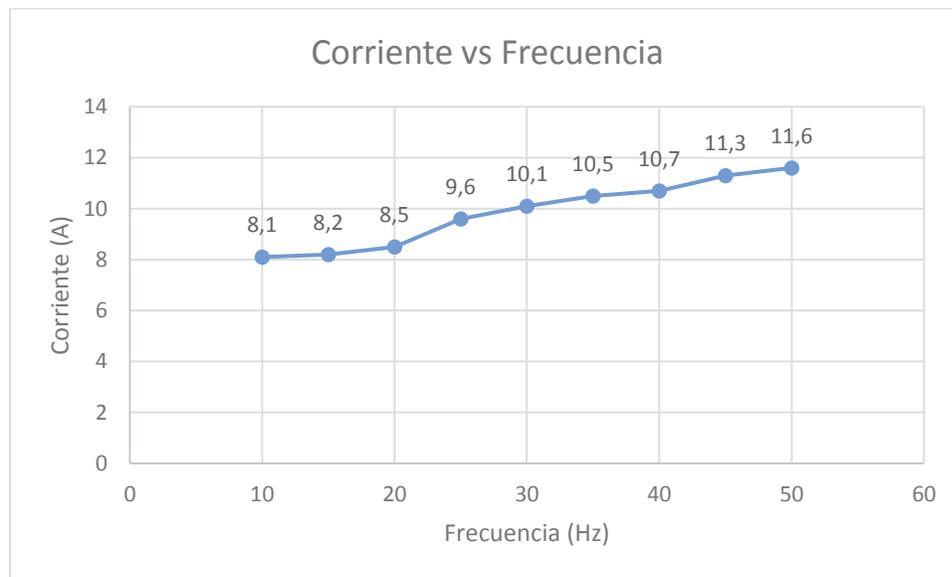


Figura 3-28 Gráfica de Corriente vs Frecuencia para un torque cuadrático

En esta gráfica se observa la disminución de la corriente a medida que disminuye la frecuencia.

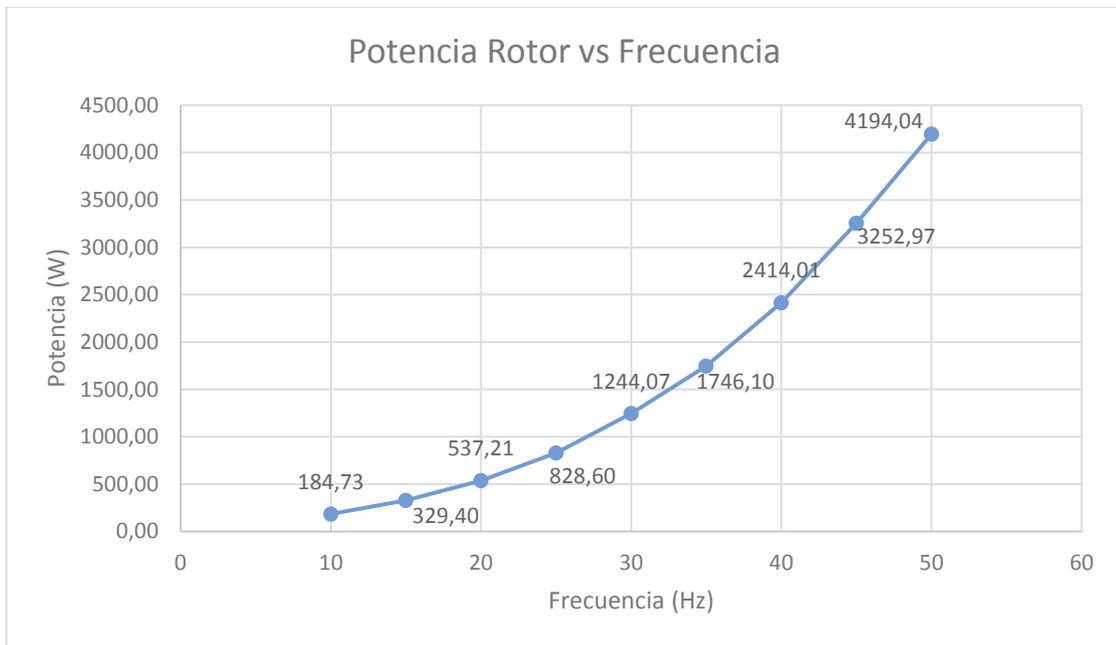


Figura 3-29 Gráfico Potencia rotor vs Frecuencia para un torque cuadrático

En la figura se observa que la potencia aumenta significativamente de manera cúbica, esto es muy importante para provocar un ahorro energético.

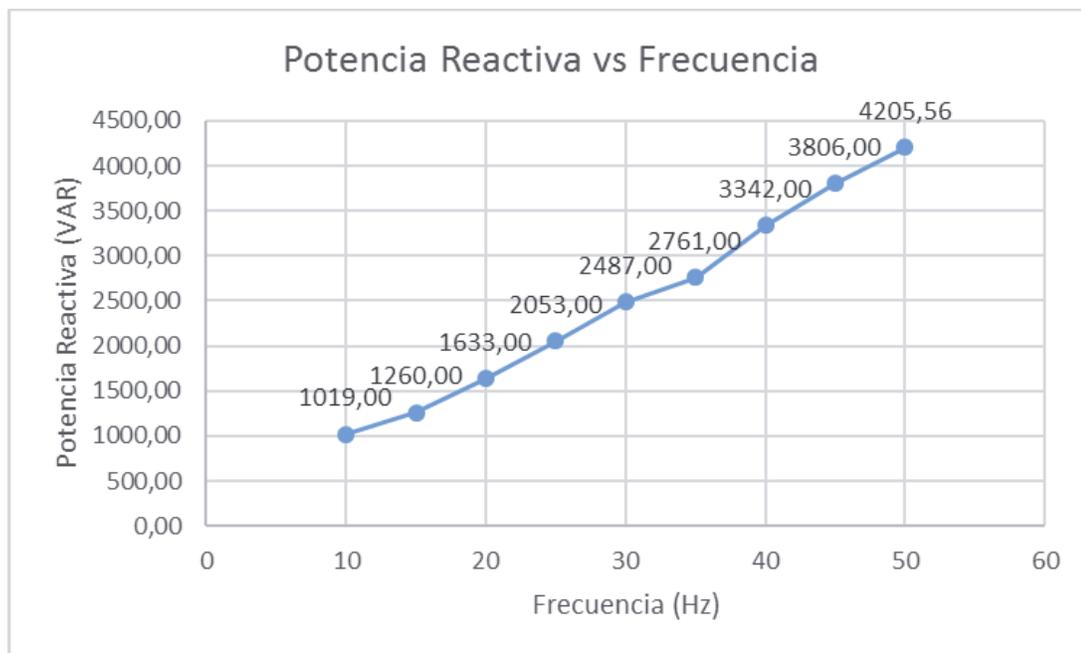


Figura 3-30 Gráfico Potencia reactiva vs Frecuencia para un torque cuadrático

Se puede observar que la potencia reactiva se comporta de manera lineal debido a la ecuación 3-6

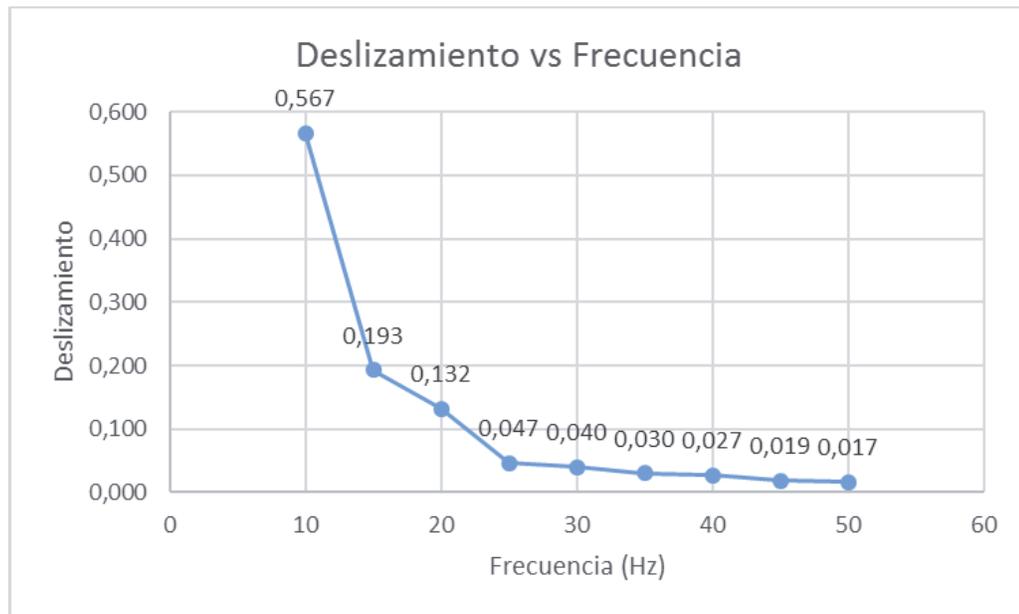


Figura 3-31 Gráfico deslizamiento vs Frecuencia para torque cuadrático

A medida que disminuye la frecuencia el deslizamiento va aumentando significativamente ya que al bajar la frecuencia el motor tiene más problemas para mover la carga por sus características

3.5.2 Ahorro de Energía

Tabla 3-18 Ahorro energético

Frecuencia (%)	Torque (%)	Potencia (%)
1	1,00	1,00
0,9	0,86	0,78
0,8	0,72	0,58
0,7	0,59	0,42
0,6	0,49	0,30
0,5	0,40	0,20
0,4	0,32	0,13
0,3	0,26	0,08
0,2	0,22	0,04

Con la tabla se puede deducir que, si se baja la velocidad al 80% del rpm del motor, esto significa que disminuye un 72% del torque y 58% de la potencia activa (consumo). A su vez si se disminuyen un 50% del rpm, resulta que disminuye un 40% del torque y 20% de la potencia activa (consumo). Finalmente, si se baja un 20% la velocidad, el torque disminuye a un 22% y la potencia activa (consumo) en un 4%.

Entonces, a medida que disminuye la frecuencia, la potencia activa (consumo) disminuye de una manera más rápida que el torque, por esto, utilizar un variador de frecuencia para accionar un motor acoplado una carga con torque cuadrático permite significativamente el ahorro energético utilizando el VDF a través de distintas Frecuencias.

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

4.1 Configuración y uso del Variador de Frecuencia SD700

El Variador de frecuencia SD700, cuenta con un módulo de interfaz para la interacción del usuario con el control directo del motor. El módulo se encuentra compuesto por un display, donde se muestra la información, 3 leds que informan el estado del variador de frecuencia y también seis botones para la programación y manipulación del equipo.



Figura 4-1 Panel de Control

- Leds: El primer Led nombrado "ON", al encontrarse encendido indica que el variador de frecuencia se encuentra energizado y en condiciones de operar. El Led nombrado "RUN", indica que el motor se encuentra funcionando o girando, debido al suministro de energía

por parte del variador de frecuencia. Y el Led nombrado “FAULT”, indica todo tipo de falla asociada a las protecciones del variador de frecuencia, que resguardan el equipo, motor y la red.

- **Display:** La pantalla cuenta con 4 líneas de información, donde la primera no es modificable y muestra el estado del variador de frecuencia, el valor de la corriente que está entrando al motor y también el porcentaje de frecuencia que está suministrando en relación al valor nominal de la frecuencia de la red. La segunda y tercera línea son de visualización, es decir, el usuario puede modificarlas para obtener mediciones en relación a los parámetros del equipo, del motor o externos. Entre estos parámetros, se puede medir la frecuencia en la entrada, tensión y corriente en la entrada, tensión en el Bus CC, temperatura de los IGBTs, velocidad sincrónica, frecuencia de salida, tensión y corriente de salida, torque en la máquina, etc. Y la cuarta línea es netamente de programación, donde se puede manipular la velocidad que se necesita en la máquina, los datos de placa del motor a conectar, las rampas de aceleración y deceleración, el tipo de control, las entradas y salidas análogas/digitales, etc.
- **Pulsadores:**
 1. (*): Este botón tiene 2 funcionamientos, el primero se usa para poder ingresar en los menús de programación o visualización de parámetros, y el segundo uso, manteniendo presionado (*) junto a (-) o (+) se podrán modificar los valores en la programación de referencias.
 2. (-): También cuenta con 2 funciones. Se utiliza para retroceder en el cambio de las opciones en los menús y también para disminuir los valores programados en las referencias.
 3. (+): Al igual que el anterior, cuenta con 2 funciones. Pero se utiliza para avanzar en el cambio de las opciones en los menús y también para aumentar los valores programados en las referencias.
 4. (ESC): Es utilizado para salir de las opciones de programación y también al mantenerlo presionado se utiliza para el desplazamiento vertical en las líneas del display
 5. (START): Es utilizado para dar marcha al motor en base a una rampa de aceleración programada en el equipo.
 6. (STOP/RESET): Es utilizado para detener el motor, mediante una rampa programada de deceleración. Y también se utiliza para resetear el equipo al momento de ser activada una protección por alguna falla. Ya que el VDF queda bloqueado, sin poder dar marcha nuevamente al motor.

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

Las siguientes imágenes muestran diferentes situaciones en la manipulación el Variador de frecuencia:

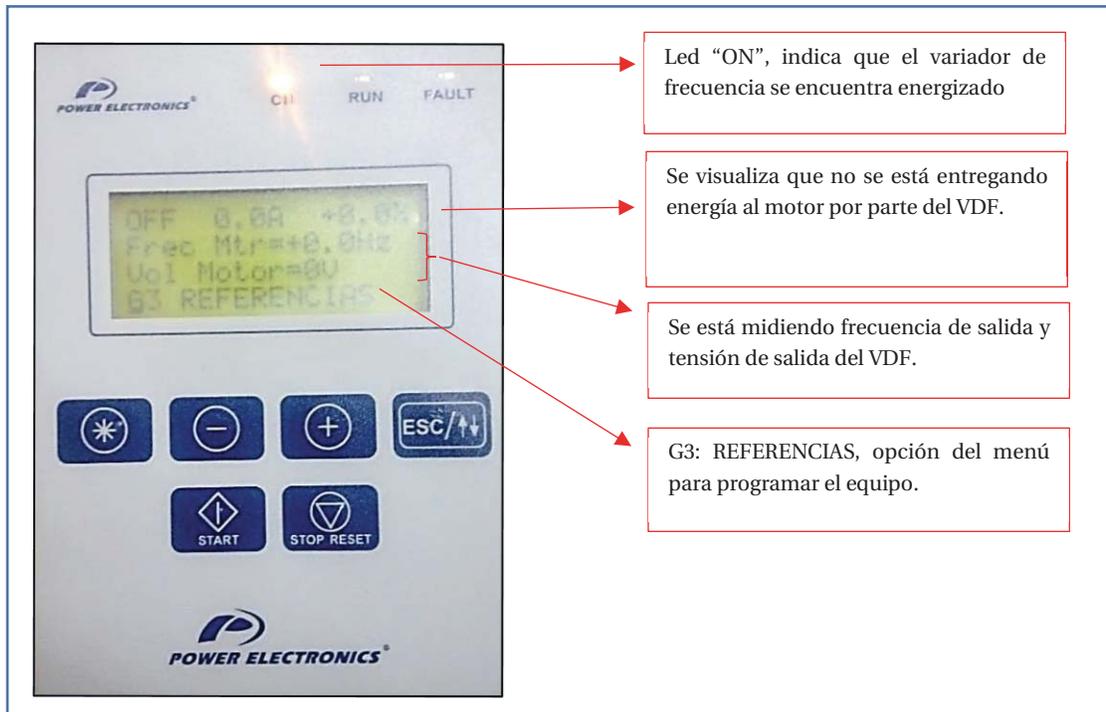


Figura 4-2 Configuración Panel de Control 1

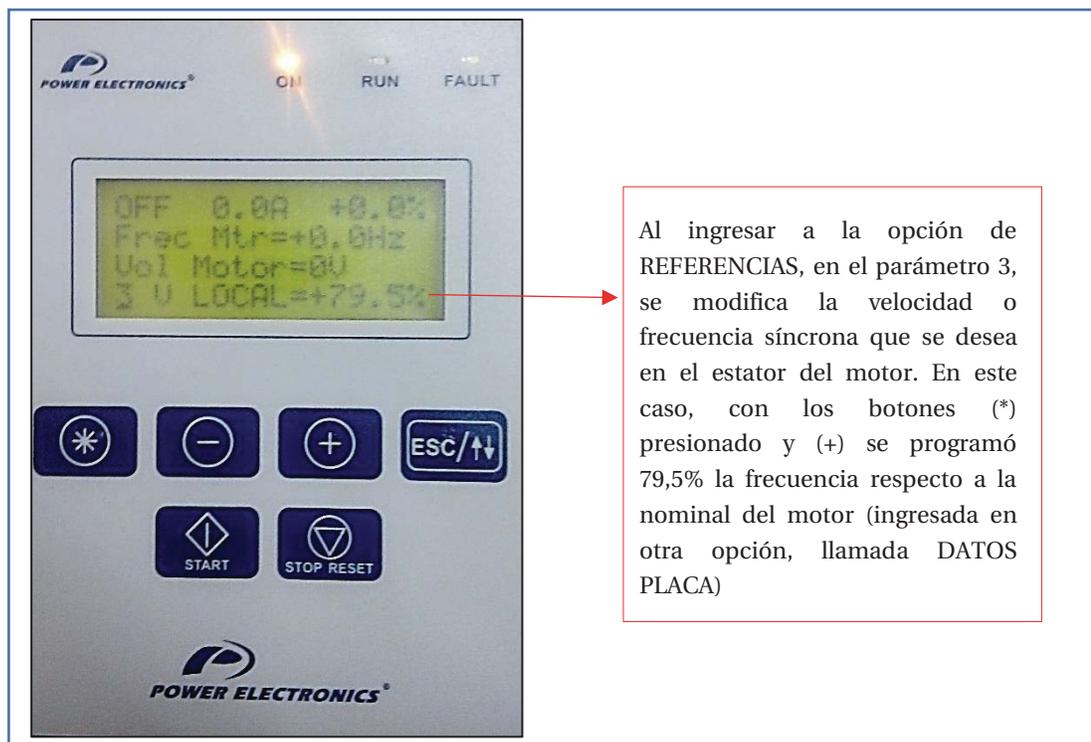


Figura 4-3 Configuración Panel de Control 2

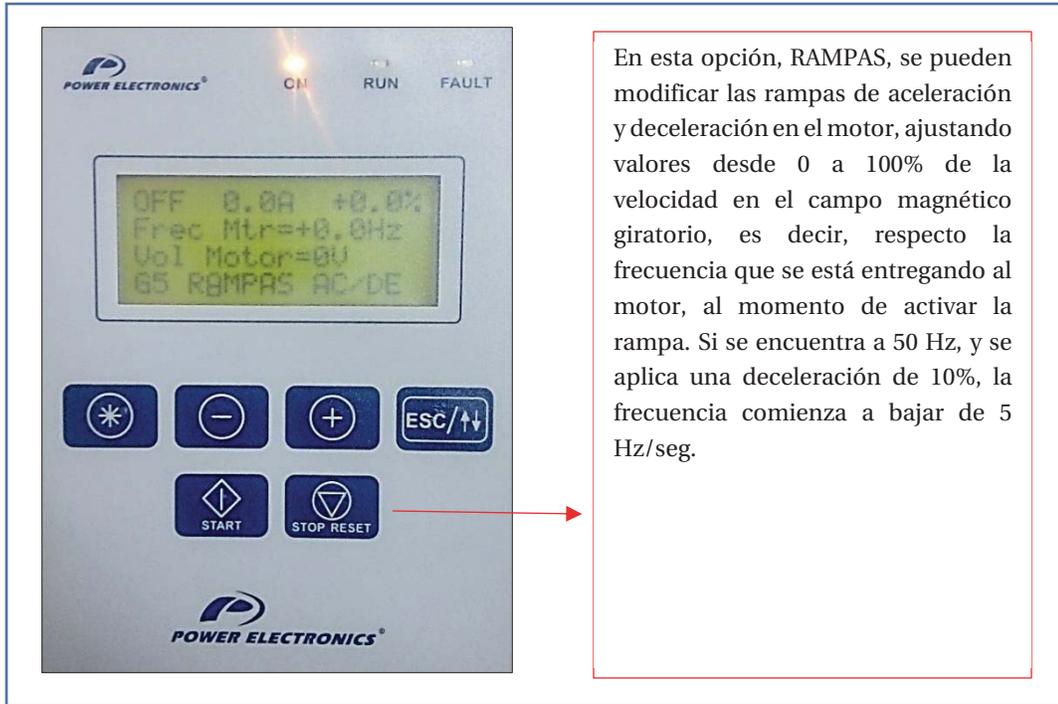


Figura 4-4 Configuración Panel de Control 3

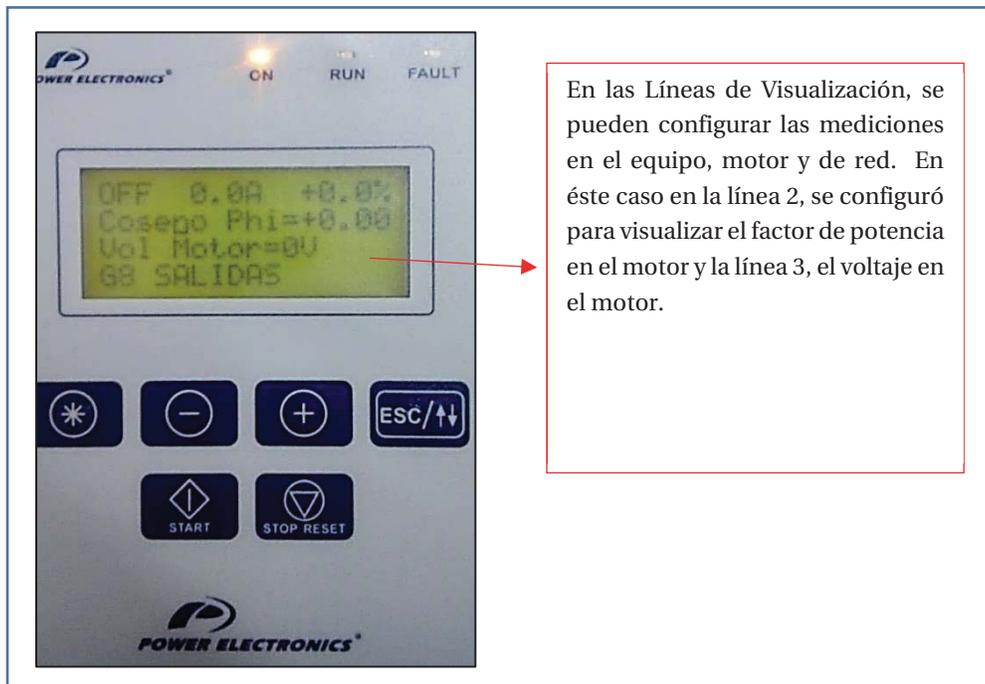


Figura 4-5 Configuración Panel de Control 4

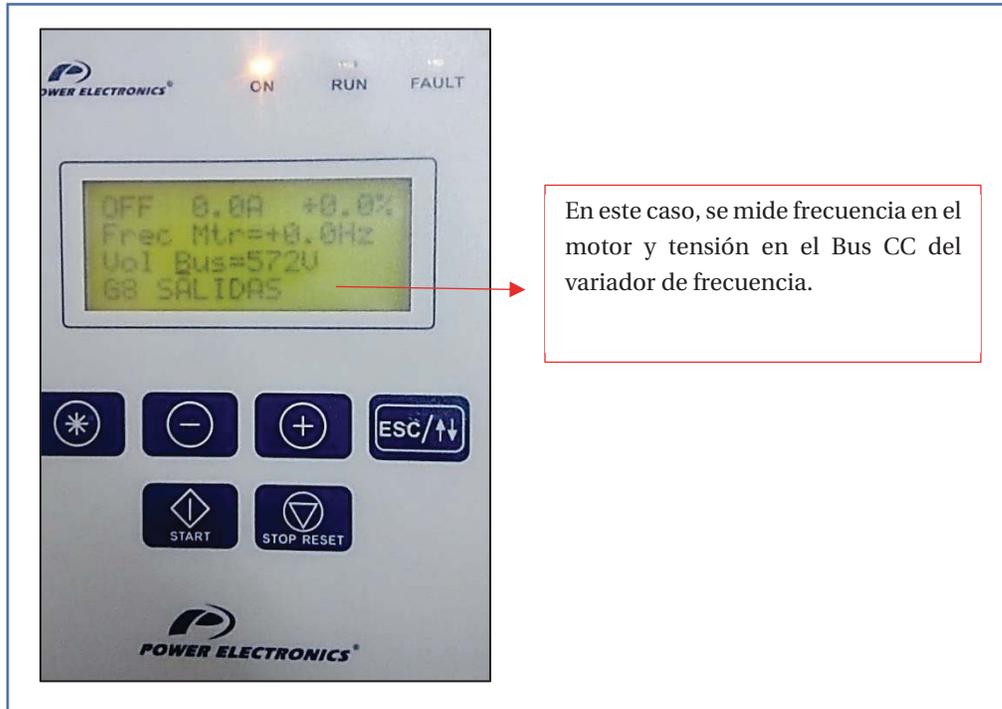


Figura 4-6 Configuración Panel de Control 5

4.2 Mediciones del Comportamiento del Motor a Diferentes Cargas

Para reconocer el comportamiento del motor de inducción conectado al Variador de Frecuencia SD700, se realizará un procedimiento simple, con el objetivo de obtener mediciones de diferentes parámetros del VDF y motor, los cuales serán la corriente y tensión eficaz en la salida del variador de frecuencia, frecuencia, velocidad sincrónica, velocidad del rotor, potencia consumida en el motor, factor de potencia, etc.

Tales mediciones serán obtenidas mediante un equipo de medida llamado SAMTE y también con la ayuda del display del VDF, para corroborar los valores medidos.

A continuación, se presenta un diagrama de bloques, indicando cómo se deben conectar los instrumentos para efectuar las mediciones.

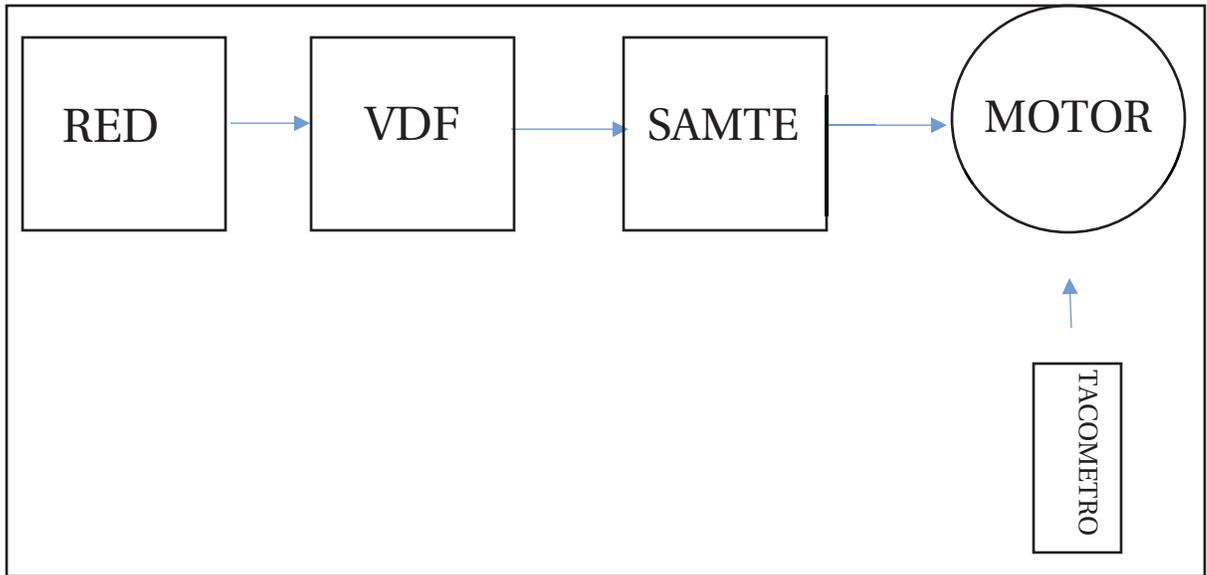


Figura 4-7 Conexión de instrumentos para mediciones

En el diagrama de bloques representa de forma simple los instrumentos utilizados para la medición de los parámetros. En la siguiente figura se muestra de forma más detallada la conexión de los instrumentos.

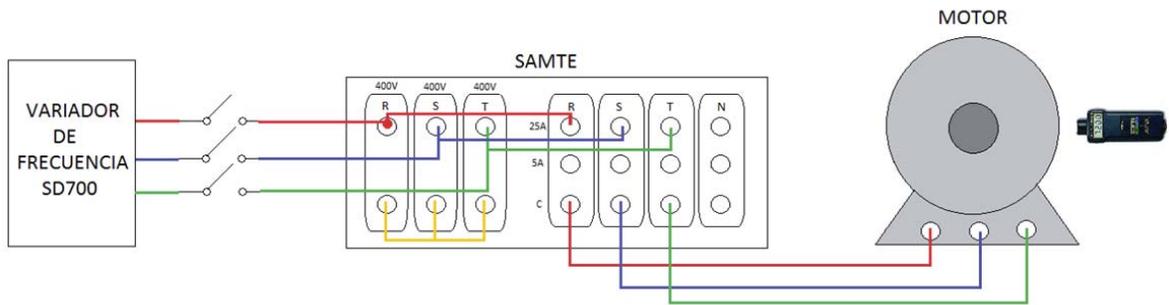


Figura 4-8 Esquema de Conexiones de Equipos de Medida

También se muestran imágenes de referencia, para identificar las conexiones físicas de los instrumentos de medida:

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700



Figura 4-9 Instrumentos y máquinas utilizadas en los ensayos



Figura 4-10: Conexión real de SAMTE

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

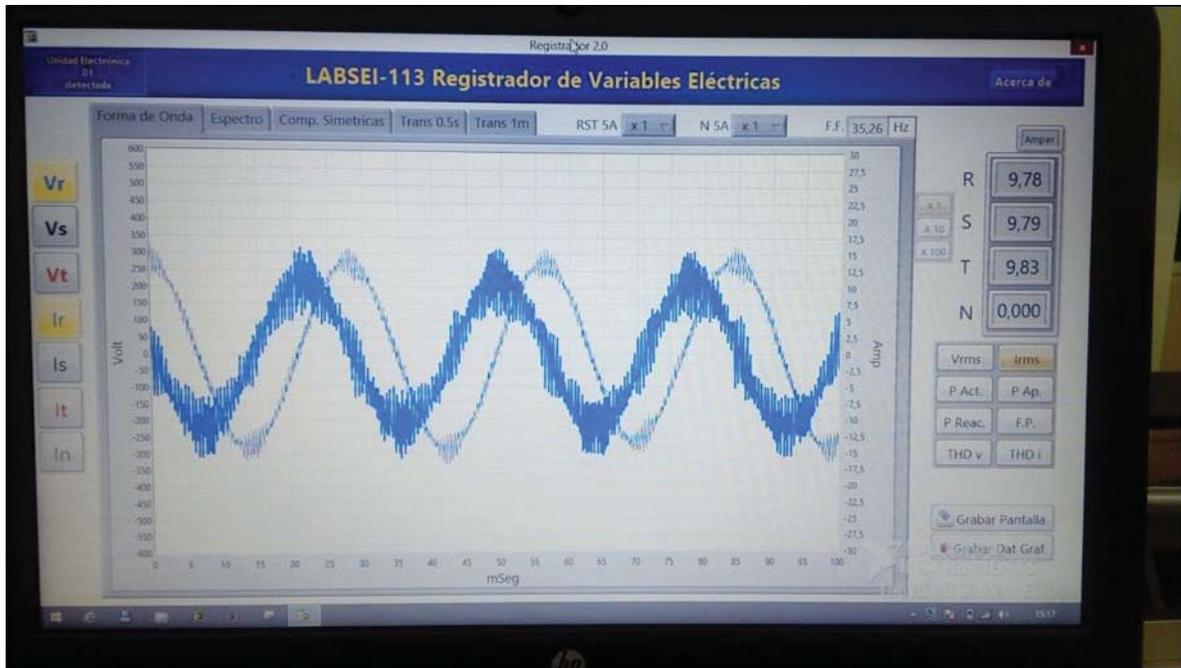


Figura 4-11: Módulo de mediciones SAMTE

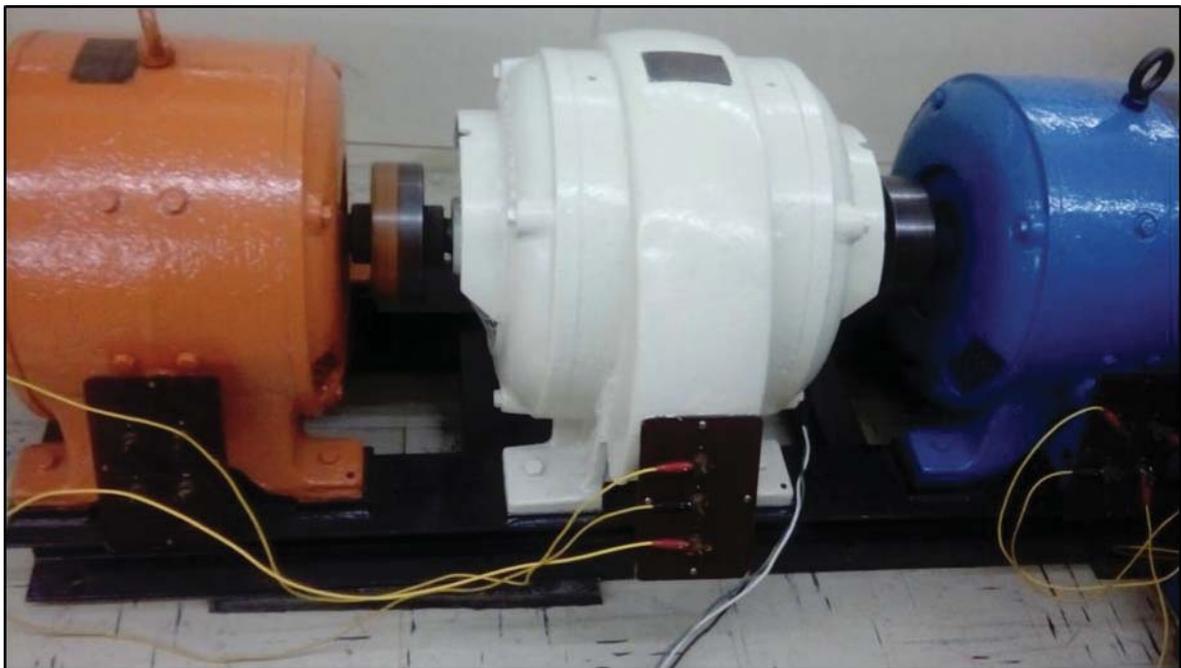


Figura 4-12: Máquina de Inducción Utilizada y Conexión



Figura 4-13: Medición con Tacómetros la velocidad del rotor

El procedimiento de mediciones consiste en ajustar el variador de frecuencia, según las instrucciones indicadas anteriormente (En línea 4 de programación, desplazar a G3: REFERENCIAS, y luego escoger V LOCAL para ajustar el porcentaje de la frecuencia en la salida del VDF, en relación a la frecuencia nominal de la máquina. Considerando intervalos de 5 Hz.

Con la ayuda del instrumento SAMTE, se podrá medir la corriente eficaz, tensión eficaz, potencia, factor de potencia por fase. Y con el tacómetro se medirá la velocidad real en el rotor de la máquina. Por tanto, es posible ingresar en Excel un registro de las mediciones nombradas anteriormente, en base a las magnitudes de frecuencias programadas en el variador de frecuencia.

Al tener este registro, se podrá observar los valores a frecuencia nominal, también calcular el deslizamiento para diferentes frecuencias y observar las mediciones el Variador de Frecuencia.

4.3 Medición del Ensayo en Vacío del Motor

El procedimiento consistió en realizar las conexiones y procesos de forma adecuada para obtener una medición en vacío ideal y registrar parámetros de interés, para efectuar los cálculos de los parámetros internos del motor, referidos a la rama magnetizante.

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

Por tanto, la conexión del equipo de medida SAMTE, se realizará de igual forma entre el VDF y el motor de inducción.

Para este caso, se pondrá en marcha la Máquina de CC que se encuentra acoplada en el eje con el Motor de Inducción. Para esto, se energizará el estator y rotor con dos fuentes de tensión continua independientes. A continuación, se explica el procedimiento que se debe realizar:

1. Primeramente se energizará el Estator, con una fuente continua variable, ajustando una corriente de campo hasta de 3 [A].
2. Luego se introducirá una tensión continua en los terminales del rotor, tomando en cuenta que el giro debe ser en el mismo sentido respecto al giro del motor de Inducción conectado al variador de frecuencia.
3. La tensión se incrementará y con un Tacómetro se medirá la velocidad del eje del motor CC. Al llegar a 1500 [RPM], se dejará de aumentar la tensión.
4. Al encontrarse en la velocidad nominal del motor, se activará el Variador de Frecuencia para energizar el motor de Inducción. Con esta condición, se evita el transitorio del arranque.
5. El Variador de frecuencia se debe ajustar para entregar tensión y frecuencia nominal del motor, en este caso 380 [V] y 50 [Hz].
6. Luego se procederán a realizar las mediciones de Voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.
7. Con los datos anteriores, se deben realizar los cálculos correspondientes, para obtener los parámetros internos de la rama magnetizante del motor.

A continuación, se ilustran imágenes y diagramas de cómo se deben efectuar las mediciones y conexiones de las máquinas.

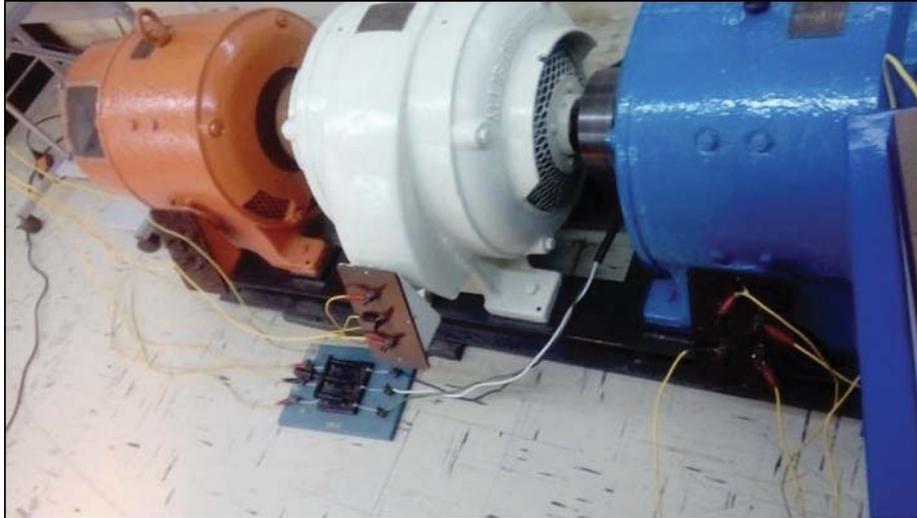


Figura 4-14: Máquina de inducción y de Corriente continua acopladas

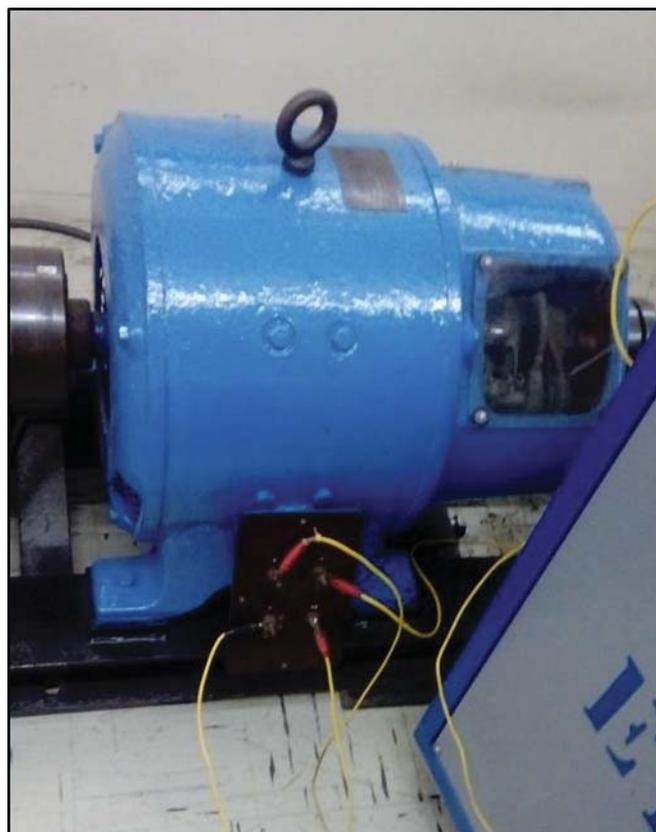


Figura 4-15: Máquina de CC, con sus respectivas conexiones



Figura 4-16: Fuentes de CC, para energizar la máquina de Corriente Continua



Figura 4-17: Amperímetro para verificar la corriente en el Estator de la máquina

4.4 Medición Ensayo de Rotor Bloqueado

La medición se ejecuta con la finalidad de obtener los parámetros internos del motor, tanto la resistencia del cobre y reactancias de dispersión. Por tanto, el procedimiento es el siguiente:

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

Debido que en el Laboratorio de Maquinas Eléctricas no se cuenta con los mecanismos necesarios para bloquear el rotor del motor de Inducción estudiado, se realizará una práctica artesanal, ya que, con un palo de madera resistente, se ejercerá presión sobre el rotor de tal manera que se impedirá el giro.

En relación a las condiciones que se deben cumplir para el ensayo de rotor bloqueado, se debe regular la tensión levemente hasta que la corriente en el motor alcance su valor nominal. Para el caso del laboratorio no es posible, debido que la corriente nominal del motor es de 38 [A] y las protecciones de la fuente variable son de 25 [A], por tanto, se deberá realizar el ensayo a 25 [A]. A continuación, se presenta un listado de los procedimientos que se deben realizar para ejecutar el ensayo.

1. Bloquear el eje del motor de Inducción, con un palo de madera resistente o mecanismo que no permita el movimiento del rotor.
2. Conectar la fuente trifásica variable directa a los terminales del Motor de Inducción.
3. Activar el interruptor general de la fuente variable y luego la protección de AC, con el respectivo pulsador verde.
4. Con la ayuda de amperímetros y voltímetros medir la tensión y corriente aplicada al motor.
5. Comenzar a girar levemente la perilla de la fuente variable hasta obtener una corriente cercana a 25 [A].
6. Efectuar mediciones con SAMTE, de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.

A continuación, se ilustran imágenes y diagramas de cómo se deben efectuar las mediciones y conexiones de las máquinas.



Figura 4-18: Bloqueo del rotor con palo de madera



Figura 4-19: Fuente utilizada para incrementar progresivamente la tensión AC

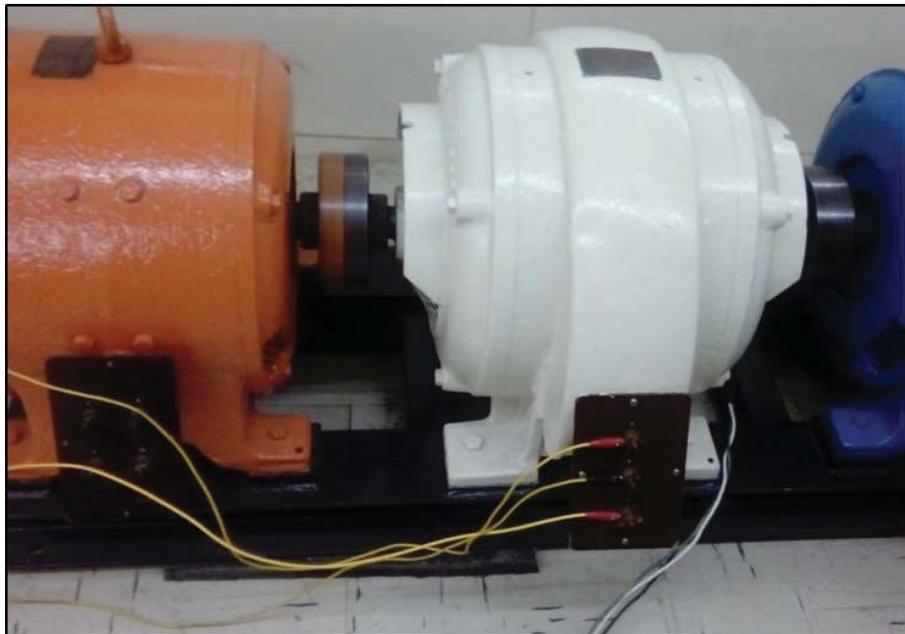


Figura 4-20: Motor de Inducción conectado a la Fuente AC Variable

4.5 Medición con Diferentes Cargas Resistivas

Este experimento consiste en realizar pruebas variando la frecuencia del motor y/o las cargas resistivas del generador para poder analizar, comprender y comparar el comportamiento del motor de inducción con distintas cargas.

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

Por lo tanto, se conecta de igual forma que en los experimentos anteriores el VDF SD 700 con el equipo de medida SAMTE, luego este último se conecta al motor de inducción.

Con respecto al Generador de Corriente Continua con excitación independiente que se encuentra acoplado al Motor de Inducción se conecta mediante 2 Procedimientos:

- Energizar la rama de excitación
- Conectar el Generador a la carga Resistiva

Energizar la rama de Excitación

1. Se conecta a la red y se configura la “FUENTE EIE” para que pueda entregar un Voltaje en corriente continua.
2. El positivo se conecta en serie con un amperímetro de 5 [A] o 10 [A].
3. La salida del amperímetro se conecta con el Borne “A”.
4. El negativo de la FUENTE EIE se conecta al Borne “HB”.

Conectar el Generador a la carga Resistiva

1. Conectar el borne “C” al borne positivo del banco de resistencias.
2. Conectar el borne “D” al borne negativo del banco de resistencias.

Finalmente, para este experimento las máquinas y equipos quedan conectados de la siguiente manera:



Figura 4-21: Equipos y carga conectada al generador CC

Luego de haber realizado todas las conexiones tanto del motor de inducción con el VDF SD700 y las conexiones del Generador CC se procede a poner en marcha el experimento de la siguiente manera:

1. Aumentar el voltaje de la FUENTE EIE lentamente hasta que el amperímetro marque una corriente de campo de 3 [A].



Figura 4-22: Fuente CC Variable con amperímetro para registrar Corriente en Campo

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

2. Poner en marcha el variador de frecuencia a velocidad nominal



Figura 4-23: Manipulación de VDF

3. Variar la carga y/o Frecuencia según como lo desee el usuario



Figura 4-24: Carga Resistiva Conectada

4. Registrar los datos obtenidos del SAMTE (Voltaje, Corriente, Potencia activa y reactiva) y del tacómetro y realizar un análisis y comparaciones de los resultados.



Figura 4-25: Equipos SAMTE´s para mediciones de variables

4.6 Medición de Regeneración

Para identificar y medir el fenómeno de regeneración, causado por el flujo de potencia activa en sentido contrario (desde el motor al variador de frecuencia). Se utilizó un software asociado al VDF SD700, llamado PowerComms. En la siguiente imagen se aprecia la conexión para las mediciones de curva en el Bus CC, velocidad y corriente.



Figura 4-26: Conexión de Computador por cable UDB con VDF SD700

Para realizar las mediciones, se realiza el siguiente procedimiento:

1. Instalar software PowerComms
2. Conectar cable de VDF al USB del computador.
3. Abrir programa y crear un nuevo documento, con un nombre aleatorio.
4. Luego en la Barra superior, seleccionar Herramientas/Opciones.
5. En Tipo de conexión escoger “Serie” y en Puerto seleccionar “COM8”.

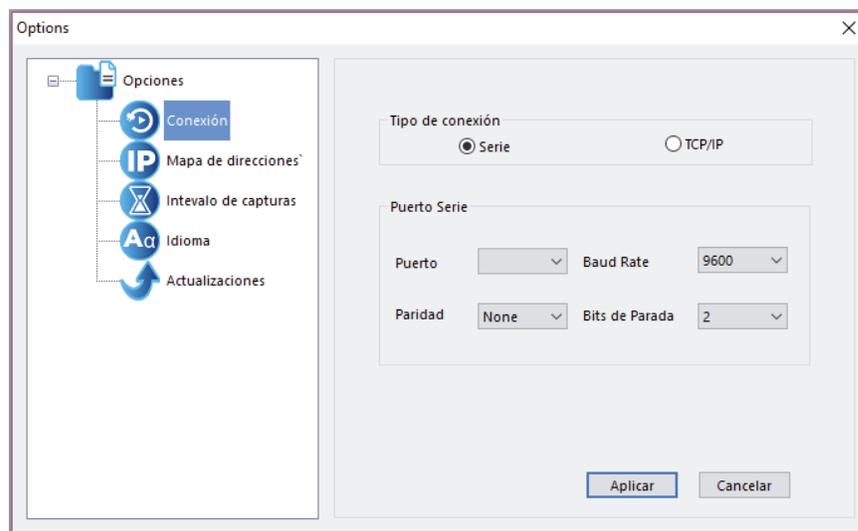


Figura 4-27: Configuración de Conexión de VDF a PC

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

6. Sobre el archivo creado, llamado SD700, se debe hacer clic derecho y presionar en “Agregar dispositivo”. Abriendo la siguiente ventana:



Figura 4-28: Configuración para agregar Dispositivo VDF

7. En la ventana se debe agregar el nombre del dispositivo a conectar (en este caso el Variador de frecuencia SD700) y en la Revisión, se debe escoger la versión SD7_A2.3.1, las otras barras se deben dejar predeterminadas.
8. En la columna izquierda se deberá visualizar lo siguiente:

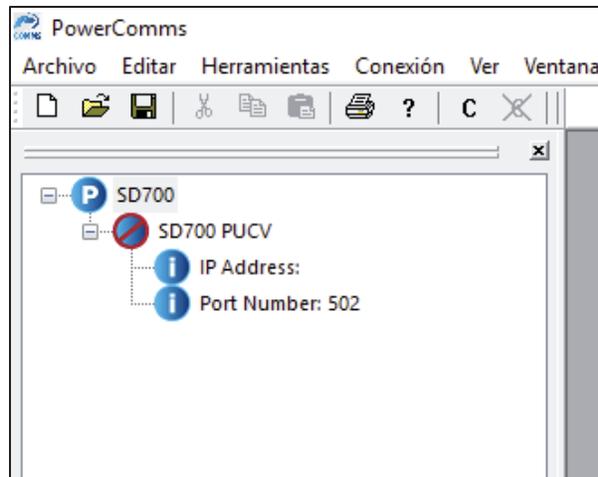


Figura 4-29: Visualización de pestañas

4 Protocolo de Mediciones del variador de frecuencia SD 700

9. Teniendo el dispositivo agregado, se debe presionar en la barra superior, en la opción “Conexión” → “Conectar”
10. Luego al conectar, se debe abrir la pestaña “Gráficas”
11. Presionar en Configuración. En esta opción se podrán elegir las variables que se desean medir, con respecto al motor, equipo, externo, etc.

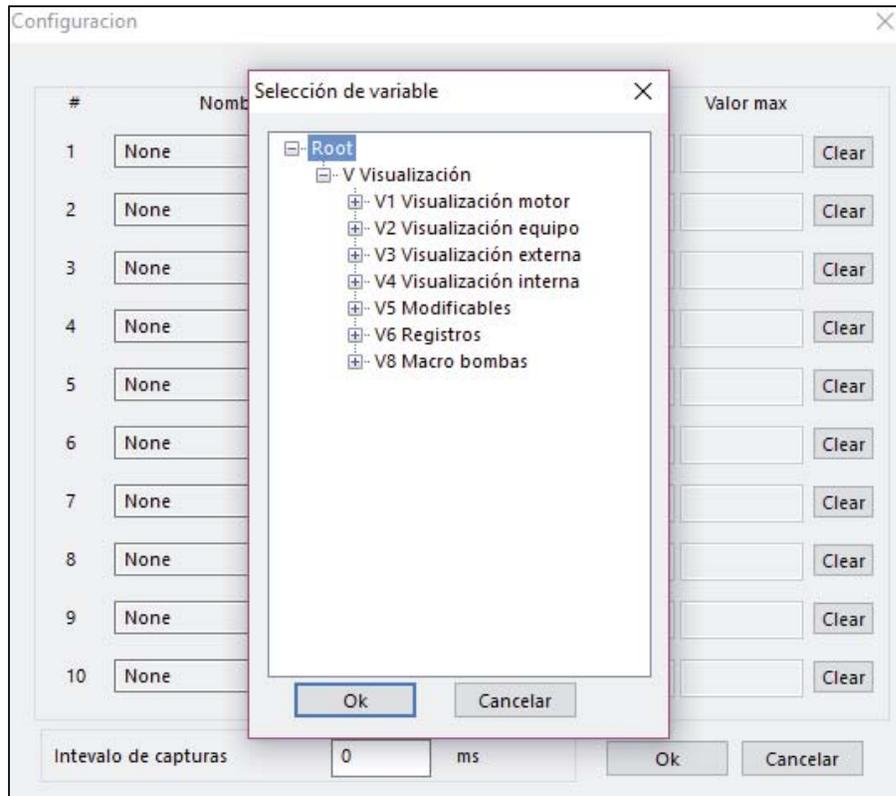


Figura 4-30: Visualización de pestañas

12. Al seleccionar las variables que se desean medir, se deben configurar los rangos en las cuales se encontrará la medición.

Configuración

#	Nombre de pantalla	Valor min	Valor max	
1	Voltaje del bus	500.00	900.00	Clear
2	Velocidad motor	0.00	1500.00	Clear
3	Corriente motor por U	0.00	20.00	Clear
4	None			Clear
5	None			Clear
6	None			Clear
7	None			Clear
8	None			Clear
9	None			Clear
10	None			Clear

Intervalo de capturas: 2000 ms

Ok Cancelar

Figura 4-31: Configuración de Variables a medir

13. Por último, se debe presionar el botón “Marcha” y en el módulo físico del variador, se debe presionar “START” para energizar el motor y se registrará la medida en el software.
14. Medidas obtenidas de alza de tensión en el Bus CC y actuación de protección por sobretensión.

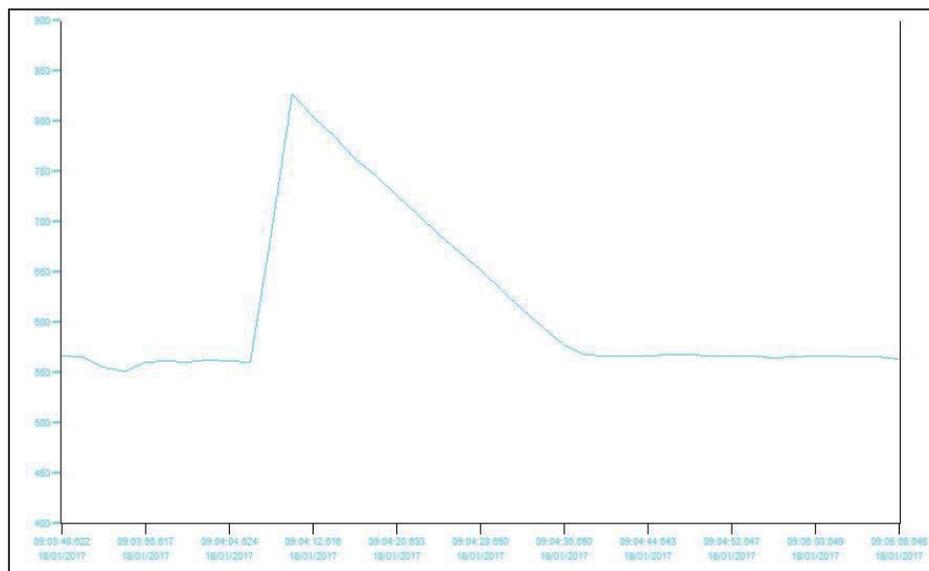


Figura 4-32: Medición de alza de Voltaje en Bus CC

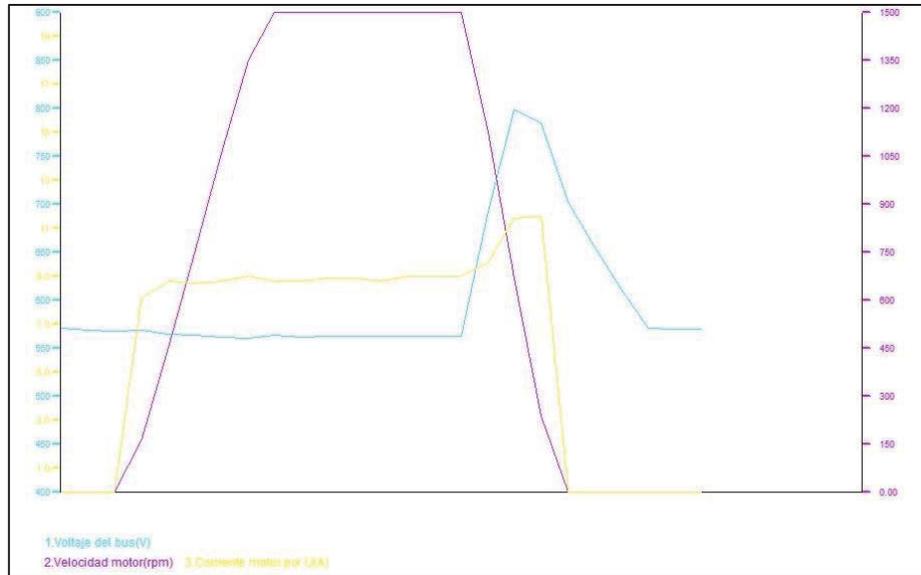


Figura 4-33: Medición de alza de Voltaje en Bus CC., Corriente y velocidad Motor

4.7 Ejemplo para mediciones futuras

Para realizar una adecuada medición siempre es bueno poseer los instrumentos que se van a utilizar:

- Amperímetro de 10 [A]
- Tacómetro
- SAMTE
- FUENTE EIE

Luego de tener todos los instrumentos y equipos a mano se procederá a utilizar el protocolo de mediciones en la sección de “Mediciones del Comportamiento del Variador de Frecuencia SD700 conectado a un Motor de Inducción acoplado a un generador cc con diferentes cargas resistivas”

Posteriormente de tener todo conectado y listo para funcionar, se dejará bien explicado los experimentos que se van a realizar.

Los experimentos son los siguientes:

- Aplicar 6 cargas resistivas al Generador con el Motor de inducción accionado a 40 Hz
- Carga Resistiva fija, variando la Frecuencia entre 10 Hz y 50 Hz

4.7.1 Cargas Resistivas a 40 Hz

Para comenzar este experimento, el VDF se configura para que accione el motor de inducción a 40 Hz, posteriormente se comienza a variar la resistividad del banco de resistencias (prendiendo y apagando ampolletas).

Para este caso, se logró variar la resistencia, lo cual provocó 6 torques distintos:

- Carga 1: 2,94 Nm
- Carga 2: 4,13 Nm
- Carga 3: 5,33 Nm
- Carga 4: 6,46 Nm
- Carga 5: 7,51 Nm
- Carga 6: 8,78 Nm

Luego se acciona el motor aplicando los 6 tipos de torques distintos los cuales entrega los siguientes resultados:

Tabla 4-1: Resultados a 40 Hz

	Torque (Nm)	Irms (A)	P activa (W)	FP (-)	P. en la carga (W)	Velocidad RPM
Carga 1	2,94	9,9	370	0,21	0	1198
Carga 2	4,13	10	516	0,28	459	1193
Carga 3	5,33	10,33	667	0,36	888	1192
Carga 4	6,46	10,6	808	0,41	1268	1191
Carga 5	7,51	11,1	939	0,47	1566	1191
Carga 6	8,78	11,5	1097	0,53	2043	1188

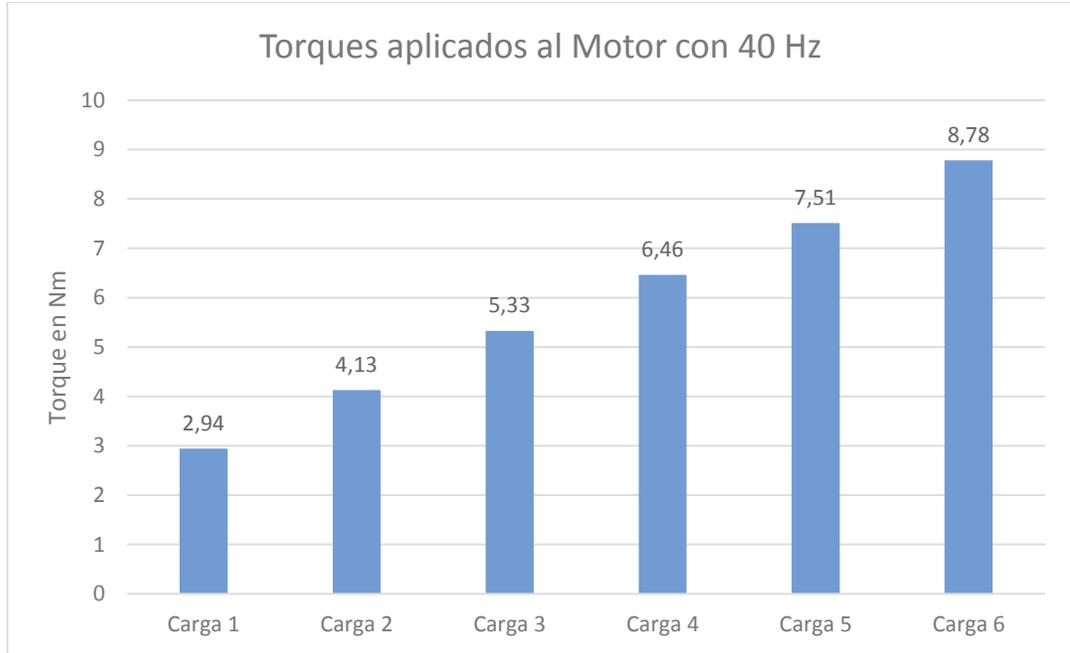


Figura 4-34: Gráfico de Torques aplicados al Motor con 40 Hz

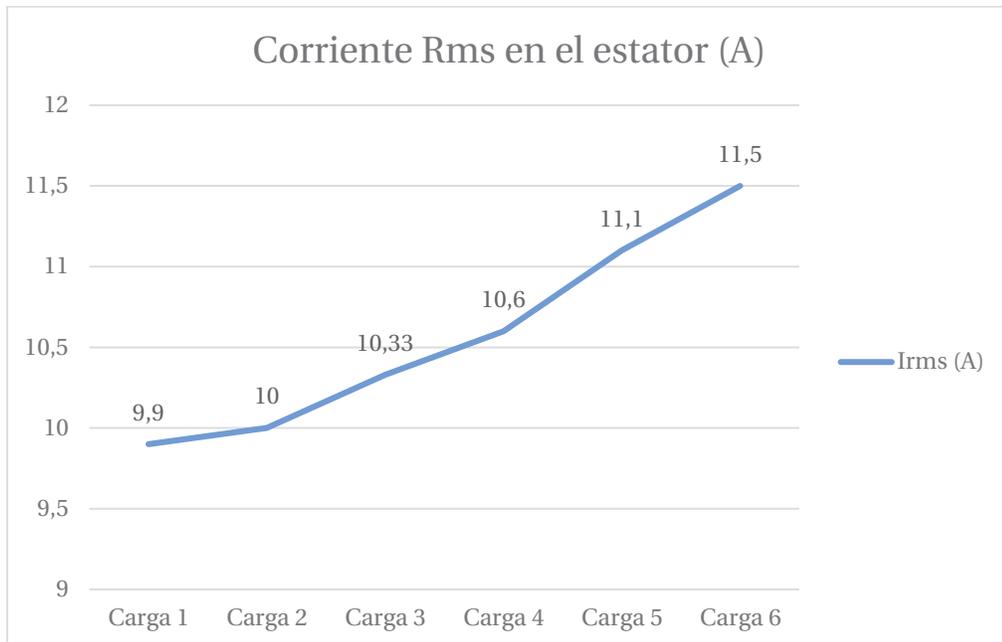


Figura 4-35: Gráfico de Corriente Rms en el estator

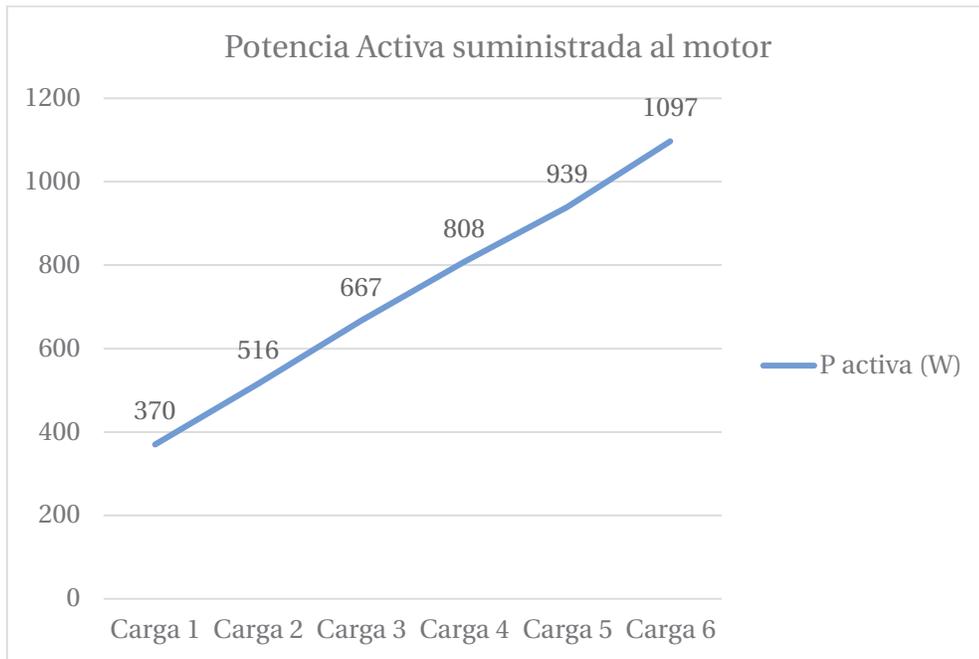


Figura 4-36 : Gráfico de Potencia Activa suministrada al Motor

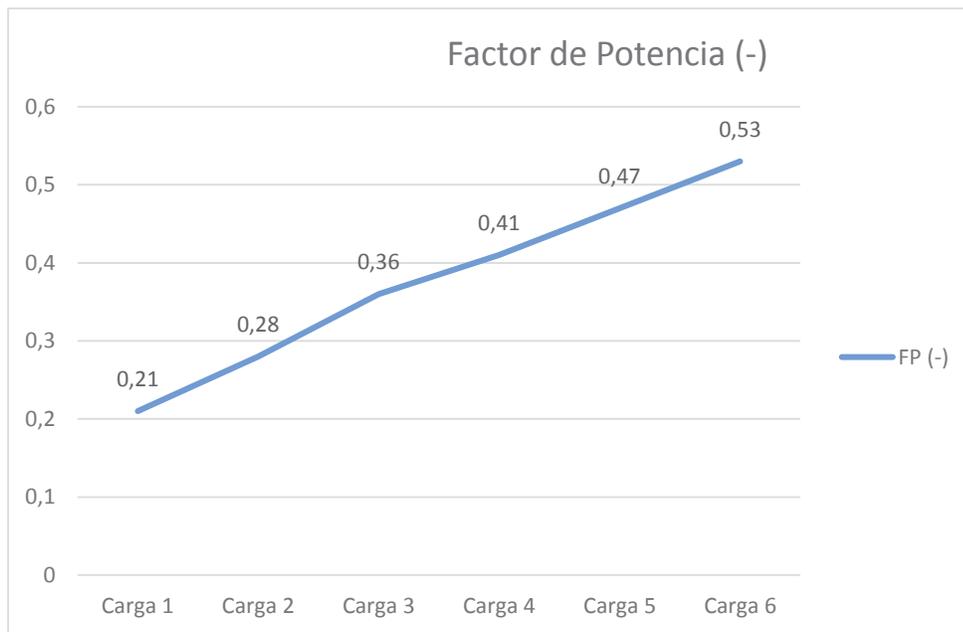


Figura 4-37: Gráfico de Factor de Potencia del motor

4.7.2 Carga Resistiva fija y variando la frecuencia entre 10 y 50 Hz

Para este experimento se utilizará un banco de ampollas sin variar la carga (se dejarán todas las ampollas durante todo el experimento). Posteriormente se realizará el ensayo variando la frecuencia en 5 Hz entre 50 y 10 Hz.

Los resultados se aprecian mediante la siguiente tabla:

Tabla 4-2: Resultados de carga fija con frecuencia variable entre 10 Hz y 50 Hz

Frecuencia (Hz)	Voltaje(v)	Corriente (A)	P Activa (W)	Velocidad (RPM)	Torque
50	225	12,2	1550	1488	9,95
45	203	11,9	1330	1337	9,50
40	181	11,6	1120	1188	9,00
35	161	11,3	920	1038	8,46
30	140	11	730	884	7,89
25	118	10,8	570	740	7,36
20	97	10,6	420	588	6,82
15	74	10,2	285	440	6,19
10	51	9,9	170	292	5,56

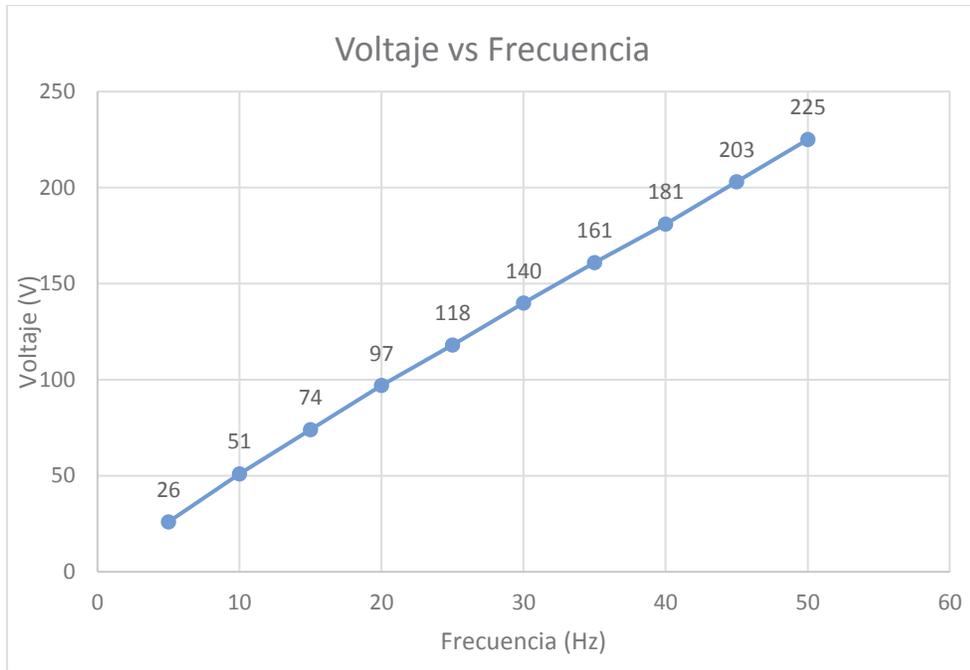


Figura 4-38: Gráfico de Voltaje vs Frecuencia

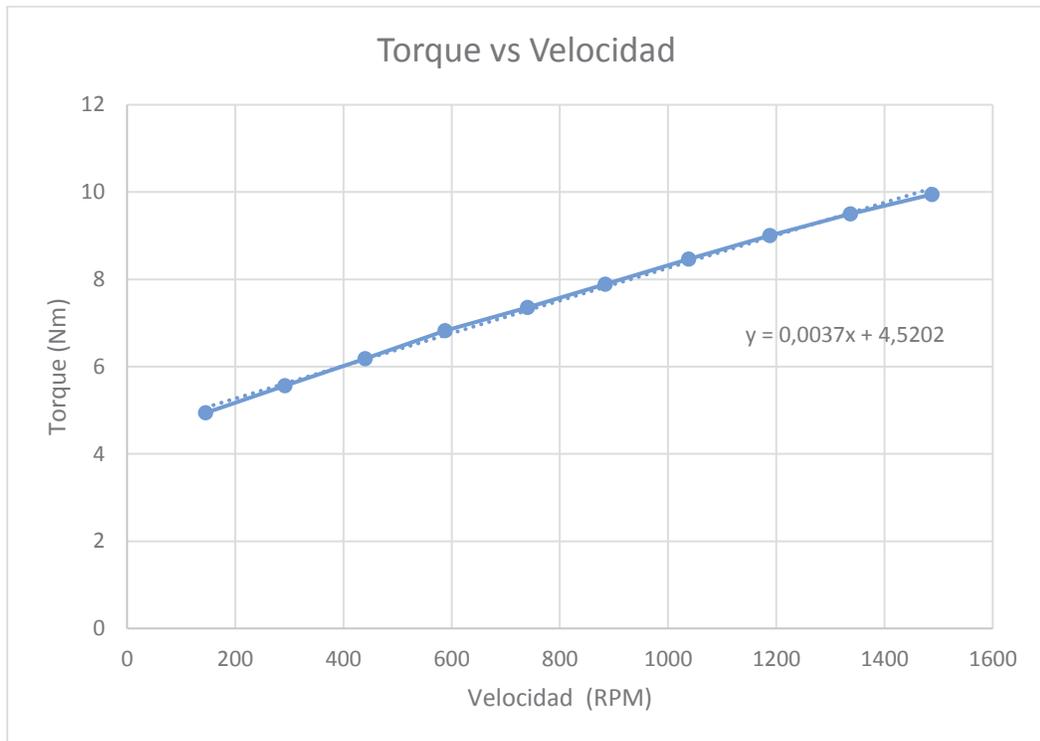


Figura 4-39: Gráfico de Torque vs Velocidad

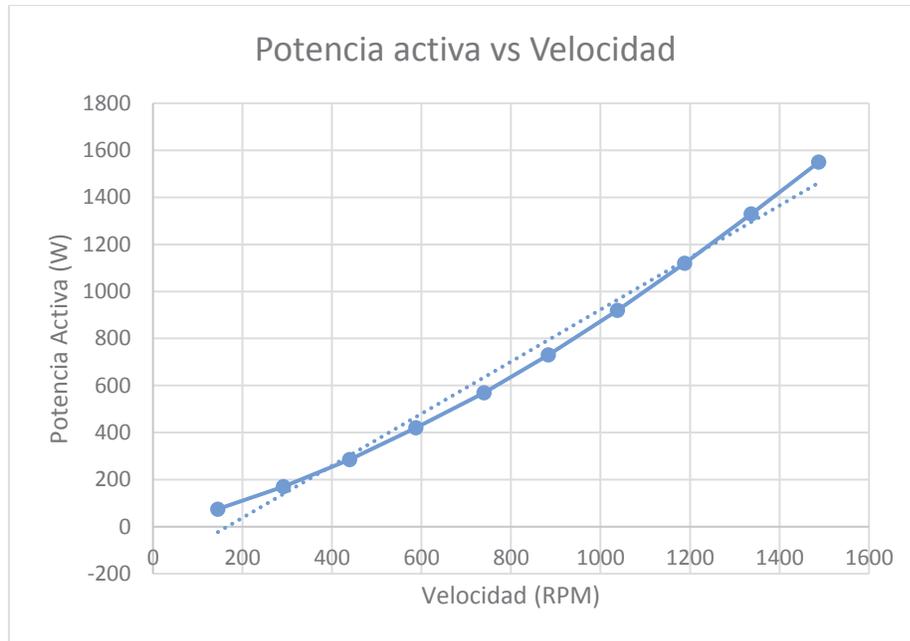


Figura 4-40: Gráfico de Potencia Activa vs Velocidad

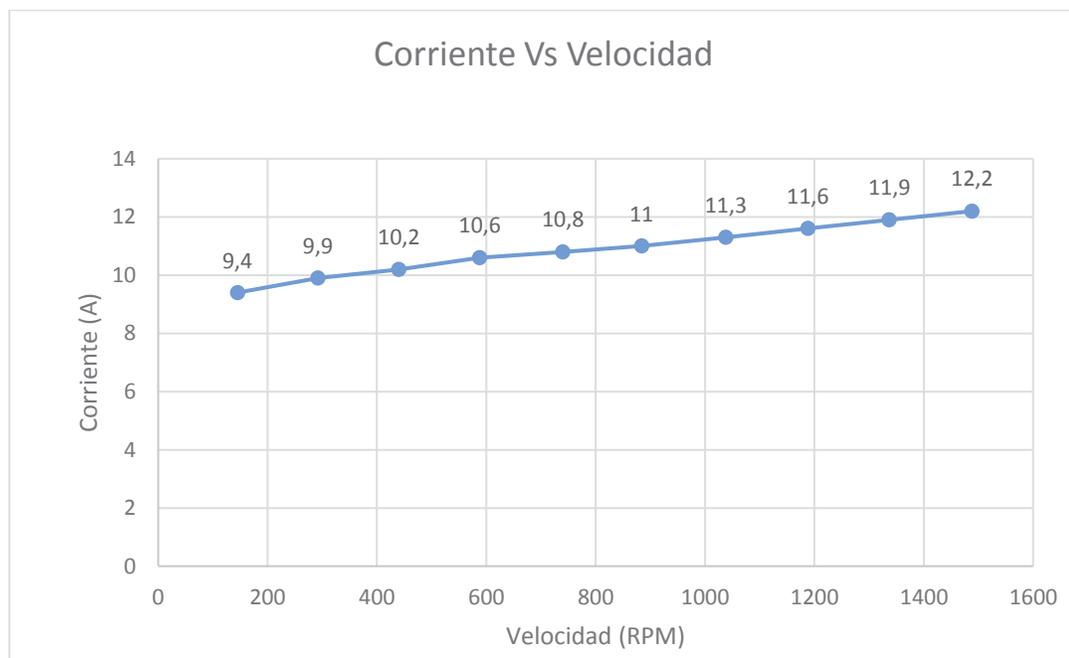


Figura 4-41: Gráfico de Corriente vs Velocidad

Ya teniendo todos los resultados mediante las tablas y gráficos se procederá a sacar las conclusiones.

Discusión y conclusiones

La presente investigación se basó en el análisis del variador de frecuencia SD 700 accionando un motor con diferentes cargas, dicho VDF está fabricado para trabajar con motores de inducción y es de gran importancia, ya que es utilizado en las industrias que necesitan el movimiento de una gran carga industrial, como por ejemplo la minería, que es el principal sustento del país.

De lo anterior también, se pudo denotar, que el contar con el variador SD 700 en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, es importante para los estudiantes de la Universidad, ya que podrán obtener conocimientos necesarios para el campo laboral, siendo un plus para los egresados.

Por otra parte, los experimentos se realizaron con el VDF acoplado a un motor de 30 Hp, fueron de mucha importancia para conocer y aprender el funcionamiento del mismo. Una de las funciones más importantes al trabajar con el variador de frecuencia SD 700, es la manipulación de las rampas de velocidad, debido a que con las mismas se puede aumentar o disminuir el tiempo de aceleración o disminución del arranque del motor, lo cual permite bajar la corriente de partida siendo una de las principales características para la implementación de un variador de frecuencia.

Luego, se realizó un ensayo acoplando el motor de 30 Hp con un generador de corriente continua conectado a un banco de ampolletas, las mediciones se realizaron mediante el SAMTE, las variables medidas fueron frecuencia, voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia y para medir la velocidad del rotor se utilizó un tacómetro. Con esas mediciones se pudo calcular el tipo de torque aplicado al motor, el cual es lineal, de la forma $AX+B$ en donde A es igual a 0,0037 y B es igual a 0,5202.

Del ensayo realizado con el motor, también se pudo apreciar el comportamiento del voltaje versus frecuencia, corriente versus frecuencia, potencia activa versus frecuencia, potencia reactiva versus frecuencia, velocidad versus frecuencia y el deslizamiento versus frecuencia. Con la gráfica obtenida del comportamiento del voltaje versus frecuencia se pudo constatar que existe una proporcionalidad entre estos dos parámetros, lo cual indica que se utilizó un control escalar, es decir, el flujo es constante.

De igual forma, con la gráfica de corriente versus frecuencia, se observó que a medida que la frecuencia disminuye también lo hace la corriente, esto indica que el motor de inducción puede trabajar a velocidades menores sin provocar mayores problemas a la red eléctrica, ya que a frecuencias bajas la corriente no aumenta. Para la potencia activa versus frecuencia, se constata que la potencia se comporta de manera cuadrática, esto indica que, a frecuencias bajas, disminuye en mayor cantidad la potencia que el torque, ya que este último es lineal.

En la gráfica de la potencia reactiva versus la frecuencia, se denota que tiene un comportamiento parabólico horizontal, esto es debido a la ecuación 3-6, debido al comportamiento de la potencia activa y el factor de potencia. Ahora para la velocidad versus frecuencia se puede observar su comportamiento lineal, dado que cuando disminuye la frecuencia de igual forma disminuye la velocidad del rotor, esto se puede constatar según la fórmula 3-8. Finalmente, en la gráfica de deslizamiento versus la frecuencia, se puede denotar que a medida que la frecuencia disminuye aumenta drásticamente el deslizamiento, esto se debe a que al disminuir la frecuencia al motor le cuesta más mover la carga, por lo que aumenta la diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad sincrónica como se puede apreciar en la fórmula 1-2.

Después, se realizaron simulaciones con el torque calculado en los ensayos, en los cuales los resultados fueron muy similares a los obtenidos en los ensayos, en donde el error de voltaje fue inferior al 3%, el error de corriente fue inferior al 6%, el error de torque fue inferior a 3%, el error de potencia fue de 11% para 10 Hz, sin embargo, para el resto de las frecuencias fue inferior al 4%, no obstante el error de deslizamiento en frecuencias bajas es demasiado grande, pero no significa que la velocidad del rotor sea muy distinta, esto se logró observar en los gráficos de comparación de torque lineal.

Luego, se realizaron simulaciones con otros tipos de torque de carga, específicamente con el torque constante de 20 Nm y un torque cuadrático de la forma AX^2+BX+C . Con respecto al torque de 20 Nm, se obtuvo como resultado una tabla comparativa en donde sus parámetros son, frecuencia, voltaje, corriente, torque, potencia activa, potencia reactiva, velocidad y deslizamiento. Lo más relevante de esta simulación es que a medida que disminuye la frecuencia, la corriente tiende a aumentar, por lo que no es muy beneficioso utilizar este tipo de torque a frecuencias bajas. Además, si la frecuencia disminuye el deslizamiento aumento de sobremanera, a pesar de esto, la velocidad del rotor se comporta de manera lineal.

No obstante, para el torque tipo cuadrático, se observa que sus resultados son bastantes beneficiosos para trabajar a frecuencias bajas, ya que a medida que disminuye la velocidad del rotor disminuye la corriente y además, la potencia disminuye de manera cuadrática, por lo que al acoplar un motor con una carga con un torque tipo cuadrático, siempre es bueno hacerlo con un variador de frecuencia ya que, al disminuir la frecuencia de alimentación del motor, permite disminuir de una manera cúbica la potencia del rotor del motor a diferencia del torque que disminuye de manera cuadrática, incluyendo la disminución de la corriente, lo que permite un gran ahorro energético al disminuir la Frecuencia, esto se puede demostrar mediante los datos de la tabla 3-15.

Todos los datos recopilados en la presente investigación son de gran importancia para las futuras prácticas e investigaciones que realicen los estudiantes en el laboratorio de máquinas de la escuela de ingeniería eléctrica, ya que son un punto de partida y comparación para los resultados que obtengan y es material de apoyo para los profesores de la carrera.

Bibliografía

- [1] Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos, Rockwell automation, 1996
- [2] Ramón Bargallo; Diseño de máquinas eléctricas; 2004, UPC
- [3] Jesus Fraile Mora, "Maquinas Eléctricas, Mc McGraw-Hill College, 2003
- [4] Drives, Variadores de velocidad, <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/DRIVES-variadores%20de%20velocidad%20.pdf>.
- [5] Universidad Tecnológica Nacional de Avellaneda, Argentina, Variadores de Frecuencia, http://www.fra.utn.edu.ar/download/carreras/ingenierias/electrica/materias/planestudio/quintonivel/electronicaII/apuntes/variadores_de_frecuencia.pdf.
- [6] Selección y Aplicación de Motores Electricos, WEG, <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-seleccion-y-aplicacion-de-motores-electricos-articulo-tecnico-espanol.pdf>.
- [7] Manual de Hardware e Instalación Variador de Frecuencia SD700 series, Power Electronics, Noviembre 2010.
- [8] Manual de Software y Programación Variador de Frecuencia SD700 series, Power Electronics, Noviembre 2010.
- [9] D. Ruiz, "Electrónica de Potencia", Curso Electrónica de Potencia - EIE 459, PUCV, Valparaiso, Publicación Interna, 2015.