



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Rogelio Mauricio Loyola Zuleta

Modelo, Simulación y Análisis del Variador de Frecuencia SD700 con Frenado Disipativo

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Modelo, Simulación y Análisis del Variador de Frecuencia SD700 con Frenado Disipativo.

Rogelio Mauricio Loyola Zuleta

Informe Final para el grado de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. René Sanhueza Robles

Profesor Guía

Sr. Domingo Ruiz Caballero

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 30 de Junio de 2017

*Para mi hijo Cristóbal y pareja Madelaine,
mis padres Rogelio y Natalia
y mis hermanos.*

*Para Daniel Arias Villegas.
12 de Febrero de 1976 – 3 de Mayo de 2014*

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer por sobre todo a Dios, ya que sin él, las cosas no habrían sucedido de la misma manera. La fuerza, perseverancia y sabiduría que me otorgó, fueron fundamentales para terminar mis estudios.

A mis padres, quienes fueron el apoyo fundamental, desde que era pequeño, entregándome la mejor herencia que podría recibir: amor, educación, valores y enseñándome que lo fundamental en la vida es nunca perder la Humildad. Gracias a ellos, me he formado como persona y profesionalmente. Agradezco a mi madre Natalia Zuleta por siempre haber confiado en mí y en mis capacidades. Y también a mi padre Rogelio Loyola, por siempre establecer una buena comunicación entre padre e hijo.

Agradezco a mi pareja Madelaine Arias, por darme el mejor regalo de mi vida, mi hijo Cristóbal Loyola. También por siempre apoyarme, entenderme y soñar juntos. Sin duda, agradezco a Dios por poner en mi camino a una mujer como tú.

Valparaíso, 30 de Junio de 2017

R. L

Resumen

El proyecto de título consiste en la modelación, simulación y análisis del Variador de Frecuencia SD700 conectado a un Motor de Inducción con jaula de ardilla. La propuesta consiste en estudiar y analizar el conjunto, aplicando un frenado en el motor desde el Variador de Frecuencia.

Para comprender el funcionamiento del variador de frecuencia y la máquina de inducción, es necesario realizar una investigación profunda sobre el comportamiento de cada uno y también entender cómo interactúan entre sí, considerando diferentes tipos de controles, para poder obtener un resultado adecuado en la manipulación de ambos.

Realizada la investigación sobre cómo funciona la máquina y el variador de frecuencia. Se deberán ejecutar experimentos reales, junto con mediciones y con esto identificar si se cumplen los comportamientos estudiados. Y además, teniendo valores reales es posible desarrollar un modelo que apunte a un enfoque real, ya que, se busca representar la realidad.

Por tanto, el modelo a desarrollar se realizará con apoyo de un software llamado Matlab Simulink. Donde existe una gran cantidad de librerías y bases de datos que pueden agilizar el desarrollo del proyecto y obtener buenos resultados que sean comparables a la realidad. Por consiguiente, la ejecución de simulaciones servirá para modelar las situaciones que no podrán ser reflejadas en el caso real, debido a la no disposición de los medios para poder comprobar los resultados más objetivos. Entonces, es importante considerar una adecuada fuente teórica para la comprobación de resultados.

El estudio del frenado del motor ante una condición de Regeneración de energía por parte de la máquina de inducción, es el objetivo más importante que debe ser ejecutado. Se proyecta su cumplimiento a través del desarrollo de una rama disipativa, que pueda cumplir con la función proporcionar un frenado seguro, protegiendo los componentes internos del inversor y además establecer un frenado controlado automáticamente y modificable por el usuario, para el accionamiento de un transistor IGBT que se encargue de activar y desactivar un banco de resistencias que disipe la energía y actúe como carga eléctrica ante la máquina de inducción.

Palabras Clave: SD700, Matlab Simulink, Rama disipativa, IGBT, Jaula de ardilla.

Abstract

The research is based on the modeling, simulation and analysis of the SD700 Frequency Inverter connected to an Induction Motor with squirrel cage. The proposal consists of studying and analyzing it as a whole system, applying a braking in the engine from the Frequency Inverter.

In order to understand the operation of the frequency inverter and the induction machine, it is necessary to carry out an in-depth investigation of the behavior of each one and in order to understand how they interact with each other, considering several types of controls, to obtain an adequate result in the manipulation of both.

Once the investigation on how the machine and the frequency inverter works has been carried out. It is necessary to perform real experiments, to execute measurements and to identify if the behaviors studied are fulfilled. And also, having real values it is possible to develop a model that points to a real approach, since, it is sought to represent reality.

Therefore, the model to be developed will be supported by software called Matlab Simulink. Where there is a large number of libraries and databases that can streamline the development of the project and obtain good results that are comparable to reality. Therefore, the execution of simulations will serve to model the situations that cannot be reflected in the real case, due to the lack of the means to verify the most objective results. Therefore, it is important to consider an adequate theoretical source for the verification of results.

The study of the braking of the engine before a condition of Regeneration of energy by the induction machine, is the most important objective that must be executed. Its performance is projected through the development of a dissipative branch, which can fulfill the function to provide a safe braking, protecting the internal components of the inverter and to establish a braking controlled automatically and modifiable by the user, for the operation of an IGBT transistor That is responsible for activating and deactivating a resistor bank that dissipates the energy and acts as an electric charge before the induction machine.

Key words: SD700, Matlab Simulink, Dissipative branch, IGBT, squirrel cage

Índice general

Introducción.....	1
1 Variador de Frecuencia SD700	3
1.1 Situación a Abordar	3
1.2 Definición de Variador de Frecuencia	4
1.2.1 Problemas comunes en las máquinas eléctricas	4
1.2.2 Ventajas de implementar un Variador de Frecuencia.....	5
1.2.3 Aplicaciones del Variador de Frecuencia	5
1.3 Variador de Frecuencia como Sistema	8
1.4 Diagrama de Bloques Variador de Frecuencia	9
1.5 Ventajas Variador de Frecuencia SD700	10
1.5.1 Cuidado del Motor y reducción del costo de instalación	10
1.5.2 Componentes de Alta calidad y sobredimensionados	11
1.6 Procesamiento de la Señal en el VDF SD700	11
1.6.1 Circuito completo y proceso de la Señal	11
1.6.2 Rectificación	12
1.6.3 Bus de Corriente Continua	12
1.6.4 Inversor	13
1.6.5 Filtros.....	14
2 Motor y Regeneración	15
2.1 Motor de Inducción	15
2.1.1 Estructura del Motor de Inducción.....	16
2.1.2 Principios de funcionamiento	17
2.1.3 Deslizamiento	17
2.1.4 Características del Par v/s Velocidad.....	19
2.1.5 Modelo de la Máquina de Inducción en Régimen Permanente.....	20
2.1.6 Pérdidas y flujo de potencia en el motor	21
2.2 Regeneración.....	22
2.2.1 Regeneración con Variador de Frecuencia	22
2.3 Frenado del Motor con un VDF	23
2.4 Disipación de la Energía.....	23
3 Métodos a Implementar.....	26
3.1 Parámetros Motor de Inducción.....	26
3.1.1 Ensayo de Rotor Libre	26
3.1.2 Ensayo de Rotor Bloqueado	29
3.2 Control del Variador de Frecuencia SD700	30
3.2.1 Control Escalar V/Hz en Lazo abierto	31
3.3 Regeneración.....	34
3.3.1 Circuito del Variador de Frecuencia	34

3.3.2 Rampa de Desaceleración y Deslizamiento	34
3.3.3 Flujo de Potencia en el Motor	35
3.3.4 Regeneración por el Inversor	37
3.3.5 Regeneración en Bus CC.....	38
3.4 Rama Disipativa	39
3.4.1 Circuito de Rama Disipativa.....	39
3.4.2 Control de IGBT.....	39
3.4.3 Resistencia de Rama Disipativa	43
4 Ensayos, Simulaciones y Resultados	45
4.1 Obtención de Parámetros internos del Motor	45
4.1.1 Ensayo de Rotor Libre	45
4.1.2 Ensayo Rotor Bloqueado.....	47
4.1.3 Simulación y Verificación de resultados	48
4.2 Comportamiento del Variador de Frecuencia SD700.....	51
4.2.1 Simulación y Resultados	52
4.3 Simulación VDF SD700 y comportamiento en Régimen Permanente.....	56
4.4 Rampas de Desaceleración y Regeneración	57
4.5 Modelo VDF con Rama Disipativa	60
4.5.1 Circuito de Control Séptimo IGBT	61
4.5.2 Resistencia de Rama disipativa	62
4.5.3 Curvas de Regeneración, Disipación y Frenado	62
4.6 Evaluación de Costos por Implementación de Rama Disipativa	67
5 Discusión y Conclusiones	69
Bibliografía	71
A Protocolo de Mediciones VDF SD700	72
A.1 Configuración y uso del Variador de Frecuencia SD700.....	72
A.2 Mediciones del Comportamiento del Motor a Diferentes Frecuencias	76
A.3 Ensayo de Rotor libre	80
A.4 Ensayo de Rotor Bloqueado.....	83
A.5 Medición con diferentes cargas resistivas.....	85
• Energizar la rama de Excitación	86
A.6 Medición de Regeneración	89
A.7 Ejemplo de Demostración	94

Introducción

En la actualidad, dentro del desarrollo industrial ha tomado gran relevancia el uso de las máquinas eléctricas para diversos procesos y aplicaciones. Donde las cargas asociadas a estos procesos, para cumplir con los requerimientos adecuados, necesitan en algunos casos estar sometidas a velocidades variables. Estas situaciones se pueden observar en aplicaciones de correas transportadoras, sistemas de bobinados de papel, bombas de agua, etc. Por tanto, es necesario un medio que se encargue de mantener un control eficiente y seguro. Para esta función, existen varios métodos para el control y accionamiento de las máquinas, pero sin duda el uso de los Variadores de Frecuencia ha marcado una diferencia, debido que otorga diversas ventajas en comparación a otros medios de accionamiento. Ya sea, por la reducción del consumo, resultados productivos debido a la flexibilidad de aumentar la velocidad en los procesos, también por la capacidad de proteger el motor ante sobretensiones o sobrecorrientes, etc, es decir, los Variadores de Frecuencias brindan un servicio íntegro y objetivo, lo cual toman un rol fundamental en el sector industrial.

La máquina de inducción, es el motor eléctrico más común en todo tipo de aplicaciones industriales y el que abarca un margen de potencias mayores. Estos motores son alimentados a través de tensión alterna y en la mayoría de los casos, son trifásicos.

En aplicaciones de motores de inducción, que tienen asociado un variador de frecuencia, como medio de control y partida, es necesario realizar un análisis del tipo de carga que se encuentre acoplada al eje del motor, ya que, existen cargas con diferentes características y estas podrían indicar la forma correcta de utilizar un variador de frecuencia.

Los variadores de frecuencia, al entregar la opción de manipular las rampas de partida o frenando, podrán ser adaptados a diferentes tipos de cargas, según los requerimientos propios de cada una. Es decir, si en una aplicación específica se tiene una carga con un grado de inercia alto o capacidad alta de acumulación de energía, es probable que al variador de frecuencia se tenga que incorporar un sistema de regeneración, podría ser disipativo o regenerativo a la red. Ya que, en ciertas ocasiones que se requiera frenar rápidamente el motor, surgirá un fenómeno llamado “Regeneración” y la forma de enfrentarlo es disipando la energía por medio de una resistencia o inyectando la energía a la red. Pero ambos casos son bastante diferentes, tanto

desde el punto de vista técnico y económico. Por consiguiente, es muy importante saber identificar qué solución plantear en cada caso.

El objetivo del proyecto consiste en realizar un modelo del variador de frecuencia junto al motor y aplicar el frenado con una rama disipativa que controle esa energía que se regenera y en consecuencia obtener un frenado rápido sin dañar componentes del variador de frecuencia.

También es importante desarrollar una simulación que refleje el estudio y teorías planteadas, entregando valores y señales razonables, y con esto realizar todo tipo de análisis para entender por completo el uso de la rama disipativa en diferentes ocasiones.

1 Variador de Frecuencia SD700

Con el desarrollo de las máquinas eléctricas desde la perspectiva industrial y aplicaciones cotidianas, se ha dado enfoque a la manipulación eficiente de los motores asíncronos, estableciendo un mejor método de control tanto en el estado transitorio como estacionario, aplicando diferentes estrategias de partida, ya sea con resistencias en el estator, arranque estrella-triángulo, con autotransformador, partidores suaves, etc. Pero sin duda, el método más eficiente para establecer un control y partida del motor es a través de los Variadores de Frecuencia.

El caso en particular a estudiar, trata de un Variador de Frecuencia de la Serie SD700, fabricado por la industria multinacional Power Electronics. El cual fue concedido a la Escuela de Ingeniería Eléctrica por parte de una empresa de Asesoría y Ventas Industriales “AVI S.A.”, con la finalidad de desarrollar estudios del comportamiento a través de diversos ensayos con un motor de inducción conectado a la salida del variador de frecuencia.

1.1 Situación a Abordar

Para realizar trabajos adecuados en un laboratorio, en caso el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, es necesario evaluar y estudiar el comportamiento de las máquinas y artefactos que se utilizarán para ensayos pedagógicos en asignaturas destinadas a trabajar en simulación y laboratorios, ya que, es importante que el estudiante pueda plasmar los conocimientos adquiridos en el aula, mediante el análisis de los resultados esperados en laboratorio según la teoría. Con esto, pudiendo obtener una mayor comprensión y realimentación de conocimientos.

Es por ésta razón, que se decide ensayar y modelar el Variador de Frecuencia SD700, considerando diferentes perspectivas y situaciones, para en consecuencia conseguir un estudio completo del aparato. Por tanto, se plantean temas de estudio del comportamiento a diferentes cargas, análisis de armónicos, estudio de regeneración y disipación de energía, etc, con la finalidad de emplear modelos de simulación que representen los casos estudiados y puedan ser utilizados por estudiantes en futuros casos.

La situación a estudiar consiste en realizar un modelo, simulación y análisis del Variador de frecuencia SD700 con frenado disipativo, es decir, primeramente se deberá comprender el

funcionamiento de un variador de frecuencia, considerando sus etapas de circuito y control para la obtención de una respuesta determinada en la salida. Luego, comprender el funcionamiento y uso del motor a conectar, para finalmente analizar el fenómeno de regeneración y disipación de energía.

1.2 Definición de Variador de Frecuencia

El Variador de Frecuencia es un sistema, que se encuentra compuesto por dispositivos electrónicos interconectados, formando un circuito que permite el control de la velocidad rotacional de los motores eléctricos de corriente alterna, a través de la variación de la tensión y frecuencia de alimentación. A continuación, se muestra un esquema que representa la manipulación de la señal que entra al variador de frecuencia y la señal variable que alimenta al motor, en la Figura 1-1. [1]

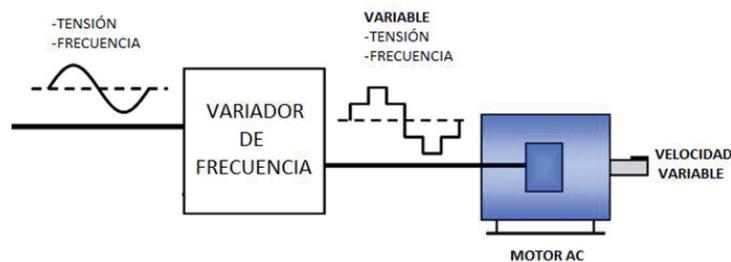


Figura 1-1: Esquema Variador de Frecuencia-Motor (fuente: <https://es.wikipedia.org>)

Comprendiendo la definición del variador de frecuencia, a continuación se mencionan los problemas comunes en motores y las ventajas al aplicar un variador de frecuencia.

1.2.1 Problemas comunes en las máquinas eléctricas

Con el desarrollo industrial y la necesidad de ejecutar diferentes procedimientos que involucran transporte de materiales, elevación, bombeo, trabajos de fuerza, entre otros, se ha incrementado el uso de las máquinas eléctricas, por ésta razón es importante el uso de los variadores de frecuencia ante los siguientes problemas:

- En la partida del motor de inducción, cuando es energizado de forma directa, habrá un pico de corriente en régimen transitorio que puede perturbar el funcionamiento de los aparatos conectados a la red.
- Funcionamiento a velocidad constante en sistemas que se requiere velocidad variable según el proceso.
- Condiciones inadecuadas para la máquina, debido a los movimientos bruscos que se producen en las partidas y paradas. También podrían ser inseguros e incómodos para los usuarios.
- Movimientos complejos que necesitan de una mayor precisión para no provocar un procedimiento erróneo.

1.2.2 Ventajas de implementar un Variador de Frecuencia

El variador de Frecuencia tiene mayores cualidades que otros aparatos para controlar los motores de Inducción, debido que es posible entregar solución a los problemas comunes que surgen en las máquinas eléctricas. A continuación, se mencionan las ventajas de implementar un VDF:

- Permite establecer arranques suaves, progresivos y sin saltos en los motores de corriente alterna.
- Controla la aceleración y frenado de los motores.
- Limita la corriente de arranque en el motor.
- Permite el control y ajuste de rampas de aceleración y desaceleración.
- Protege el motor de sobretensiones u otros problemas.
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- El VDF no posee elementos móviles, ni contactos.
- Entrega los valores de las variables de interés (tensión, frecuencia, velocidad, etc).

1.2.3 Aplicaciones del Variador de Frecuencia

Las aplicaciones más relevantes donde podemos encontrar el uso de variadores de frecuencia, se mencionan a continuación: [2]

Bombas de agua: Son sistemas de presión constante y volumen variable, donde el caudal es el parámetro que se debe controlar.



Figura 1-2: Bombas de Agua (fuente: <https://www.tesse.cl>)

Ascensores y elevadores: Es necesario mantener un arranque y parada suave del motor, y también un movimiento constante. Por consiguiente, es adecuado el uso de Variadores de Frecuencia.



Figura 1-3: Ascensor vertical (fuente: <http://www.enroquedeciencia.blogspot.cl>)

Cintas Transportadoras: Trabajan a Par constante, debido que los volúmenes que se transportan son fijos, pero el variador de frecuencia controla y sincroniza la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, etc.



Figura 1-4: Correa Transportadora (fuente: <http://www.mch.cl>)

Bobinados de Papel: Es una aplicación de potencia constante, debido que, si el torque aumenta, la velocidad debe disminuir en la misma proporción, para mantener un cuidado en el material.



Figura 1-5: Planta de Bobinado de Papel (fuente: <http://www.ipyc.net>)

Pozos petrolíferos: Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.



Figura 1-6: Pozo Petrolífero (fuente: <http://www.verpueblos.com>)

1.3 Variador de Frecuencia como Sistema

Para comprender de mejor forma el funcionamiento del variador de frecuencia, es necesario establecer un diagrama que explique sencillamente las variables de entrada y salida del dispositivo comportándose como un sistema. En la Figura 1-7, en el centro se encuentra el Sistema VDF, el que recibe una señal de entrada, la convierte mediante un sistema de control y comunicaciones con el usuario y luego entrega una señal en la salida que alimenta otro bloque.

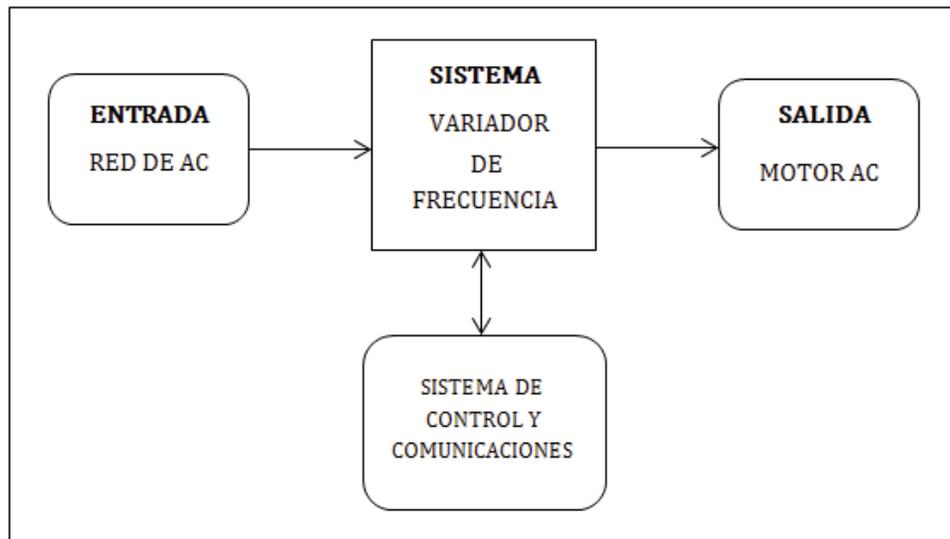


Figura 1-7: Diagrama de Variador de Frecuencia como Sistema.

A continuación se explica cada bloque que compone el diagrama, para contextualizar en qué situación se implementará el variador de frecuencia real del Laboratorio.

Descripción de los Bloques

- **Entrada:** Red de suministro, será de carácter trifásica donde las variables importantes a considerar son: la tensión, frecuencia y la potencia suministrada. En el caso a estudiar, la tensión de línea tiene un valor de 400 [V] y una frecuencia de 50 [Hz].
- **Sistema:** Está conformado por el Variador de Frecuencia, el que recibe una señal de entrada, en caso, tensión y frecuencia fija. Luego según instrucciones del sistema de control y comunicaciones, entrega en la salida una señal de tensión y frecuencia variable y acorde a la carga y situación que se encuentre el motor expuesto
- **Sistema de Control y Comunicaciones:** Los elementos electrónicos que componen el circuito del variador de frecuencia, deberán ser controlados para obtener un resultado determinado en la salida del sistema. Además para establecer una interfaz entre el equipo y el usuario es necesario disponer de un enlace de comunicación. Es por estas

razones que se menciona un Sistema de Control y Comunicaciones, ya que, el funcionamiento del variador de frecuencia, dependerá de sistema.

Es importante señalar que en el caso real, el variador de frecuencia considera un sistema completo, estando compuesto por el circuito y el sistema de control y comunicaciones.

- **Salida:** Se obtiene una señal variable, manipulada por el variador de frecuencia. Para el caso a estudiar, se alimentará un motor trifásico de inducción.

1.4 Diagrama de Bloques Variador de Frecuencia

Para entender el funcionamiento del variador de frecuencia, es necesario entender cómo se conforma su circuito de forma simplificada, en otras palabras, reconocer las etapas donde es transformada la señal. En la Figura 1-8 se presenta un esquema simplificado en bloques de las etapas que conforman el circuito.

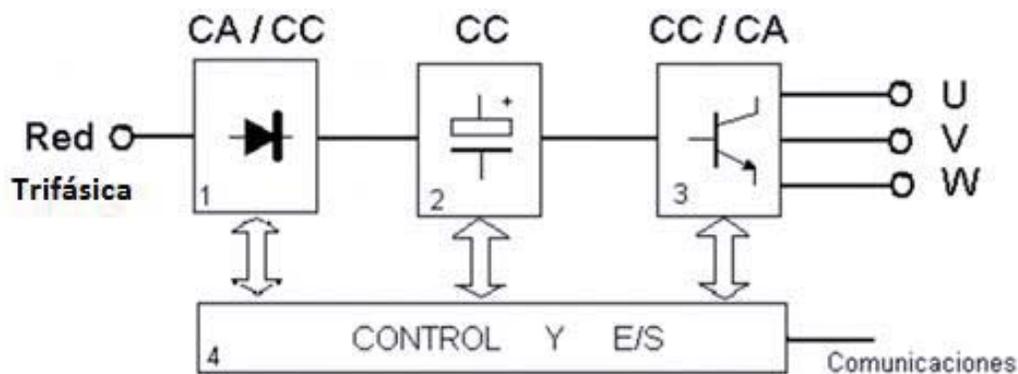


Figura 1-8: Esquema simplificado circuito Variador de Frecuencia con entrada Trifásica. (fuente: <http://www.academia.edu>)

El circuito del Variador de Frecuencia, cuenta con tres etapas, donde la entrada es la red alterna trifásica, es decir por fase se tiene una señal sinusoidal. La descripción de las etapas, se explica a continuación:

- **Puente Rectificador:** El puente puede ser controlado, semi-controlado o no controlado, es decir, existen variadores con puentes rectificadores que están compuestos solo en base de tiristores, otros de diodos con tiristores, o simplemente de diodos. Esto dependerá de la elección del usuario, dependiendo la carga que se encuentre acoplada al motor conectado al variador de frecuencia, ya que, en el caso de los rectificadores controlados, es posible inyectar energía a la red. Pero la función principal del rectificador, es convertir la señal alterna en continua.
- **Bus CC:** A pesar que el rectificador transforma la tensión de alterna a continua, es necesario tener una tensión lo más constante posible, lo cual, se aplica un filtro en

paralelo, compuesto por condensadores en serie, con la finalidad de amortiguar el rizado y obtener una tensión que no varíe en el tiempo, por tanto, mientras mayor es la magnitud de los condensadores, se obtendrá una señal de tensión más constante.

- **Puente Inversor:** El puente inversor se encuentra compuesto por transistores, los cuales son activados y desactivados para generar niveles de tensión alternados en la salida, con magnitudes relacionadas a la referencia (en caso la tensión en el Bus CC). Los niveles de tensión generados, se realizarán en base a Modulación PWM, con señales moduladoras y una portadora, para obtener una tensión trifásica alternada en la salida.
- **Control y E/S:** Como se mencionó anteriormente, existe un sistema de control y comunicaciones. El sistema de control permite generar los disparos de los tiristores, en caso que el rectificador sea controlado o semi-controlado. También se encarga de la activar y desactivar los transistores del puente inversor, en el caso del variador de frecuencia SD700, mediante modulación PWM en base a control Escalar, y por otro lado, controla la activación de las protecciones por sobretensión, sobre corriente, temperatura, etc.

Las entradas y salidas, pueden ser digitales o análogas. Se utilizan para conectar diferentes dispositivos para generar otros medios de interacción con el usuario.

1.5 Ventajas Variador de Frecuencia SD700

El Variador de frecuencia SD700 se enfoca en brindar un máximo cuidado del motor y en reducir los costos de instalación, además de entregar un control preciso, eficaz y flexible con múltiples aplicaciones y sistemas de comunicación, obteniendo como resultado un ahorro de energía y mejorando la imagen corporativa de la industria que lo utilice.

El SD700 se caracteriza por presentar una interfaz amigable hacia el usuario, ya que su manipulación es sencilla a través de un display táctil en color además utiliza componentes de alta calidad y fácil mantenimiento. Unas de las principales ventajas que entrega el Variador de Frecuencia SD700, son las siguientes:

1.5.1 Cuidado del Motor y reducción del costo de instalación

El alto número de arranques en directo provoca en los motores eléctricos un estrés mecánico y eléctrico. Las sobrecorrientes instantáneas que sufren los motores de inducción reducen su vida útil y aumentan los costos de mantenimiento. [3]

El variador incluye un filtro dV/dt de serie que reduce el valor dV/dt hasta $400 \text{ V}/\mu\text{s}$ - $800 \text{ V}/\mu\text{s}$, dependiendo de la tensión de alimentación. Atenúa al mínimo los picos de tensión en los devanados del motor. [3]

Las prestaciones del SD700 reducen la energía electromagnética emitida y los picos de tensión que se manifiestan en las primeras espiras del bobinado del motor.

1.5.2 Componentes de Alta calidad y sobredimensionados

Los componentes del variador están diseñados para entregar un funcionamiento continuo ante diversas condiciones más adversas. Gracias a ésta medida de calidad, se podría evitar por ejemplo, una gran pérdida de ingresos para la compañía, que el suceso podría ser ocasionado por una parada de emergencia inesperada en los procesos. [3]

1.6 Procesamiento de la Señal en el VDF SD700

Para comprender la transformación de la señal en un variador de frecuencia, se ejemplifica el funcionamiento del circuito con imágenes del catálogo VDF SD700.

1.6.1 Circuito completo y proceso de la Señal

Anteriormente, se explicó el variador de frecuencia como un sistema, donde había variables de entrada y salida. La señal era transformada mediante diferentes etapas dentro del circuito, donde las etapas solo fueron mencionadas de forma general y sin detalles técnicos. En la Figura 1-9 se observa el esquema con mayor detalle, donde se considera la red, desconectadores, protecciones, filtros y las etapas del variador.

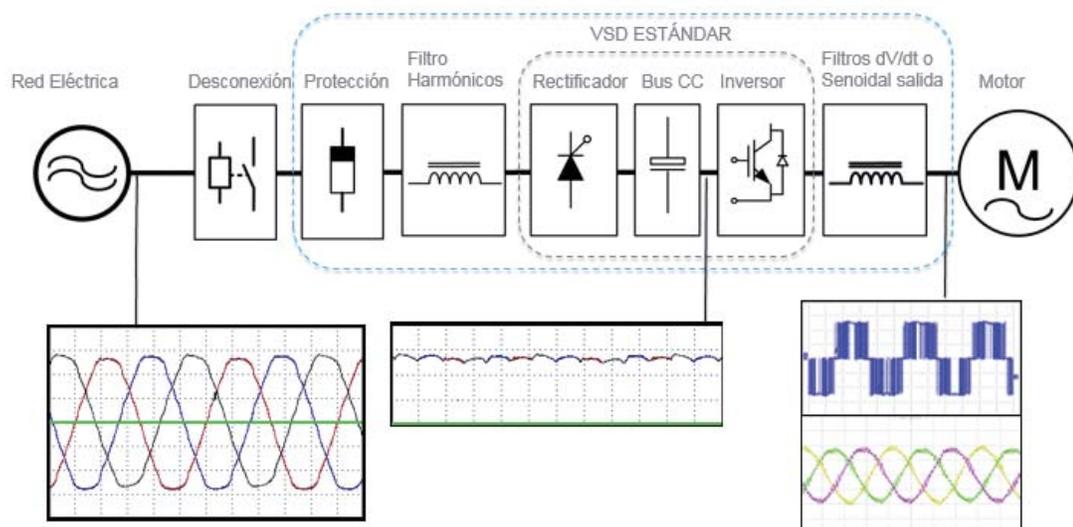


Figura 1-9: Variador de Frecuencia SD700 (fuente: <http://www.slideideas.net>)

Proceso:

Se observa que la señal en la Red es trifásica, desfasada en $\pm 120^\circ$ cada fase. Los fusibles de la entrada, solo se encargan de proteger que el circuito no sobrepase las corrientes nominales, luego el Filtro de armónicos cumple la función de reducir el contenido armónico, suavizar la señal y disminuir la corriente peak de arranque. Después está el circuito del variador que se

encarga de procesar la señal en base a una modulación PWM en los IGBTs, obteniendo una forma de onda con tensión y frecuencia variable para entregar energía a motor.

1.6.2 Rectificación

El Variador de Frecuencia S700 Talla N°5, cuenta con un rectificador semi-controlado, es decir, está compuesto de un puente de tres tiristores y tres diodos, los cuales toman la señal trifásica de la red y la convierten en una señal continua de 6 pulsos. El objetivo de utilizar un puente rectificador semi-controlado, es para establecer una carga lenta en los condensadores del Bus CC y en estado estacionario conseguir el comportamiento como diodos con un ángulo de disparo igual a cero. También se puede aplicar el control de disparo para ciertas ocasiones que se necesite reducir la tensión en el Bus CC y con esto reducir la magnitud de tensión en la salida del inversor. En la Figura 1-10 se observan las formas de onda en la entrada y salida del puente rectificador semi-controlado.

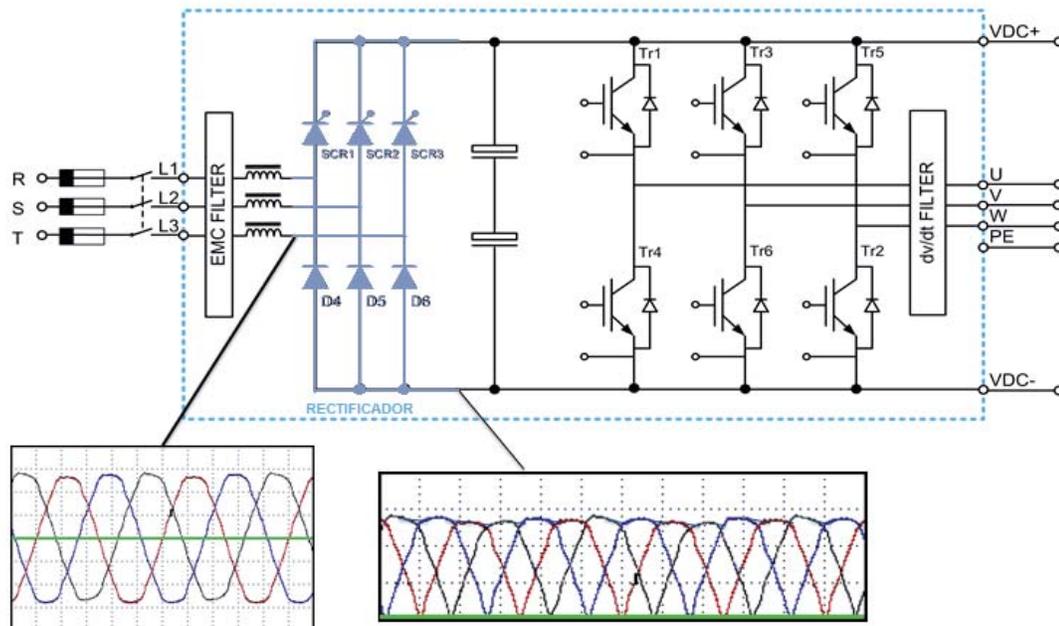


Figura 1-10: Puente Rectificador VDF SD700 (fuente: [http:// www.slideideas.net](http://www.slideideas.net))

1.6.3 Bus de Corriente Continua

A la tensión continua que se obtiene en la salida del puente rectificador, se aplicará un filtro con condensadores, para atenuar el rizado de la señal y con esto también se obtendrá un mayor valor medio de Tensión, con la finalidad de obtener un valor constante de tensión en los terminales del inversor. En la Figura 1-11, se observa la señal más constante en la salida del Bus CC.

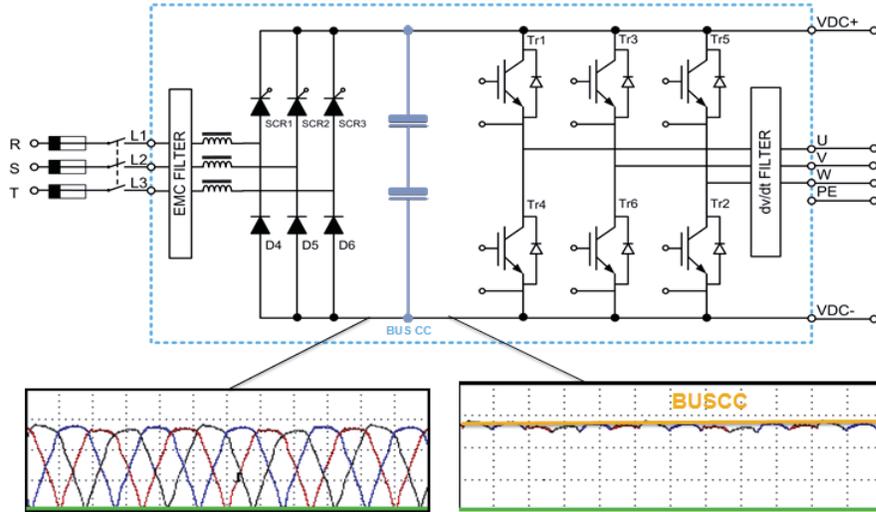


Figura 1-7: Bus CC de VDF SD700 (fuente: <http://www.slideideas.net>)

1.6.4 Inversor

El inversor está compuesto por transistores IGBT, los cuales son controlados por modulación PWM, donde se obtienen tres niveles de tensión en la salida y una señal trifásica con frecuencia y voltaje variable. En la Figura 1-12, se aprecia la señal trifásica obtenida del inversor.

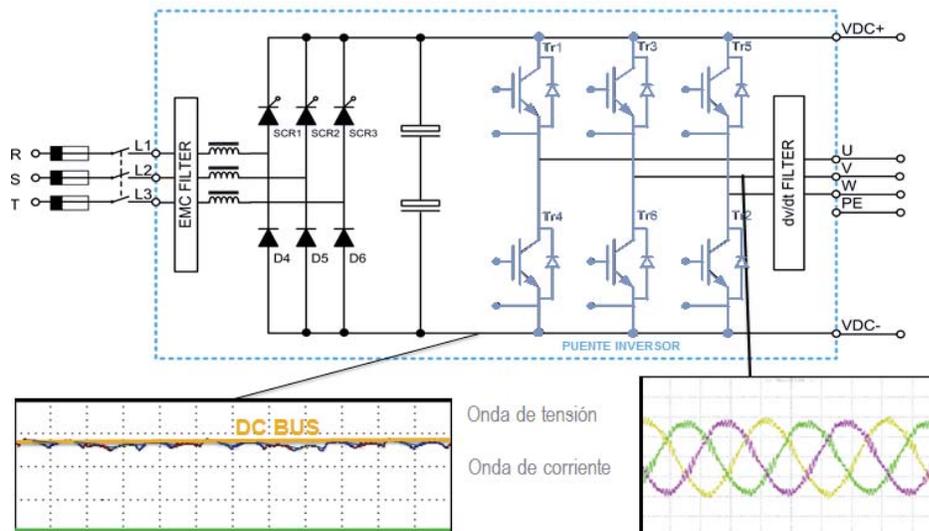


Figura 1-82: Inversor de CC a CA de VDF SD700 (fuente: <http://www.slideideas.net>)

1.6.5 Filtros

-El Filtro EMC: disminuye los efectos de acoplamiento entre el equipo y su entorno electromagnético. Lo cual, las emisiones generadas en el puente rectificador e inversor son atenuadas por filtro.

-El filtro de armónicos es pasivo, compuesto por reactores que se encargan de reducir el contenido armónico, suavizar la señal y reducir el pico de corriente. El filtro instalado proporciona una Distorsión armónica menor a un 35%.

-El filtro dV/dt cumple con la función de proteger los motores de corriente alterna, contra efectos destructivos provocados por la generación de sobre tensiones y la distancia del conductor entre el inversor y el motor. Estos efectos si no son regulados, pueden dañar los aislamientos del motor. En la Figura 1-13, se observa la aplicación de filtro. [3]

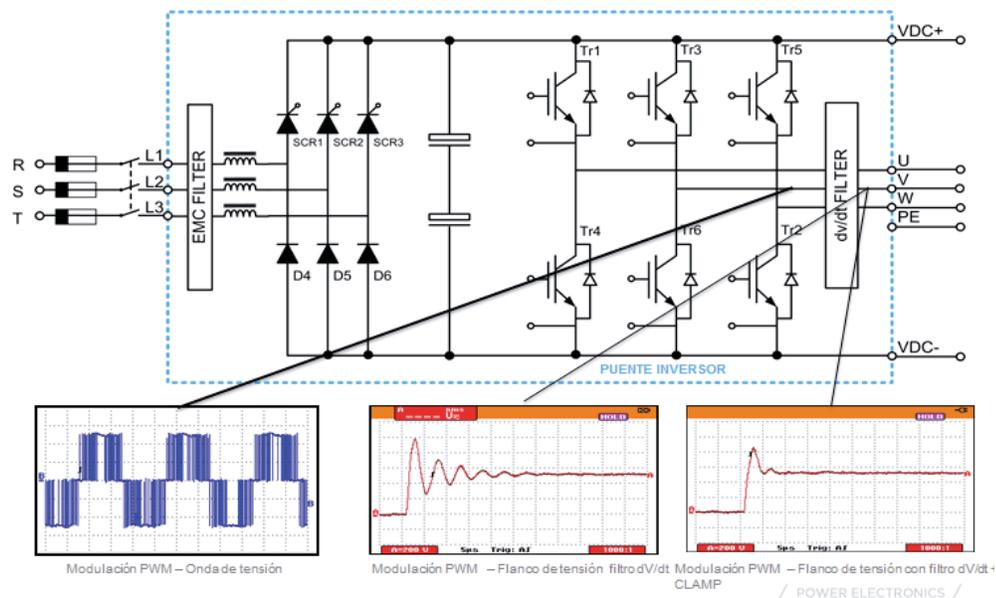


Figura 1-93: Filtro dV/dt en VDF SD700 (fuente: <http://www.slideideas.net>)

2 Motor y Regeneración

Para el estudio del frenado disipativo, es importante entender el fenómeno de regeneración, por ello se deben comprender los fundamentos principales de la máquina eléctrica que se encontrará conectada al Variador de Frecuencia SD700, instalado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. En caso, la máquina es un motor de inducción Jaula de Ardilla, de 30 HP. Por tanto, se estudiará el motor de inducción, sus principios fundamentales, características constructivas, deslizamiento, curva Par v/s Velocidad, modelo circuital, etc, con la finalidad de comprender la interacción entre la máquina y el variador de frecuencia, identificando el flujo de potencia activa, para comprender el tipo de funcionamiento, es decir, como motor o generador, y entendiendo estos sucesos, se estudiará cómo disipar la energía regenerada.

Como se mencionó anteriormente, la máquina eléctrica a estudiar será el Motor de Inducción. A continuación se explicará la definición y características importantes.

2.1 Motor de Inducción

Es una máquina eléctrica dinámica, que a través de su energización puede generar un movimiento y con esto un proceso específico. La máquina puede funcionar consumiendo o entregando potencia activa, es decir, como motor o generador. El caso a estudiar, consiste en el motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla, por tanto, para su funcionamiento es necesario contar con red alterna trifásica.

La ventaja de motor, es que sólo necesita una fuente de alimentación para entrar en funcionamiento, debido que se emplea el principio de inducción magnética para poder generar una fuerza magnetomotriz en los bobinados del rotor y en palabras resumidas el movimiento, usando un principio similar al de un transformador, con un modelo circuital similar pero diferente ante variaciones de velocidad.

2.1.1 Estructura del Motor de Inducción

La estructura del motor está conformada por dos piezas importantes, el estator (estático) y el rotor (rotativo) los cuales generan un circuito electromagnético. Normalmente el rotor se instala en el interior del estator y el espacio de aire existente entre ambos se denomina entrehierro. En la Figura 2-1, se observan las piezas del motor.

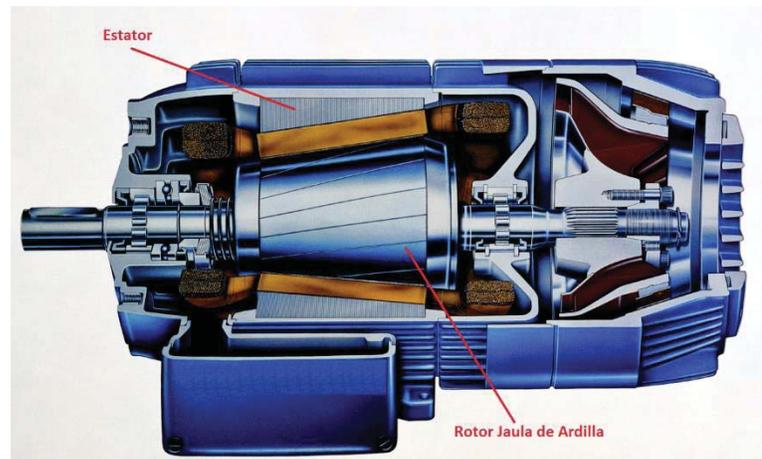


Figura 2-1: Motor de Inducción (fuente: <http://www.directindustry.com>)

- Estator

El devanado del estator está formado por tres bobinados individuales que se superponen y están desfasados con un ángulo eléctrico de 120° . Cuando se conecta a la alimentación, la corriente de entrada primero magnetiza el estator, esta corriente de magnetización genera un campo magnético rotativo que gira con la velocidad de sincronismo n_s , definida en la ecuación (2-1).

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (2-1)$$

Donde:

- n_s : Velocidad de sincronismo/minuto.
- f : frecuencia s^{-1} (segundo)
- p : número de pares de polos (número de polos/2)

- Rotor

En los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, el rotor está formado por un bloque laminar de núcleo de rotor cilíndrico y ranurado con barras de aluminio cortocircuitadas con

anillos para formar una jaula cerrada. Ésta pieza conforma el eje del motor, donde se acoplarán las cargas mecánicas.

2.1.2 Principios de funcionamiento

Entendiendo la composición del motor, ahora se estudiarán los principios de funcionamiento y el proceso para que el rotor de la máquina tenga una velocidad rotacional.

Como se mencionó, es fundamental que los devanados del estator, sean conectados a la red trifásica equilibrada, para que las intensidades de corrientes que circulan por estos, generen un campo magnético giratorio. El fenómeno de inducción se genera con la presencia de campo magnético en las barras cortocircuitadas del rotor, según el principio de Faraday, se induce una f.e.m en el circuito cerrado debido al campo magnético que está fluctuando. Con la f.e.m inducida, se producen corrientes rotóricas a través de los bucles formados por las barras de aluminio, y existir corriente dentro de un campo magnético, según el principio de Lorentz, se producirá una fuerza magnética en el rotor y tenderá a girar, lo cual el rotor comienza a girar a una velocidad n_r inferior a la del campo magnético (n_s). En la Figura 2-2 se muestra un esquema de las barras de aluminio y anillos que componen un rotor jaula de ardilla, junto con el campo magnético y las fuerzas de torsión producidas por las corrientes inducidas. [4]

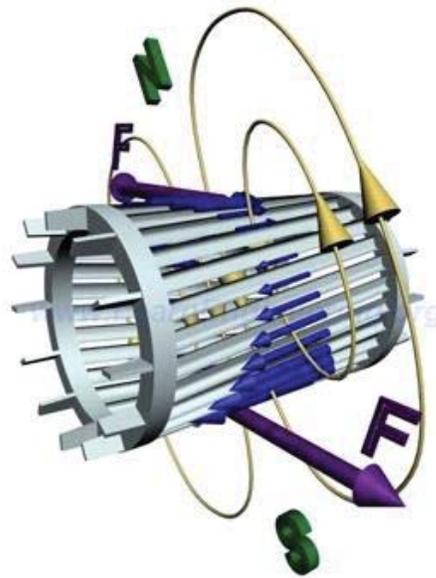


Figura 2-2 : Esquema Jaula de ardilla sometida a un campo magnético (fuente: <http://www.sectorelectricidad.com>)

2.1.3 Deslizamiento

El deslizamiento es una característica propia del motor de Inducción, el cual se expresa como “S” y se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica “ n_s ” y la velocidad en el eje “n”. El deslizamiento suele expresarse en porcentaje. Dependiendo del tamaño de la máquina, durante el funcionamiento de régimen esta diferencia es aproximadamente del 10-3%. El

deslizamiento es una de las características más importantes de una máquina de inducción, y se expresa en la ecuación (2-2) a continuación. [5]

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2-2)$$

Donde:

- S : Deslizamiento
- n_s : Velocidad Sincrónica
- n : Velocidad del rotor o eje.

Según la ecuación (2-2), si se analizan los casos extremos en el deslizamiento, se obtienen las siguientes aseveraciones.

- Si el deslizamiento es $S=0$, la velocidad del rotor se iguala a la velocidad de sincronismo, es decir, las corrientes inducidas en las barras del rotor no presenciaran el campo magnético giratorio, por tanto no se producirá par de rotación, en consecuencia el rotor tenderá a reducir su velocidad.
- Si el deslizamiento es $S=1$, se observa que la velocidad del rotor es cero, es decir, existe un campo magnético a velocidad sincrónica, pero el rotor se encuentra bloqueado, es decir existe un medio mecánico que no permite el giro del rotor, por tanto las corrientes inducidas en el rotor no interactúan con el campo del estator.
- Si el deslizamiento es $0 < S < 1$, se observa que la velocidad del rotor es inferior a la del campo magnético giratorio, por tanto la máquina se encuentra funcionando en condiciones normales de motor, es decir, consumiendo potencia eléctrica activa y transformándola en potencia mecánica.
- Si el deslizamiento es $S < 0$, se observa que la velocidad del rotor es superior a la del campo magnético giratorio, por tanto la máquina se encuentra funcionando como generador, es decir, transformando energía mecánica en eléctrica, inyectando potencia activa a la red o al medio que se encuentre conectado la máquina.
- Si el deslizamiento es $S > 1$, se observa que la velocidad del rotor debe ser negativa para cumplir ésta condición, por tanto, esto significa que se está aplicando un torque opuesto, es decir, mediante un medio mecánico se está frenando al rotor llegando a aplicar una velocidad opuesta.

2.1.4 Características del Par v/s Velocidad

Para comprender cómo se relaciona la Velocidad del motor junto con el Par de torsión y el deslizamiento, se analiza la Figura 2-3 que consiste en la curva característica del motor “Par v/s Velocidad”. [5]

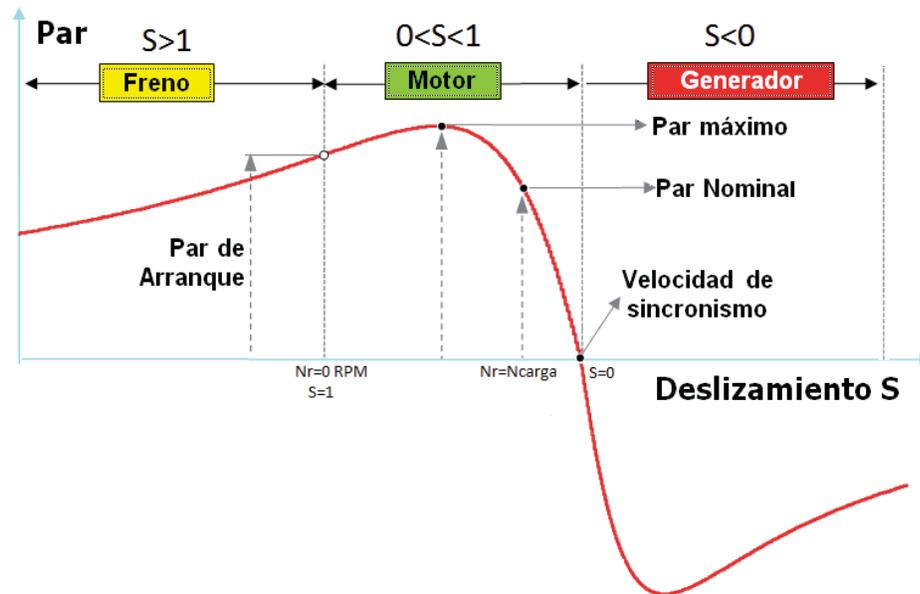


Figura 2-3: Curva Par-Velocidad (fuente: <http://www.monografias.com>)

La curva Par-Velocidad, representa el comportamiento completo de la máquina de inducción. En la Figura 2-3 se observa que en la condición de motor, existe un Par de arranque ya que la máquina se encuentra en reposo y debe entrar en movimiento, lo cual el deslizamiento es 1 debido que el rotor se encuentra en condición de bloqueo.

Si se aplica el par de arranque, gracias a la energía proporcionada por la red, el rotor supera la inercia de reposo y comienza a girar, por tanto el deslizamiento o diferencia entre la velocidad sincrónica y del rotor, comienza a disminuir.

Cuando aumenta la velocidad del motor, la diferencia entre la velocidad del campo en el estator y las barras del rotor es menor, es decir, el deslizamiento disminuye, lo que reduce el campo rotórico, y en consecuencia el par disminuye.

Si incrementa el par de la carga, el eje torna a ser más pesado y la velocidad del rotor disminuye y con esto aumenta el deslizamiento. Esto provoca que el flujo del estator corte las barras del rotor a mayor velocidad, con lo que se incrementa la corriente en el rotor y el par, sin embargo, con el aumento de la corriente del motor se produce una caída de tensión suplementaria en las bobinas del estator, la cual provocará un debilitamiento del campo en el estator.

La curva representa a la máquina en tres tipos de funcionamiento, como motor, generador y freno. La máquina de inducción es capaz de generar energía, solo cuando ya se encuentra excitada y la velocidad del rotor a través de alguna carga o medio mecánico, es forzada a superar la del campo magnético giratorio. Esto se observa en el corte del a curva con el eje "x" de la velocidad, ya que en el corte se representa la velocidad de sincronismo, por tanto si la velocidad del rotor supera valor (girando en el mismo sentido), se producirá un Par negativo, es decir, las corrientes en el rotor cambiarán de sentido y el motor inyectará potencia activa al medio que lo ésta energizando.

En el funcionamiento de frenado, un medio externo provoca un torque mecánico opuesto al que se encuentra generando el rotor y por tanto la velocidad del rotor pasa a ser negativa y con esto se conseguirá el frenado.

2.1.5 Modelo de la Máquina de Inducción en Régimen Permanente

Para representar el comportamiento de la máquina a través de un circuito eléctrico, se identifican las pérdidas eléctricas y magnéticas, y también se analiza cómo funciona el motor en su proceso interno, siendo similar al de un transformador eléctrico, pero con la diferencia que dependerá del deslizamiento, es decir, de la velocidad del rotor.

En la Figura 2-4 se aprecia el modelo eléctrico del motor aplicado a una fase, donde se considera una tensión alterna de entrada, luego las pérdidas eléctricas y magnéticas del estator y rotor. En el centro del circuito se considera un enlace magnético, donde se modela la resistencia del hierro y reactancia magnetizante, y también se considera una resistencia de carga, que ésta dependerá del deslizamiento, es decir, de la diferencia entre la velocidad de sincronismo y el rotor, por tanto cada carga producirá un deslizamiento diferente.

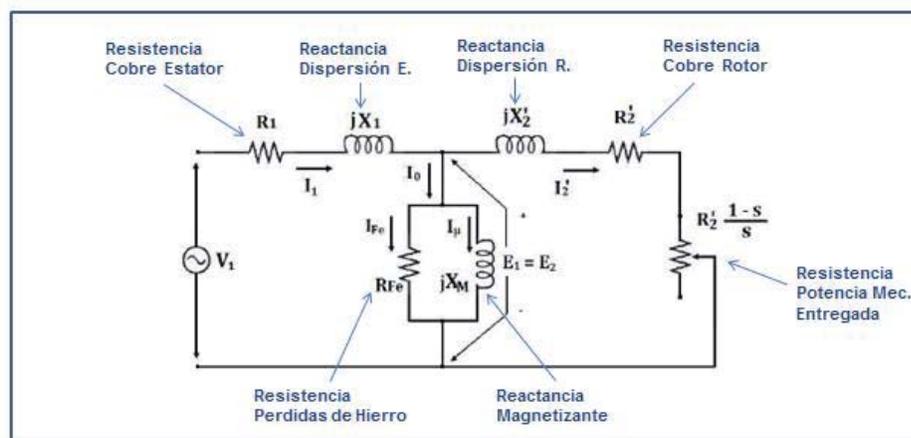


Figura 2-4: Modelo Motor de Inducción en Régimen Permanente (fuente: <http://www.researchgate.net>)

Mediante circuito, es posible realizar cálculos de diferentes variables, ya sea, las corrientes de fase, pérdidas, factor de potencia, potencia a entregar por el motor, par eléctrico, par mecánico y rendimiento de la máquina, y también se pueden obtener los parámetros internos de la máquina, con las mediciones de las variables nombradas.

2.1.6 Pérdidas y flujo de potencia en el motor

Para comprender las pérdidas y potencias involucradas en el funcionamiento del motor, en la Figura 2-5 se presenta un diagrama del flujo de potencia y pérdidas en el motor, donde se nombrará en qué consiste cada pérdida y potencia desarrollada.

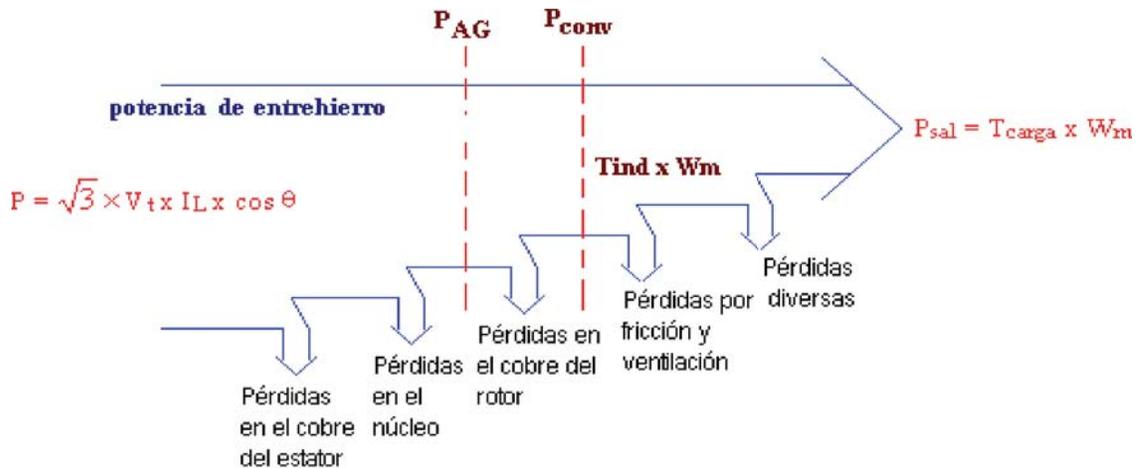


Figura 2-5: Diagrama Flujo de Potencia y Pérdidas en el Motor (fuente: <http://www.patricioconcha.ubb.cl>)

A continuación se nombran las pérdidas y potencias, y se indica en qué consiste cada una.

- **Potencia Entrada:** Potencia conformada por voltaje y corriente inyectada por la red o sistema de control (en caso el variador de frecuencia).
- **Pérdidas Estator Cu:** Son pérdidas por calor, debido a la resistencia involucrada en los devanados de cobre del estator
- **Pérdidas Reactivas en Estator:** Debido a la reactancia de Dispersión del estator, reflejada en el circuito equivalente. Se deben considerar éstas pérdidas.
- **Pérdidas Núcleo:** Debido al fenómeno de Histéresis y corriente Foucault, existen las pérdidas de potencia en el núcleo.
- **Pérdidas Rotor Cu:** Son pérdidas por calor, debido a la resistencia involucrada en los devanados de cobre del rotor.
- **Pérdidas Reactivas en Rotor:** Debido a la reactancia de Dispersión del rotor, reflejada en el circuito equivalente. Se deben considerar éstas pérdidas.

- **Perdidas por Fricción y ventilación:** Son pérdidas por rozamiento y fricción debido al movimiento del rotor.
- **Potencia Salida:** Es la potencia entregada en la salida del motor, en caso el eje. Por tanto es una potencia mecánica para el movimiento de las cargas.
- **PAG:** Es la potencia transferida desde el estator al rotor, por medio del entrehierro formado en la máquina.
- **Pconv:** Es específicamente la potencia que indica la transformación de energía eléctrica a mecánica.

2.2 Regeneración

La Regeneración en el motor de inducción es un fenómeno que surge debido a condiciones específicas, y se identifica con el cambio en el flujo de potencia activa en el interior del motor. A continuación se nombran las condiciones que se deben cumplir para que exista regeneración en el motor de inducción.

1. **Campo Magnético giratorio,** es necesario que permanezca un flujo de potencia reactiva, desde la red o sistema intermediario. Por tanto, manteniendo energizado el estator, se mantendrá el campo magnético girando a velocidad sincrónica.
2. **Velocidad de Rotor superior a Sincrónica,** para que se cumpla ésta condición es necesario que exista un medio externo o carga con gran inercia conectada al eje.

Si se cumplen las condiciones, al tener una velocidad de rotor superior a la sincrónica del campo magnético, el deslizamiento será negativo y se iniciará un flujo inverso de potencia activa. En el capítulo 3 se explicará con mayor detalle el flujo de potencia interno.

2.2.1 Regeneración con Variador de Frecuencia

Si se alimenta un motor mediante un Variador de Frecuencia, cuando el motor comience a regenerar energía, en el variador de frecuencia existirá un proceso de 3 etapas, las cuales se mencionan y describen brevemente a continuación.

1. **Regeneración por Inversor del VDF:** La potencia activa generada por el motor, fluirá a través del puente inversor del variador de frecuencia, a través de los diodos de protección conectados a los transistores.
2. **Exceso de carga en Bus CC:** Los condensadores del Bus CC, comenzarán a recibir un exceso de carga y esto se reflejará en el alza del voltaje continuo.

- 3. Disipación, inyección a la Red o Protección VDF:** Existen tres opciones para enfrentar esta situación. Primeramente, en el variador de frecuencia SD700 solo se cuenta con la opción de activar una protección para impedir la regeneración al momento que el alza de tensión en el Bus CC excede el nivel superior admitido de fábrica. Otra opción es inyectar la energía a la red, mediante un sistema adecuado, y la opción más relevante para estudio, es disipar la energía mediante una resistencia.

2.3 Frenado del Motor con un VDF

El estudio a realizar, consiste en aplicar un frenado en el motor a través del Variador de Frecuencia SD700, lo cual, es relevante reconocer cómo se aplicará el frenado y en qué aplicaciones. Una de las características de los variadores de frecuencia, es que puede detener los motores de forma controlada, es decir, se pueden aplicar rampas de desaceleración para ir disminuyendo la velocidad de forma gradual, por tanto, se puede configurar la pendiente de la rampa, obteniendo desaceleraciones más lentas o más rápidas.

Si se aplican rampas más rápidas es probable que la regeneración del motor sea mayor, ya que, lo que hace el variador realmente es disminuir la frecuencia y voltaje aplicado al motor, en relación a un porcentaje que se configura para la pendiente de la rampa, por tanto, al disminuir la frecuencia de forma más rápida, según la ecuación (2-1), la velocidad sincrónica del campo magnético, será disminuida rápidamente, ya que depende directamente de la frecuencia aplicada al motor, en consecuencia, el rotor tenderá a seguir girando por inercia y se producirá regeneración, lo cual, es necesario aplicar un medio de control para estos casos.

Las cargas que producen mayor regeneración en el motor son las que tienen mayor inercia, por ejemplo las correas transportadoras descendentes o los ascensores al momento de bajar, ya que aparte de la fuerza realizada por el peso de la carga está involucrada la fuerza de gravedad, entonces cuando el eje del motor se haga girar en sentido de carga descendiente, el rotor tenderá a girar más rápido debido a las fuerzas mencionadas, por tanto, es necesario un sistema de frenos mecánico para estos casos, pero también es necesario controlar esa energía regenerada para que el variador de frecuencia no active su protección por sobretensión en el Bus CC.

2.4 Disipación de la Energía

Disipar la energía regenerada por la máquina de inducción tiene dos finalidades, las cuales tienen completa relación con los objetivos de implementar un frenado disipativo para el Variador de Frecuencia SD700. La intención de implementar un módulo de frenado disipativo, conectado al circuito del variador de frecuencia.

El módulo de frenado disipativo se utiliza para establecer un control de la regeneración. Se debe insertar en paralelo al Bus CC para que opere frente al alza de tensión continua y no se active la protección por Sobretensión.

También, otro de los objetivos es frenar con mayor rapidez el motor. Esto es posible, debido que al activar la rama disipativa la energía se disipará a través de una resistencia, lo cual, la energía eléctrica regenerada es convertida en energía calórica. La máquina al estar funcionando como generador, tendrá una carga eléctrica asociada y ésta realizará un torque contrario, en consecuencia el motor frenará más rápido.

Para modelar un sistema de frenado disipativo, es importante identificar los sistemas existentes que se aplican en los variadores de frecuencia reales.

1. Rama Disipativa Interna

Para las Tallas 1 y 2, el circuito interno del Variador de Frecuencia SD700, tiene incorporado un detector de tensión que controla la activación de un séptimo IGBT, lo cual, en los terminales “+HVDC” y “B” se debe aplicar un resistor, cuya dimensión se obtiene a través de una tabla indicada en el Manual. [6]

En la figura 2-2-6 se muestra el circuito general del Variador de Frecuencia SD700 y se incorpora en paralelo al Bus CC la rama disipativa.

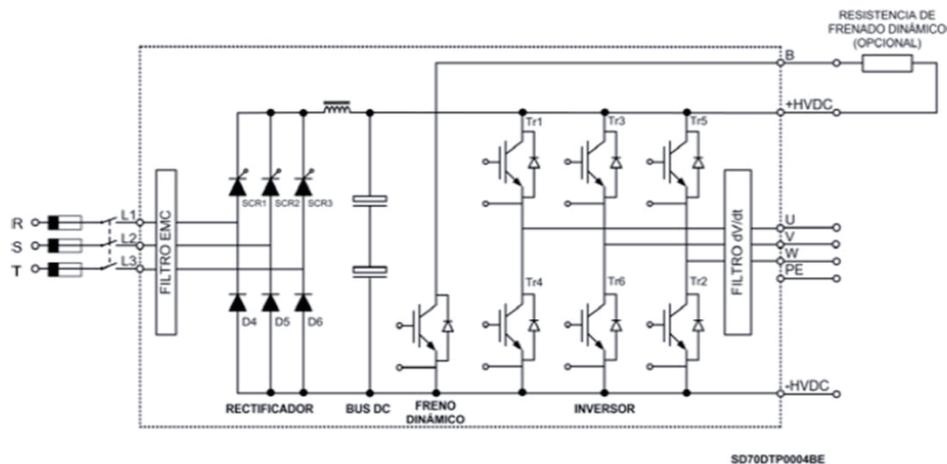


Figura 2-7: Rama Disipativa para VDF SD700 Tallas 1 y 2. (fuente: [http:// www.power-electronics.com](http://www.power-electronics.com))

2. Módulo B150.

El Módulo B150, consiste en un circuito externo al Variador de Frecuencia, que se conecta a los terminales +HVDC y -HVDC, es decir, en paralelo al Bus de CC, por tanto, cuenta con un circuito externo para detección de la tensión. [7]

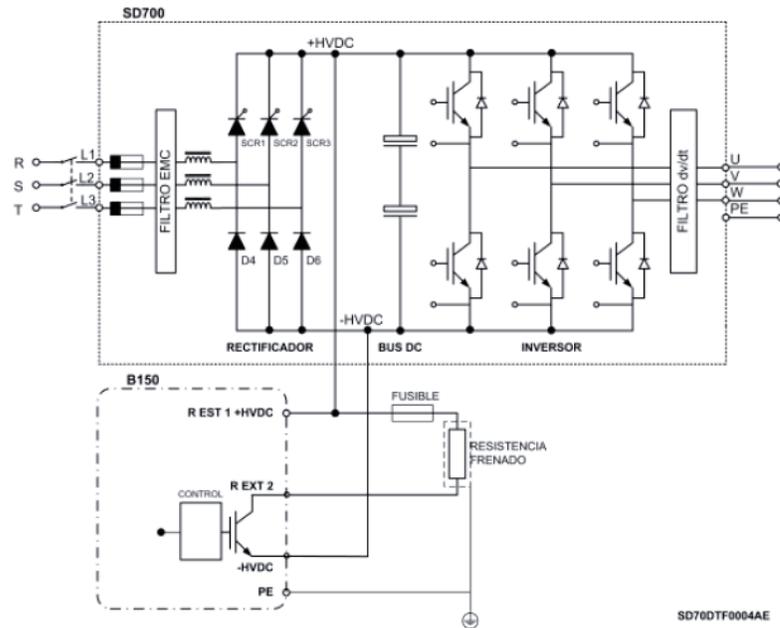


Figura 2-8: Circuito de Módulo B150 de Frenado Dinámico (fuente: <http://www.power-electronics.com>)

La elección de la resistencia, se debe realizar en base a la corriente que circulará en la regeneración, por lo cual, se deben realizar mediciones bajo a diversas situaciones, para tener una referencia en corrientes y poder dimensionar la resistencia de frenado y cuanta potencia disipará.

3 Métodos a Implementar

Para el desarrollo de la solución y cumplimiento de los objetivos del proyecto, es necesario plantear la metodología y conceptos de forma detallada y posteriormente realizar los experimentos y cálculos en base a éstas justificaciones, es necesario identificar el comportamiento del variador de frecuencia junto al motor de inducción, lo cual se realizarán experiencias en laboratorio para efectuar mediciones y ensayos, para poder realizar cálculo de parámetros y curvas de comportamiento. Se analizará el tipo de control aplicado al Variador de Frecuencia y con esto se podrá simular con mayor certeza, también se calcularán las variables internas del variador de frecuencia, para comparar con los resultados de simulación.

Es importante comprender en detalle el concepto de regeneración, lo cual se explicará en detalle el proceso y el método para identificar en qué momento el motor se encuentra regenerando, y se considerará cómo se simulará la rama disipativa, considerando el cálculo de la resistencia adecuada, el control de la rama y el cálculo de energía y potencia disipada.

3.1 Parámetros Motor de Inducción

Para analizar el comportamiento del Variador de Frecuencia SD700, es necesario realizar mediciones en base al Protocolo de Medidas, donde se explican todos los métodos y conexiones para desarrollar las experiencias en el laboratorio. Para identificar los parámetros internos del motor y con ésta información poder realizar las simulaciones de forma adecuada, se ejecutaran dos ensayos los cuales se explican a continuación.

3.1.1 Ensayo de Rotor Libre

En laboratorio, se realizará un ensayo de rotor libre ideal. Debido que el motor de inducción se encuentra acoplado al Motor de CC. Entonces, primero se energizará el motor de CC con una fuente variable, y se aumentará la velocidad hasta llegar a 1500 RPM (velocidad nominal del motor de Inducción). Luego se energizará el motor de Inducción con el VDF SD700, fijando la tensión y frecuencia en sus valores nominales, lo cual se evitarán las condiciones de arranque

del motor. El motor al no tener una carga asociada, las mediciones realizadas con el equipo SAMTE, serán más certeras.

En estas condiciones la velocidad de giro del motor estará muy cercana a la velocidad de sincronismo, lo cual el deslizamiento tenderá a cero y con esto la resistencia de carga tenderá a infinito, según las siguientes ecuaciones:

$$R_{carga} = R_2 \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (3-1)$$

$$S \rightarrow 0$$

$$R_{carga} = \lim_{s \rightarrow 0} R_2 \left(\frac{1-S}{S} \right)$$

$$R_{carga} \rightarrow \infty$$

Bajo éstas circunstancias la Potencia P_o consumida por el motor, es lo siguiente:

$$P_o = P_{cu1} + P_{fierro} + P_{mec} \quad (3-2)$$

Donde:

- P_o : Potencia consumida por el motor.
- P_{cu1} : Pérdidas del cobre en devanados estator.
- P_{fe} : Pérdidas fierro estator.
- P_{mec} : Pérdidas mecánicas.

Si se desprecian las pérdidas del cobre,

$$P_{cu1} \ll P_{fierro} + P_{mec}$$

Por tanto, la potencia consumida por el motor, se calcula de la siguiente forma:

$$P_o = P_{fierro} + P_{mec} \quad (3-3)$$

Nótese que las pérdidas mecánicas se consideran constantes para diferentes valores de tensión de alimentación, porque una vez que el motor comienza a girar lo hace prácticamente a la misma velocidad, muy cercana a la de sincronismo, para tensiones de alimentación, con lo que las pérdidas mecánicas se pueden considerar constantes. [5]

En la Figura 3-1 se muestra el circuito equivalente del motor y se simplifican las resistencias y reactancias que no se consideran en el cálculo de los parámetros.

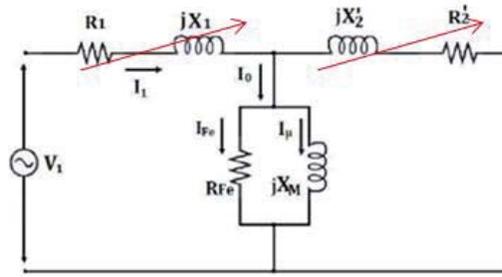


Figura 3-1: Circuito equivalente de Motor en Vacío.

- **Cálculo de Parámetros**

Los parámetros a calcular, son la resistencia del hierro " R_{fe} " y la reactancia de magnetización " X_{μ} ". En el circuito se observa que la corriente en el estator " I_1 " es igual a la corriente por la rama magnetizante " I_o ", luego I_o se expresa en la ecuación 3-4.

$$I_o = I_{fe} + jI_{\mu} \quad (3-4)$$

Donde

$$I_{fe} = I_o \cos \varphi$$

$$I_{\mu} = I_o \sin \varphi$$

Por ley de Ohm, se obtienen las siguientes expresiones:

$$R_{fe} = \frac{V_1}{I_o \cos \varphi} \quad (3-5)$$

$$X_{\mu} = \frac{V_1}{I_o \sin \varphi} \quad (3-6)$$

Con estas expresiones, se obtendrán los parámetros internos de la rama magnetizante.

3.1.2 Ensayo de Rotor Bloqueado

Para ejecutar el ensayo se debe bloquear el rotor del motor, de tal manera que no pueda entrar en movimiento, incrementando la tensión hasta alcanzar la corriente nominal del motor y con esto, medir variables de tensión, corriente, potencia y factor de potencia. En el caso del laboratorio, no es posible efectuar el ensayo a corriente nominal del motor (38 [A]), debido que las protecciones de la fuente variable son inferiores, pero se realizarán dos ensayos a diferentes corrientes, para corroborar el valor de los parámetros a calcular.

En el circuito equivalente de la Figura 3-2, se muestra la prueba de rotor bloqueado, como el rotor está bloqueado el deslizamiento es $S=1$ en consecuencia la Resistencia de carga (3-1) es cero, por tanto se representa como un corto circuito.

Por características de construcción, la resistencia y reactancia de la rama magnetizante tomarán a ser superior, por tanto se aproximan como un circuito abierto en relación a las resistencias de los devanados de rotor y estator.

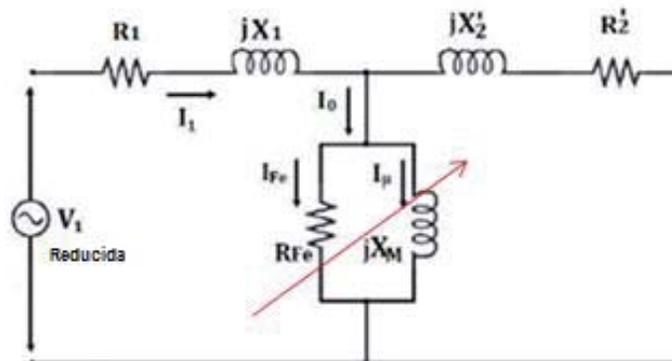


Figura 3-2: Circuito equivalente de Rotor bloqueado.

- **Cálculo de Parámetros**

Los parámetros a calcular, consisten en las resistencias y reactancias del circuito equivalente de rotor bloqueado, que se expresan a continuación.

$$Z_{cc} = \frac{V_1}{I_1}$$

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \quad (3-7)$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2$$

Para el caso de laboratorio, se calculará el valor de R_{cc} y X_{cc} . Con estos valores se estimará la resistencia del cobre y reactancia de dispersión para el estator y rotor, tomando el total de cada una y considerando la mitad para cada bobinado.

3.2 Control del Variador de Frecuencia SD700

El circuito del variador de frecuencia, como se analizó anteriormente, está compuesto por una etapa rectificadora, un bus de CC, y la etapa inversora para entregar suministro al motor, que se representa como una carga trifásica con impedancias variables y resistencias. En la Figura 3-3 se resume el sistema completo.

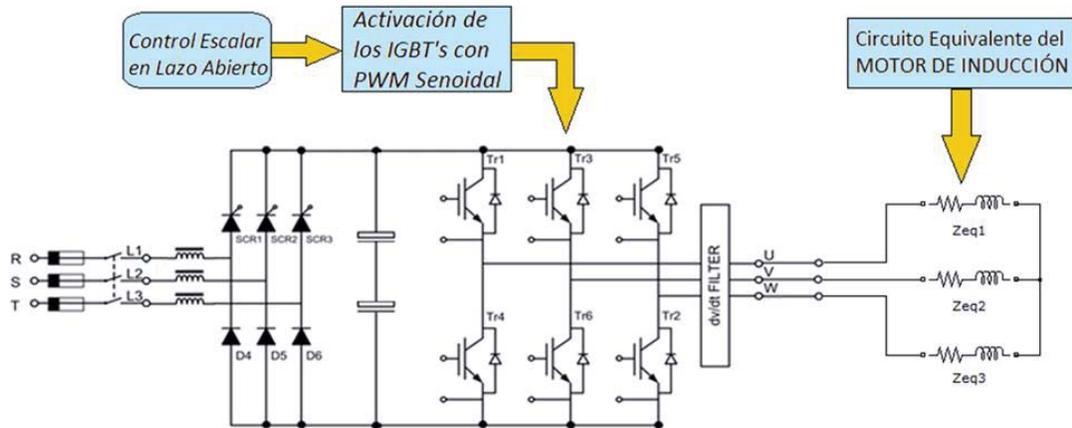


Figura 3-3: Sistema general de VDF-Motor (fuente: <http://www.power-electronics.com>)

Para obtener una señal de tensión y frecuencia variable en la salida del inversor, se deben controlar los disparos de los transistores IGBT's, lo que es realizado mediante una modulación por ancho de pulso sinusoidal, la cual consiste en la comparación de tres señales de referencia (moduladoras), desfasadas en 120 grados, con una o dos señales portadoras (generalmente triangulares), donde la señal de referencia, determina la frecuencia y tensión que se desea en la forma de onda de la salida del inversor.

Para obtener señales adecuadas en la salida del inversor, con la finalidad de conseguir un buen rendimiento del motor y no dañar sus componentes internos, se debe ejecutar un control en la modulación, específicamente en la tensión y frecuencia de la señal moduladora.

El VDF SD700, cuenta con dos tipos de controles, el Control Escalar y el Control Vectorial. Ambos controles se pueden realizar en lazo cerrado mediante un encoder, pero en el laboratorio no se cuenta con un sistema que retroalimente información del motor al variador de frecuencia.

El estudio se realizará aplicando Control Escalar V/Hz, debido que el VDF SD700, mediante una configuración predeterminada tiene establecido tipo de control, además todas las mediciones a realizar en las experiencias de laboratorio, serán ejecutadas con la configuración de Control.

3.2.1 Control Escalar V/Hz en Lazo abierto

En el control de la velocidad del motor con la variación de la frecuencia, ésta no debe ser la única variable que debe cambiar, ya que si se reduce la frecuencia y la tensión no varía, el flujo magnético no se mantiene constante y se saturará el acero del núcleo del motor, y en consecuencia fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina de inducción. [8]

Por tanto, cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad nominal del motor es necesario reducir el voltaje aplicado a las terminales del estator para obtener una operación adecuada, es decir, se debe mantener una relación V/Hz constante. [8]

Al mantener el flujo constante, el par de torsión también se mantendrá constante, debido a que depende de la relación V/Hz. Lo cual se aprecie en las siguientes ecuaciones:

$$\phi = \frac{Ve}{4,44 * fs * Ne} \quad (3-8)$$

$$\phi = K \left(\frac{V}{F} \right) \quad (3-9)$$

Analizando las ecuaciones de torque:

$$T = \frac{3V_{th}^2 R_2 S}{\omega_1 [S^2(X_{th} + X_2) + R_2^2]} \quad (3-10)$$

Reescribiendo la ecuación,

$$T = 3 \left(\frac{V_{th}}{\omega_1} \right)^2 \frac{R_2}{[S^2(X_{th} + X_2)^2 + R_2^2]^2} \omega_2$$

Considerando un deslizamiento pequeño, s^2 tiende a cero, por lo tanto:

$$T = K \left(\frac{V}{F} \right)^2 \omega_2 \quad (3-11)$$

Se aprecia que el flujo y torque dependen de los valores V/F.

- **Operación en Lazo Abierto**

En esta operación de control, no existirá una retroalimentación de velocidad, lo cual, la velocidad solo se variará mediante la frecuencia de referencia. A través de un bloque de ganancia que permite aumentar la tensión aplicada al motor en forma proporcional a la frecuencia.

El inversor trifásico con PWM, varía la tensión y la frecuencia aplicada al motor, obedeciendo las señales de referencia. En la Figura 3-4 se observa un esquema de control escalar aplicado a un inversor con modulación PWM.

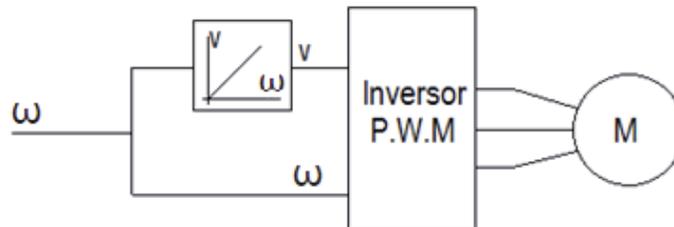


Figura 3-4: Control Escalar en Lazo Abierto

La curva que representa el control Escalar se muestra en la Figura 3-5, donde se observa una característica de Voltaje v/s Frecuencia en la salida del variador de frecuencia.

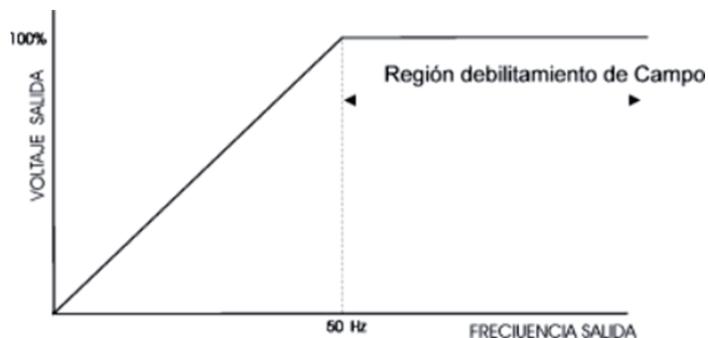


Figura 3-5: Curva de control Escalar V/Hz (fuente: <https://automatismoidustrial.com>)

Sin embargo, la curva representada no es la característica exacta, debido que en bajas frecuencias la relación V/F no es netamente constante, ya que existe un valor mínimo de tensión que se debe mantener para compensar la caída de tensión en la resistencia de los devanados del estator. Si no se compensa esta caída de tensión, el comportamiento del flujo ya no dependería de la tensión y frecuencia. A continuación se representa la curva real del control V/F. Se observa en la Figura 3-6.

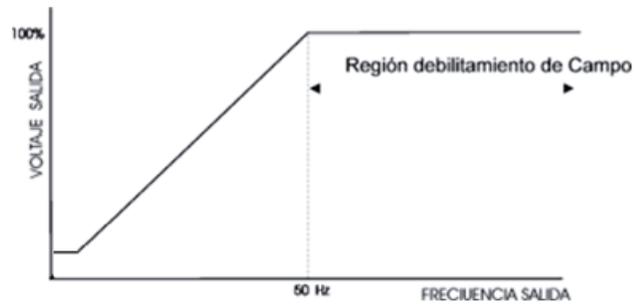


Figura 3-6: Curva de Control Escalar modificada (fuente: <https://automatismoindustrial.com>)

En el caso que aumente la frecuencia sobre el valor nominal f_n , el inversor no podrá aumentar más la tensión de salida, lo cual se mantendrá constante, en consecuencia el flujo comenzará a disminuir por la relación V/F . Esta zona es nombrada: Región de debilitamiento del campo, y también el torque de torsión decaerá, esto se representa en la Figura 3-7 y 3-8.

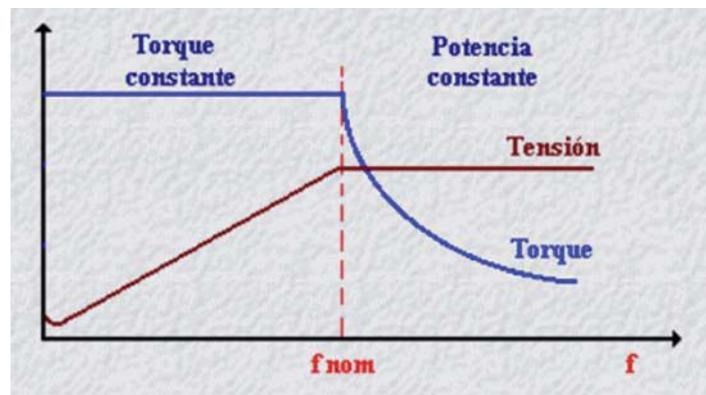


Figura 3-7: Curvas de tensión y torque respecto a frecuencia. (fuente: <http://www.szpowerdrive.com>)

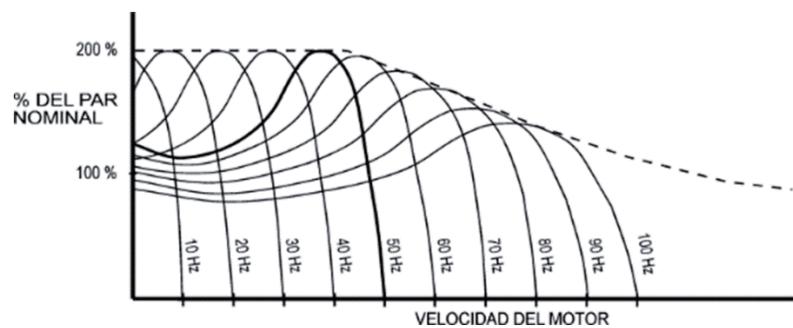


Figura 3-8: Relación de Torque v/s frecuencia (fuente: <http://electrialstandards.blogspot.cl>)

3.3 Regeneración

3.3.1 Circuito del Variador de Frecuencia

El circuito del variador de frecuencia SD700, funcionando en régimen permanente, se encuentra recibiendo energía de la red eléctrica, a través del puente rectificador, convirtiendo la señal alterna trifásica en señal continua. Gracias a la instalación de un Bus CC (compuesto por dos condensadores en serie), la tensión recibirá una mayor atenuación gracias a las cargas y descargas suaves de los condensadores, por tanto el nivel de tensión media aumentará y será cuasi constante. Se requiere realizar la etapa anteriormente nombrada, debido que el puente inversor necesita una tensión sin ondulación. La etapa inversora es activada mediante modulación PWM, a través de control escalar, manteniendo un flujo magnético constante y par máximo en el motor. En la Figura 3-9 se representa el circuito explicado.

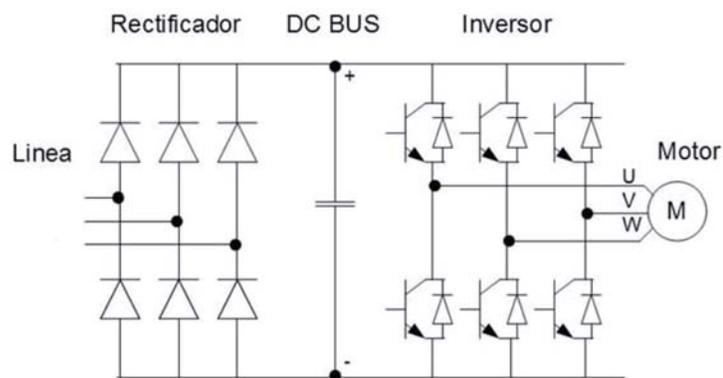


Figura 3-9: Circuito de Variador de Frecuencia (fuente: <http://www.infoplcn.net>)

3.3.2 Rampa de Desaceleración y Deslizamiento

Para frenar el motor, el variador de frecuencia cuenta con la opción de aplicar una rampa de desaceleración en la velocidad, de tal manera que el motor se detenga en consecuencia del torque contrario que produce la carga y también por la alimentación que está recibiendo.

Mientras mayor sea el porcentaje que se aplique en la rampa, será más rápida la detención del motor (idealmente). Al configurar el porcentaje de Desaceleración, se ajusta velocidad por cada segundo que debe ir disminuyendo en el motor, pero el variador solo hace la función de reducir el voltaje y la frecuencia de salida (en base a la activación y desactivación de los IGBT's), por tanto, al reducir la frecuencia, se obtendrá una menor velocidad de sincronismo, ya que ésta depende directamente de la frecuencia.

A continuación, en la Figura 3-10 se representa un gráfico con dos porcentajes de Desaceleración diferentes aplicados en un Variador de Frecuencia.

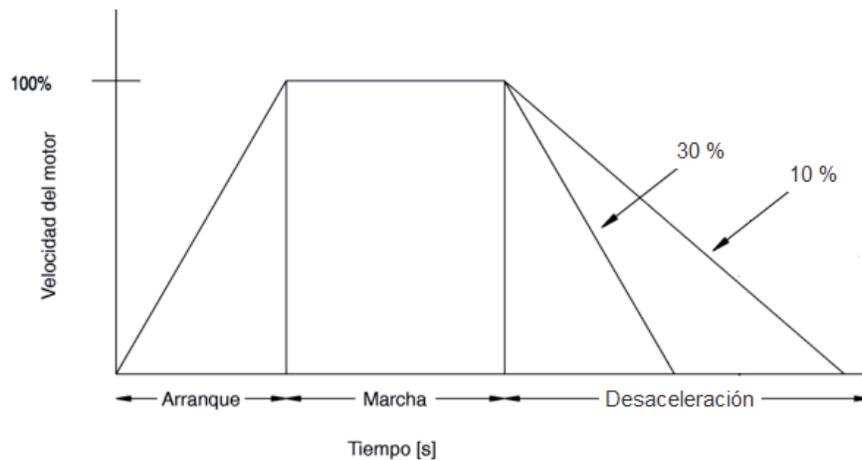


Figura 3-10: Curvas de Desaceleración en Variador de Frecuencia.

Al reducir la velocidad del campo magnético, con una rampa muy pronunciada, y si el motor tiene una carga acoplada de gran inercia, la velocidad del rotor será superior a la del campo magnético giratorio, por tanto, se producirá un deslizamiento negativo, según Figura 2-3 donde se representa el comportamiento del motor Par v/s Velocidad.

Al ser mayor la velocidad del rotor, el deslizamiento es menor que cero y la máquina se comienza a comportar como generador.

Por tanto, significa que la máquina absorberá potencia mecánica desde el eje, para ser transferida hacia la red o medio intermediario (variador de frecuencia).

3.3.3 Flujo de Potencia en el Motor

El deslizamiento al ser negativo, se refleja una resistencia de carga negativa, por tanto la corriente en el rotor, cambiará su sentido, esto significa que el motor absorbe potencia mecánica desde el rotor, y es transferida por el entrehierro, por tanto respecto al flujo de potencia referencial de la máquina funcionando como motor, la nueva potencia en el entrehierro tomará un valor negativo, por tanto se transferirá la energía desde el rotor al estator y se inyectará la energía eléctrica al sistema que entrega suministro al motor. En la Figura 3-11, se ilustra el flujo de las potencias mencionadas.

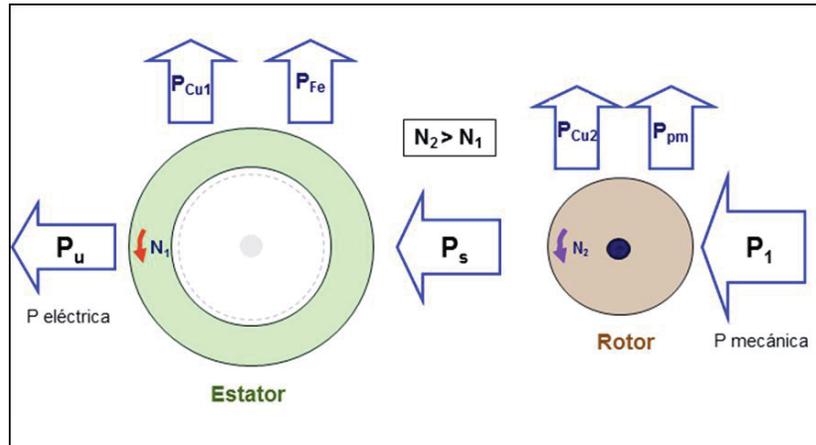


Figura 3-11: Flujo de potencia en caso de Regeneración

Para que sean efectivos estos flujos de potencia activa, se debe cumplir con una condición de forma permanente, la cual consiste en la inyección de potencia reactiva a la máquina, con la finalidad de establecer una corriente de magnetización y en consecuencia un campo magnético giratorio.

Por tanto, la máquina no podría funcionar aislada de la red, a no ser que reciba energía reactiva desde un banco de condensadores.

En la Figura 3-12, se observa lo mencionado anteriormente, con la diferencia que el variador de frecuencia es el sistema que proporcionará energía reactiva al Motor.

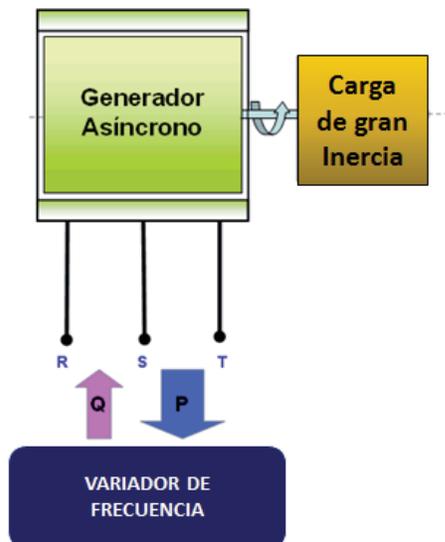


Figura 3-12: Condición de potencia reactiva y activa

3.3.4 Regeneración por el Inversor

El inversor cuenta con el puente de transistores IGBT's y los diodos de protección. Durante el funcionamiento como motor, los transistores son activados mediante modulación PWM, en base a control escalar, por tanto, el variador entrega una señal pulsante de tensión, y con respecto a la energía, entrega al motor potencia activa y reactiva.

Al momento que el motor se encuentra Regenerando, La modulación que activa los transistores, cada vez se ajustará para entregar una menor tensión y frecuencia, pero la potencia reactiva seguirá fluyendo por medio de los IGBT's para entregar suministro a la rama magnetizante del motor.

Por otro lado, la potencia activa generada por la máquina, fluirá a través del puente rectificador formado por los diodos de protección.

Si bien, en teoría la tensión en los terminales del motor no debería cambiar y permanecer la que esta impuesta por la red, pero en caso el sistema cuenta con un variador que está cambiando su comportamiento, por tanto el sistema se vuelve inestable y la tensión tiende a subir a medida que fluye la potencia activa.

Cuando el Bus CC se cargue hasta superar la tensión permitida por la protección, en el caso del SD700, será hasta una tensión de 850 [V]. El variador, mediante control interno, desactivará los disparos de los IGBT's, impidiendo el flujo de potencia reactiva hacia el motor, por tanto no existirá un campo magnético giratorio y no se producirá Regeneración.

En la Figura 3-13 se aprecian los flujos de potencia por el puente inversor, mencionados anteriormente.

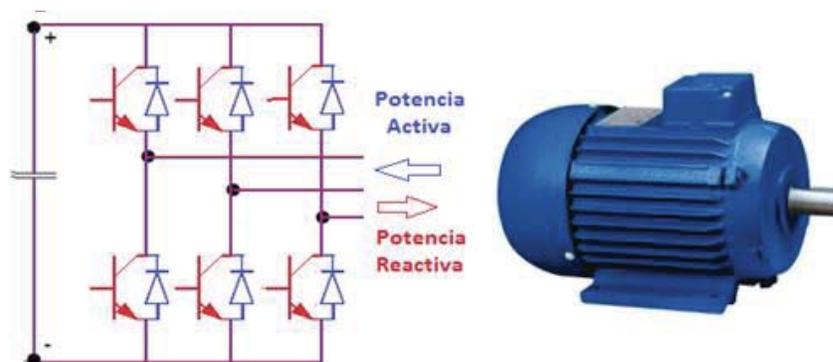


Figura 3-13: Flujos de potencia por etapa Inversora

3.3.5 Regeneración en Bus CC

Antes de aplicar la rampa de Desaceleración, el Bus CC se encuentra cargado a una tensión entregada por el puente rectificador, dicha tensión nombrada anteriormente con un valor de 567 [V].

Al momento que el motor comienza a regenerar potencia activa, la corriente activa circulará a través de los diodos de protección de los IGBT's y cargarán el capacitor, reflejando la carga en un aumento de tensión. Mientras mayor sea el deslizamiento negativo provocado, mayor será la potencia activa que entregue el motor, por lo cual, si se aplica una rampa de mayor pendiente, es decir de mayor desaceleración es más probable que el deslizamiento negativo sea mayor, si la carga es de gran inercia, ya que el rotor tenderá a seguir girando, lo cual, la tensión en los terminales del capacitor aumentará considerablemente, hasta llegar a un límite impuesto por una protección asociada al variador de frecuencia SD700, la que consiste en desactivar los IGBT, para impedir el flujo de potencia reactiva hacia el motor, entonces automáticamente se extinguirá el flujo de potencia activa desde la máquina al VDF. En la Figura 3-14, se aprecian los flujos de corriente hacia el capacitor.

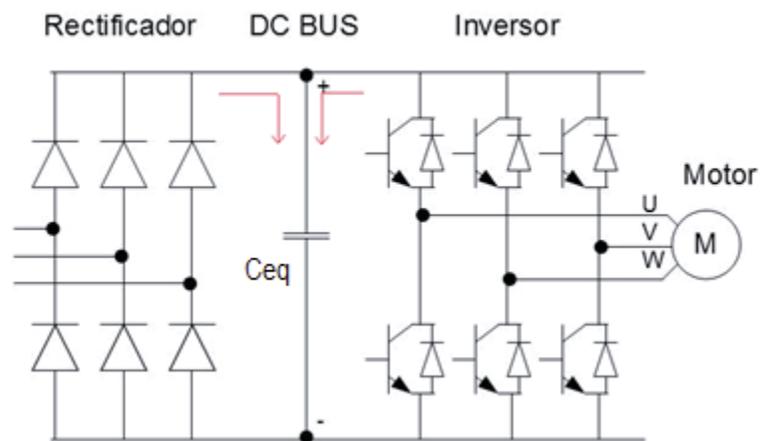


Figura 3-14: Carga de Condensadores en Regeneración (fuente: <http://www.infopl.net>)

El Bus CC, está compuesto por dos condensadores en serie de $470 \mu F$ cada uno, obteniendo un condensador equivalente de $235 \mu F$, soportando una tensión de 900 [V] en los extremos del Bus CC, ya que cada uno funciona hasta con una tensión de 450 [V]. Cuando se activa la protección nombrada anteriormente, es en el momento que la tensión en el Bus CC supera 850 [V].

3.4 Rama Disipativa

La energía regenerada por la máquina, dependerá del tipo de carga que se encuentra acoplada al eje, debido que la inercia de ésta afectará en el grado de regeneración, y también dependerá de aplicaciones que requieren frecuentes o bruscos cambios de velocidad, pero, dependiendo del caso, se pueden aplicar dos tipos de frenados para controlar esa energía.

1. Frenado Dinámico: Se emplea generalmente cuando existe Regeneración ocasional y cuando se aplican rampas de frenado. Con frenado se pierde energía a través del calor disipado en resistencias, pero por otro lado, es de menor inversión.
2. Frenado Regenerativo: Cuando existe constante regeneración, es decir, se mantiene constantemente el deslizamiento (2-2) negativo, debido que la carga acoplada es de naturaleza regenerativa, por ejemplo las correas transportadoras descendientes, grúas, ascensores, etc. Desde otra perspectiva, los costos de energía son reducidos pero la inversión de aplicar método es bastante elevada.

Como se ha mencionado anteriormente, el caso a estudiar se enfoca en la simulación de la Rama disipativa, por tanto es fundamental reconocer cómo se compone y de qué forma operará para luego analizar los resultados.

3.4.1 Circuito de Rama Disipativa

El circuito a proyectar es sencillo y se encuentra compuesto por un transistor IGBT utilizado como interruptor controlado para activar y desactivar la conexión de un banco de resistencias en paralelo al Bus CC. En el caso real, el circuito también cuenta con fusibles y diodos de protección, pero en simulación solo se analizará el control del IGBT y el dimensionamiento del banco de resistencias para realizar diferentes frenados en diferentes casos.

3.4.2 Control de IGBT

El control del Chopper o Séptimo IGBT asociado al circuito de la rama disipativa, consiste en activar y desactivar el transistor, para que la energía regenerada pueda ser disipada por la resistencia de la rama y con esto mantener una situación controlada en el Variador de Frecuencia. Como se mencionó, el objetivo de la rama disipativa es frenar el motor y además mantener un control de la tensión. En caso se explicará el Control por Histéresis que se aplicará y también cómo se desarrollará lógicamente el sistema de control, considerando que la rama se encuentra apta para operar, se dimensionará el resistor en base a diferentes criterios.

- **Control por Histéresis de Tensión**

Consiste en la activación y desactivación del IGBT obedeciendo una lógica de histéresis, lo que consiste en imponer dos límites de tensión, límite superior o de activación y límite inferior o desactivación. Con la finalidad de mantener el voltaje en un valor controlado para resguardar

los elementos del circuito (en este caso los transistores y condensadores). En la Figura 3-15 se observa la curva característica del control por Histéresis de tensión. [9]

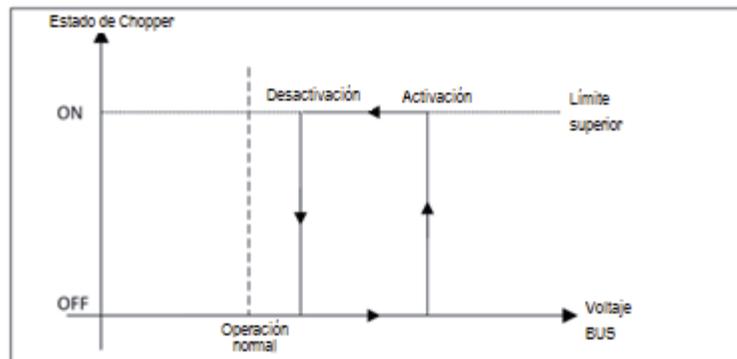


Figura 3-15: Curva de Histéresis de Tensión (fuente: <http://www.antechsv.com>)

Se observa en la Figura 3-15, que se establecen dos niveles de tensión donde trabajará el control del chopper. El nivel superior es dimensionado en base a especificaciones técnicas de fabricantes de módulos para frenado disipativo, proyectándose un valor de 730 [V], con la finalidad de resguardar los IGBT's del inversor y también para evitar su activación ante sobretensiones que no correspondan a alzas de voltajes ocasionadas por la regeneración de la máquina. [9]

El nivel inferior se proyecta con un valor de 710 [V], el cual puede ser regulado dependiendo el tipo de carga que será conectada al motor y el grado de inercia que se genere en el conjunto.

La dinámica del funcionamiento, consiste en detectar el aumento progresivo de voltaje en el Bus CC, llegando a un nivel superior restringido por la Rama disipativa, con ésta condición se activa el IGBT y la resistencia disipa la energía regenerada, mientras la resistencia se encuentre disipando energía la tensión disminuirá, por tanto, la rapidez de la disminución de tensión dependerá del valor de la resistencia.

Al llegar a un límite inferior establecido por el usuario, se desactiva el IGBT y la resistencia deja de disipar energía, por tanto, en el caso que continúe girando el motor seguirá existiendo regeneración, por consiguiente nuevamente habrá un aumento de tensión y dependiendo de la inercia, aumento será rápido o lento. Al llegar nuevamente al nivel de tensión superior, se activará el IGBT y continuará el mismo proceso. En la Figura 3-16 se observa de manera gráfica, lo explicado en estos párrafos.

Dependiendo de la carga que se encuentre acoplada al motor y también del tipo de frenado que se requiere, se dimensionará la resistencia y regulará el nivel inferior de voltaje, ya que si es una carga de gran inercia, al momento que se desactive el IGBT la tensión aumentará rápidamente llegando al nivel superior, por tanto es posible que el motor se frene de forma mas lenta, por lo

cual es recomendable fijar un nivel inferior más bajo, para que se disipe más energía y en consecuencia el motor frene más rápido.

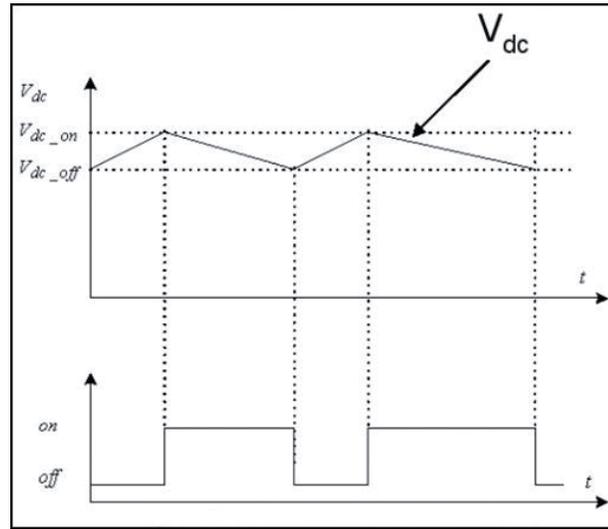


Figura 3-16: Control de tensión por Histéresis (fuente: <http://www.antechsv.com>)

- **Diagrama de flujo del circuito de Control**

En simulación se realizará un circuito de control destinado al IGBT de la Rama disipativa, por tanto se debe seguir la siguiente lógica expresada en la Figura 3-17.

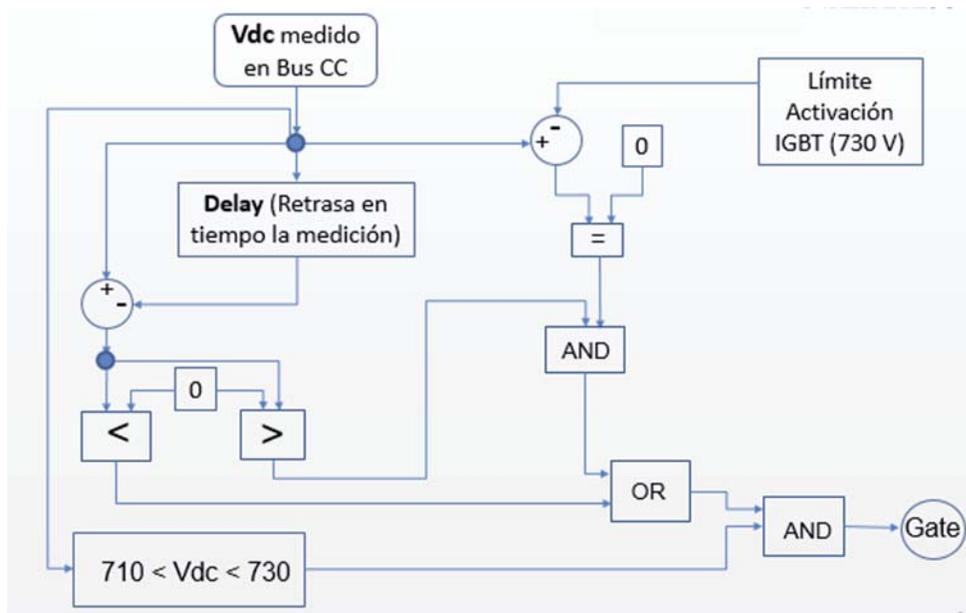


Figura 3-17: Diagrama de Flujos para Circuito de Control.

El circuito consiste en la medición del voltaje Vdc, desde que comienza la simulación hasta el término. A dicha medición se aplica un bloque Delay, que consiste en el retraso en el tiempo de la medición, por ejemplo, si la tensión aumenta sucesivamente desde 0 [V] a 500 [V], si se miden 500 [V], el Delay indicará un valor de 499 [V], por tanto, se aplica el Delay con la finalidad de establecer una condición de crecimiento o decrecimiento de tensión.

Además, se encuentran los bloques que buscan detectar cuándo la tensión se igualará al nivel máximo establecido (730 [V]), lo cual básicamente se restará el voltaje medido con la constante 730 y al momento que ésta diferencia resulte un valor 0, se compara con una constante de valor 0 y si son iguales, se activa un nivel 1 en la entrada de una compuerta AND.

La otra entrada de la compuerta AND, dependerá si diferencia entre la tensión medida el Bus CC menos la tensión retrasada en el tiempo Delay, resulta un valor mayor a 0. Si el valor es mayor a 0, indica que la tensión en el Bus CC, se encuentra en aumento, lo cual se activará un valor 1, y en la compuerta AND, se obtendrá un nivel alto (1) en la salida.

Al tener ésta condición, la siguiente compuerta es un sumador OR, por tanto en la salida se obtiene automáticamente un nivel alto entrando a la segunda compuerta AND, lo cual, la otra entrada de la segunda compuerta AND, dependerá del nivel de saturación, es decir si la tensión se encuentra dentro de los rangos permitidos para activar el IGBT. Los rangos son entre 730 y 710 [V]. Si se encuentra dentro de estos valores, se obtendrá un nivel alto en el gate, activando el IGBT y en consecuencia la Rama disipativa.

Al activarse la rama disipativa, comienza a disipar energía la resistencia, lo cual el voltaje comenzará a bajar, por tanto, el Primer AND, entregará un valor 0, pero la otra entrada de la compuerta OR, entregará un valor 1, ya que la diferencia entre el Voltaje medido y el Delay del Voltaje medido, será negativa, lo cual se cumple la condición establecida, otorgando un nivel alto en la entrada de la Compuerta OR, por tanto, la rama seguirá siendo activada hasta bajar la tensión al nivel inferior de 710 [V]. Al salir del rango inferior, se desactivará el IGBT y el Bus CC comenzará a tener un incremento de tensión nuevamente. (Así sucesivamente).

- **Frecuencia de Conmutación del IGBT**

Primeramente es importante tener en cuenta algunos parámetros que diferencian unos transistores de otros. En caso, en la Tabla 3-1, se pueden apreciar diferentes características de los transistores BJT, MOSFET e IGBT, tales como la tensión a la que pueden estar sometidos, corriente de trabajo, frecuencia de conmutación y niveles de potencia donde son utilizados. [10]

Tabla 3-1: Características de Transistores

BJT	MOSFET	IGBT
1000-1200V	500-1000V	1600-2000V
700-1000A	20-100 ^a	400-500A
25 kHz	Hasta 400 kHz	Hasta 75 kHz
Pot Medias	Pot Bajas <10 kW	Pmedias-altas

En estudio se utilizará un Transistor IGBT, por tanto lo que interesa considerar es la frecuencia de Conmutación, lo cual se aprecia que el valor podría llegar máximo a 75 kHz estimativamente. [10]

Por tanto, al poseer un control por Histéresis de voltaje en el IGBT, la frecuencia de conmutación no puede ser impuesta por el usuario, ya que ésta irá cambiando según las condiciones y carga en el motor. En relación a los límites establecidos, estos serán fijados por el usuario y dependerán de la aplicación y carga en el motor. También para un VDF con 400 [Vlínea] se ajusta una tensión de 730 [V], para evitar activación en caso que surjan sobretensiones.

Para la obtención de la frecuencia de conmutación, se deberá tomar la peor condición, es decir, el caso que regenere más energía, por tanto, se debe analizar la señal de tensión en el Bus CC y calcular el periodo de las variaciones al activar y desactivar el IGBT. Las ecuaciones se observan a continuación.

$$T = t_2 - t_1 \quad (3-12)$$

$$F_{conmutación} = \frac{1}{T} \quad (3-13)$$

3.4.3 Resistencia de Rama Disipativa

Para la elección de la resistencia de la Rama disipativa es importante considerar sus propiedades térmicas y eléctricas. Debido que si es seleccionada una resistencia de menor valor a la adecuada para la aplicación, es posible que el inversor y la propia resistencia se puedan dañar. En cambio, si es seleccionada una resistencia de mayor valor a la adecuada, la potencia se disipará de forma más lenta y en consecuencia el frenado del motor será más lento.

Para realizar un cálculo más exacto y adecuado, existen diferentes criterios para determinar el valor de la resistencia necesaria para la aplicación, considerando la potencia del motor, velocidad, inercia del motor y carga, relación de transmisión GR, Par de la aplicación, velocidad angular del motor, potencia regenerativa peak en eje del motor, etc, pero en el caso de estudio no se cuenta con la totalidad de la información, por tanto se utilizará un criterio sencillo recomendado por profesionales pertenecientes a la empresa “AVI S.A.”

Para cargas 100% regenerativas, se establece el límite de tensión 730 [V] para el caso que se utilice un Variador de frecuencia con una tensión de entrada de 400 [V] entre líneas. Como la carga regenera constantemente energía, se debe considerar la potencia nominal del motor y con ésta información desarrollar los siguientes cálculos:

$$V_{superior} = 730 [V]$$

$$I_{resistor} = \frac{P_{nominal}[kW]}{V_{superior}[V]} \quad (3-14)$$

$$R_{disipativa} = \frac{V_{superior}[V]}{I_{resistor}} \quad (3-15)$$

Para el caso del laboratorio el motor al estar en vacío, consume una potencia inferior a la nominal, lo cual el cálculo se deberá hacer en relación a esta potencia.

4 Ensayos, Simulaciones y Resultados

Luego del estudio general de todos los temas y metodologías que se consideran relevantes para el desarrollo del proyecto y la obtención de resultados acorde a los objetivos propuestos., es necesario ejecutar experimentos en laboratorio para identificar el correcto comportamiento del Variador de Frecuencia y el Motor de Inducción, para luego realizar simulaciones en ambiente Matlab Simulink y con esto poder elaborar el Modelo adecuado en base a comparaciones de resultados respecto a la realidad y teoría, por tanto, el objetivo es obtener resultados razonables y que puedan ser justificados.

Respecto a la ejecución de los ensayos, todos los procedimientos y conexiones serán explicados en el Protocolo de Mediciones, lo cual, en capítulo solo se explicarán procesos generales, dando orientación a las mediciones y resultados.

4.1 Obtención de Parámetros internos del Motor

Como se explicó en el capítulo 3, para la obtención de los parámetros internos del motor de inducción, se realizó el ensayo de rotor libre y el ensayo de rotor bloqueado. A continuación se expresarán las mediciones obtenidas y se calcularán los parámetros internos del motor.

4.1.1 Ensayo de Rotor Libre

El procedimiento realizado, se explicó de forma breve en el capítulo 3 y también se encuentra en detalle en el Protocolo de Mediciones, lo cual, solo se expresaran las mediciones y cálculos. Se realizaron mediciones de tensión, corriente, potencia y factor de potencia. En la Tabla 4-1 se expresan los resultados obtenidos.

- **Mediciones con equipo de medida SAMTE**

Tabla 4-1: Mediciones Rotor Libre con equipo de medida SAMTE

Variable	R	S	T
Tensión [V]	223,7	222	222,5
Corriente [A]	10,4	9,3	9,7
Potencia [W]	69,2	101,9	133,7
F.P [-]	0,02	0,04	0,07

- **Cálculo de Parámetros**

Según ecuaciones (3-5) y (3-6), se calcula el valor de la resistencia del hierro y la reactancia magnetizante.

$$R_{fe} = \frac{V_1}{I_o \cos \varphi} \quad (4-1)$$

$$R_{fe} = \frac{222,5}{9,7 * (0,07)}$$

$$R_{fe} = 327,68 \Omega$$

$$X_\mu = \frac{V_1}{I_o \sin \varphi} \quad (4-2)$$

$$\cos \varphi = 0,07$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,07)$$

$$\varphi = 89,59^\circ$$

$$X_\mu = \frac{222,5}{9,7 \sin(89,59)}$$

$$X_\mu = 21,56 \Omega$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi f}$$

$$L_\mu = 68,8 \text{ mH}$$

Con las mediciones en el ensayo en rotor libre, se calcularon los parámetros de la rama magnetizante.

4.1.2 Ensayo Rotor Bloqueado

- **Mediciones con equipo de medida SAMTE**

Tabla 4-2: Mediciones Rotor Bloqueado con equipo de medida SAMTE

Variable	R	S	T
Tensión [V]	44,5	45,3	44,5
Corriente [A]	26,6	26,6	26,5
Potencia [W]	502,6	519,3	507
F.P [-]	0,43	0,43	0,44

- **Cálculo de Parámetros**

Según ecuación (3-7) y aplicando ley de ohm, se calcula el valor de las resistencias del cobre y reactancias de dispersión.

$$Z_{cc} = \frac{V_1}{I_1}$$

$$Z_{cc} = \frac{44,5}{26,6 \angle 64,5}$$

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \quad (4-3)$$

$$R_{cc} = 726 \text{ m}\Omega$$

$$R_{cu1} = R_{cu2} = \frac{R_{cc}}{2} = 363 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = 1,50 \Omega$$

$$L_{cc} = 4,84 \text{ mH}$$

$$L_{cu1} = L_{cu2} = \frac{L_{cc}}{2} = 2,42 \text{ m}\Omega$$

4.1.3 Simulación y Verificación de resultados

Para corroborar que los parámetros internos se calcularon correctamente, se simuló el motor de inducción, conectado directamente a la red y se analizaron las variables en régimen permanente. El motor a simular corresponde a un Motor de Inducción con Jaula de ardilla, con tensión de línea de 380 [V] y frecuencia nominal de 50 Hz. La potencia nominal mecánica es de 30 HP, es decir 22,371 [kW]. Y por último los parámetros internos se configuran en base a lo obtenido anteriormente.

- **Simulación**

En la Figura 4-1 se aprecia el motor de inducción conectado de forma directa a la red y se conectan los bloques para medir las variables de interés, y en la Figura 4-2 se muestran los datos ingresados de los parámetros calculados.

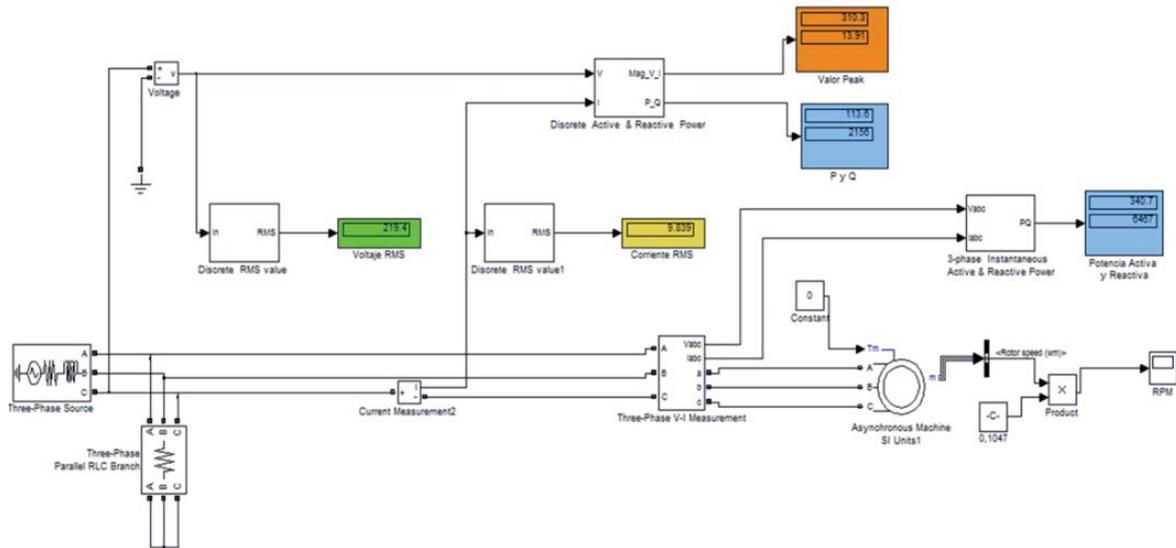


Figura 4-1: Simulación de Motor Inducción

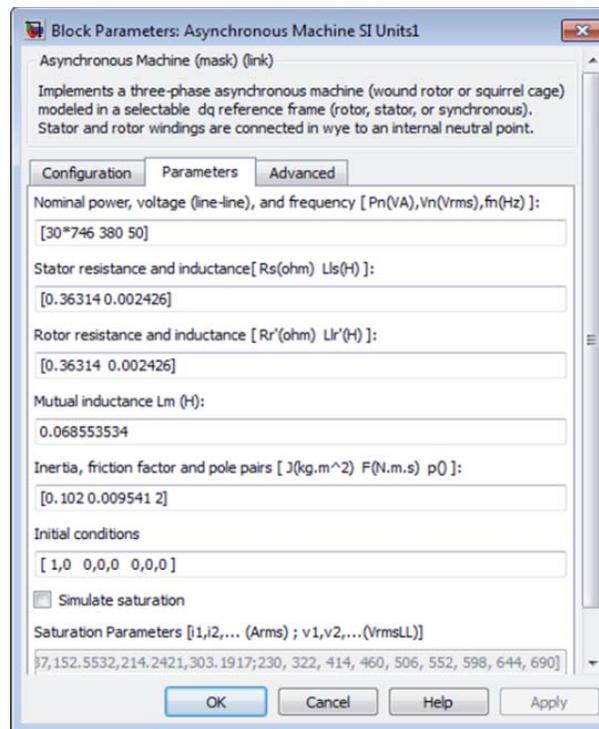


Figura 4-2: Ingreso de parámetros calculados del motor

- **Resultados Simulación**

A continuación se presentan los resultados en la Tabla 4-3 y curvas de simulación de variables medidas.

Tabla 4-3: Mediciones de Simulación y SAMTE

Medición	SAMTE	SIMULINK
V_{Teff}	222,5 [V]	219,4 [V]
I_{Teff}	9,7 [A]	9,83 [A]
$P_{1\phi}$	133,7[W]	113,8 [W]
$P_{3\phi}$	304,7 [W]	340,7 [W]

Se observa que las mediciones efectuadas en Simulink, son muy cercanas a las mediciones de laboratorio por equipo SAMTE.

A continuación en la Figura 4-3 se presenta la curva de corriente en la entrada del motor, luego en la Figura 4-4 se expresa el valor eficaz de voltaje y en la Figura 4-4 se obtiene la forma de onda de la Velocidad del motor.

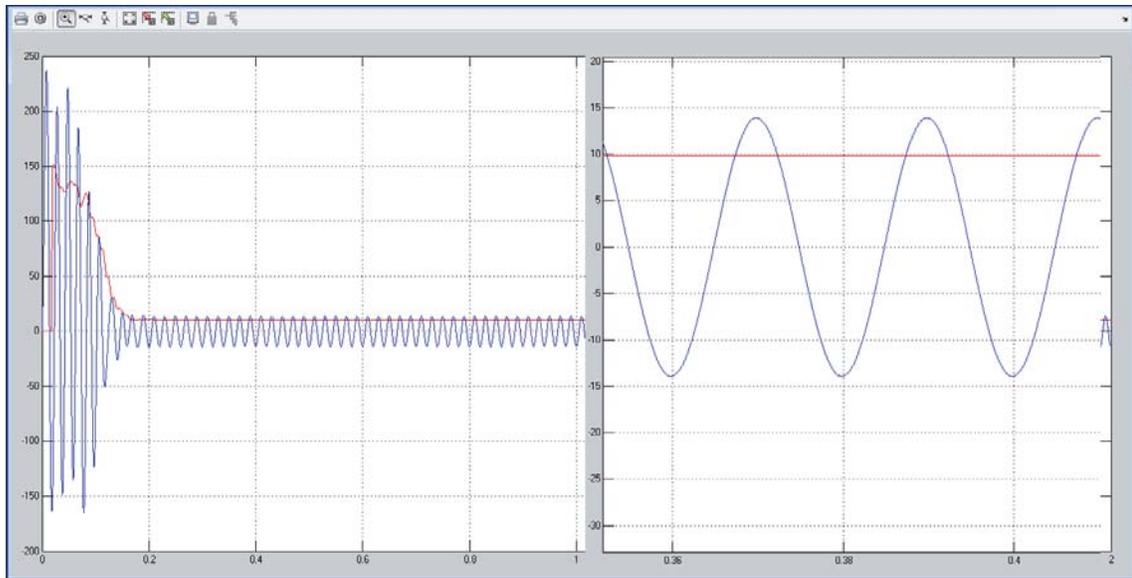


Figura 4-3: Corriente por fase (valor eficaz: 9,930 A)

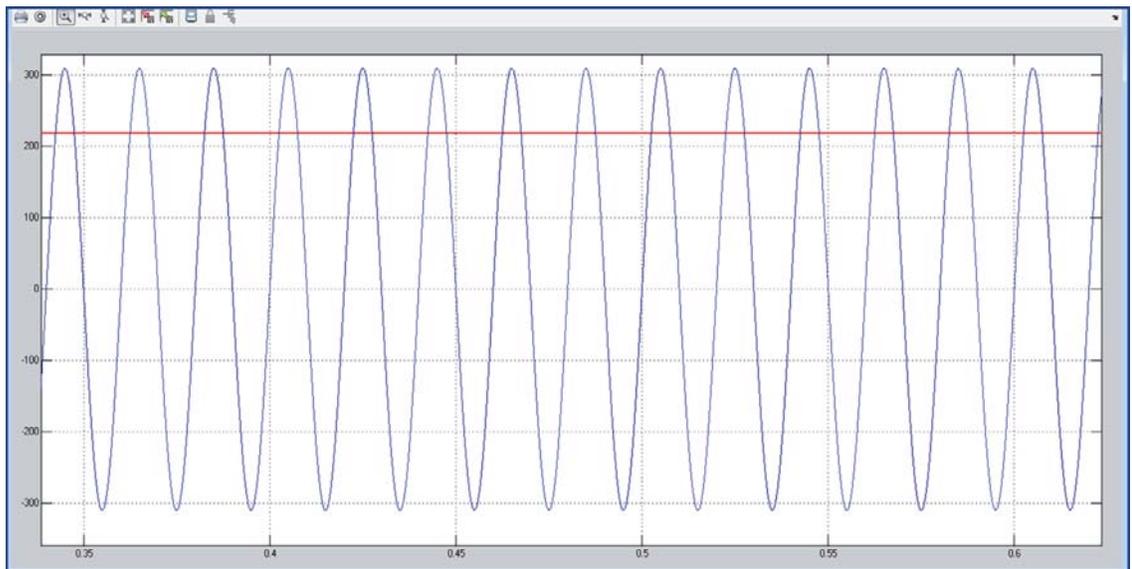


Figura 4-4: Voltaje por fase (valor eficaz: 219,4 V)

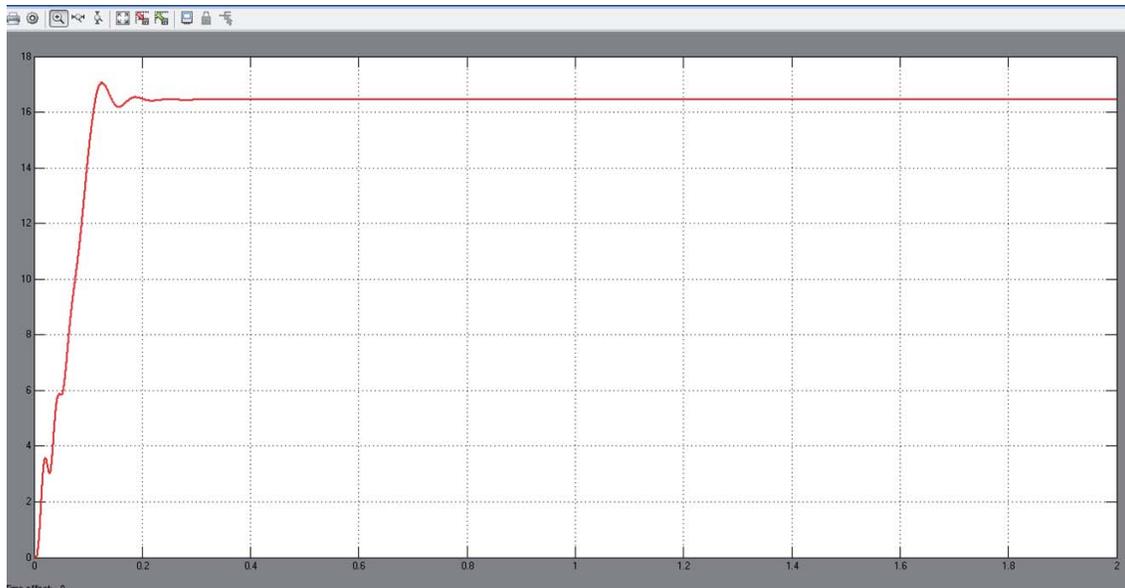


Figura 4-5: Velocidad del Motor (valor: 1500 RPM)

4.2 Comportamiento del Variador de Frecuencia SD700

Para comprender el funcionamiento y verificar con mediciones los valores que entrega el variador de frecuencia al motor, se realizó un procedimiento explicado en el Protocolo de Mediciones, el cual consiste en tomar mediciones de las variables de tensión, corriente, potencia y factor de potencia a diferentes frecuencias, con la finalidad de establecer una curva de control V/F y también identificar los valores que deben resultar en las simulaciones.

- **Mediciones con equipo de Medida SAMTE**

Tabla 4-4: Mediciones en Variador de Frecuencia

Fest	V			I			P			F.P			Nsinc	Nrot
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T		
10	56.5	56.5	56.5	9.26	9.71	9.41	83.15	84	71	0.16	0.16	0.14	300	297
15	82,3	81,4	82,3	9,30	9,50	9,40	137,7	138	135	0,18	0,18	0,18	450	448
20	105.6	105.6	105.3	9.29	9.59	9.56	165.3	203	180	0.17	0.2	0.19	600	596
30	148.4	148	147.7	9.49	9.70	9.50	267	266	262	0.2	0.19	0.19	900	897
40	188	187	187	9.60	9.70	9.70	387	387	362	0.2	0.19	0.19	1200	1196
50	230	228	230	9.65	9.73	9.68	441	444	413	0.2	0.2	0.19	1500	1495

Con los resultados obtenidos, en la Figura 4-6 se obtiene la relación V/Hz que será utilizada en las simulaciones para representar el comportamiento del Variador de Frecuencia.

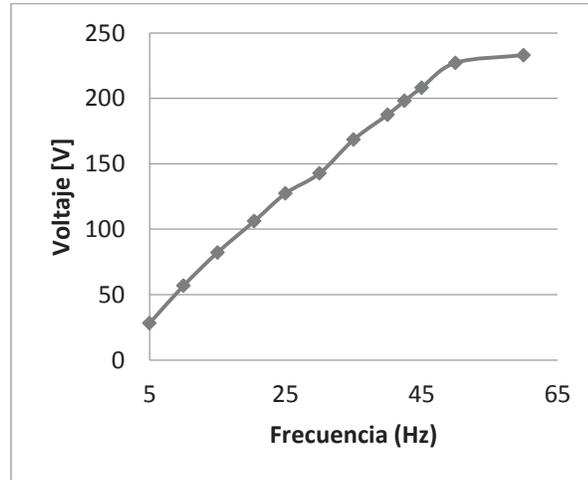


Figura 4-6: Característica Tensión v/s Frecuencia obtenida

4.2.1 Simulación y Resultados

Para el modelo del variador de frecuencia, mediante Control Escalar en lazo abierto, se utiliza una simulación existente en la base de datos de Matlab Simulink, con la finalidad de reemplazar los parámetros correspondientes al variador de frecuencia y al motor. Con esto se podrán comparar los resultados de la simulación respecto a los medidos en laboratorio. En la Figura 4-7 se observa el circuito a simular.

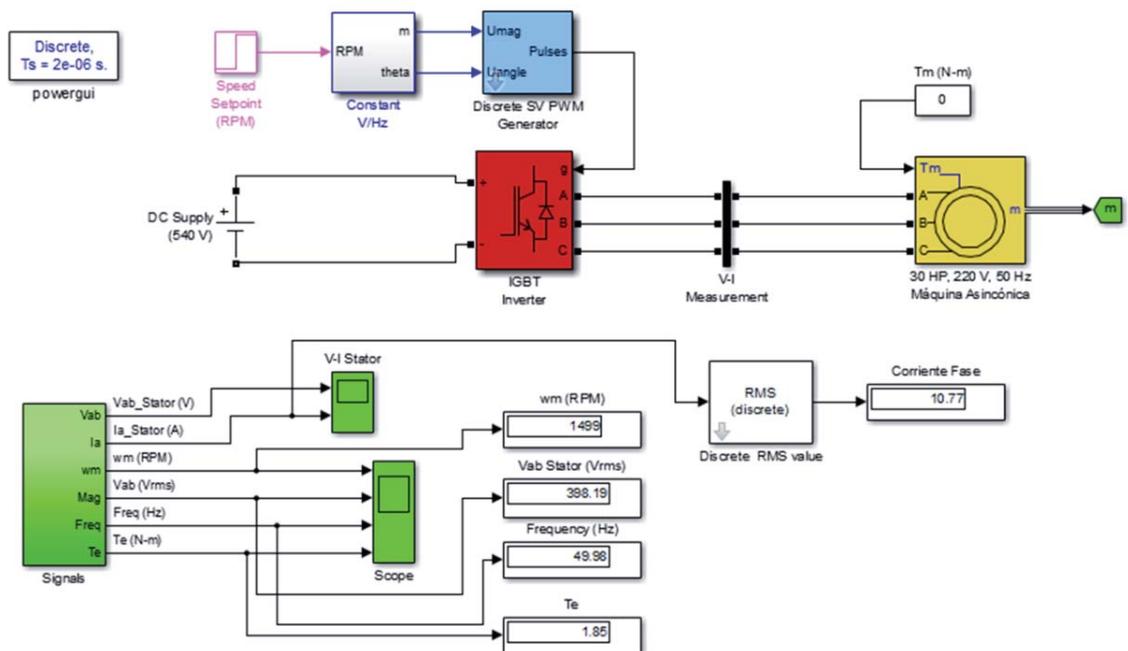


Figura 4-7: Circuito VDF-Motor, para corroborar parámetros

Primeramente, se ingresaron los parámetros del motor obtenidos en los cálculos anteriores.

Dentro del circuito de control, se reemplazó la información registrada en el bloque “Constant V/Hz”. La cual corresponde a las magnitudes y forma de la curva V/Hz, implementada para mantener el flujo magnético constante.

Para ajustar la curva en el software, con respecto a la representada en la Figura 4-6, se deben incorporar velocidades de referencia, con sus respectivos coeficientes que se obtienen de la relación Voltaje medido v/s Voltaje a velocidad nominal. En resumen, con cada frecuencia que se midió en el laboratorio, se debe asignar un coeficiente para poder establecer la curva V/Hz propia, perteneciente al Variador de Frecuencia SD700. En la Figura 4-8 se muestran los coeficientes que se encontraban en la base de datos del programa, los cuales serán reemplazados por los coeficientes obtenidos en la Tabla 4-5, que fueron calculados según la curva característica del VDF SD700 ubicado en el laboratorio.

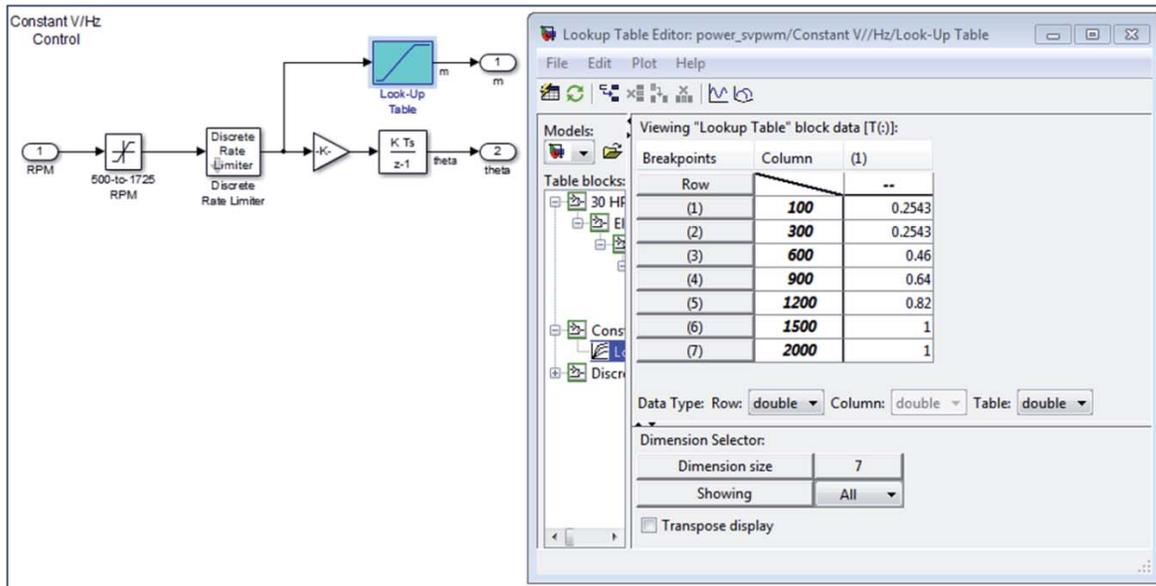


Figura 4-8: Modificación de curva V/Hz en Simulink.

Tabla 4-5: Coeficientes para Curva V/Hz

Frecuencia [Hz]	V_R	V_{ll}	$V_{ll}/V_{llnominal}$	Velocidad [RPM]
5	56,86	98,48	0,247	100
10	56,86	98,48	0,247	300
20	105,7	183,08	0,460	600
30	147,7	255,82	0,642	900
40	188,3	326,15	0,819	1200
50	230	398,37	1,000	1500

En la Figura 4-9, se observa la curva V/Hz obtenida según las medidas realizadas en laboratorio, representando el Variador de Frecuencia SD700.

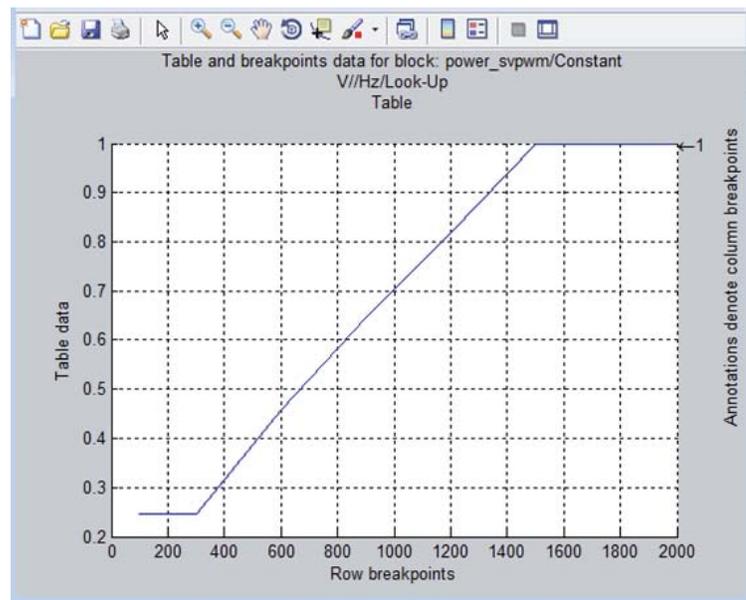


Figura 4-9: Curva V/Hz característica de VDF SD700.

Los valores en régimen permanente, concuerdan con los medidos en el laboratorio. En la Tabla 4-6 se observa la comparación de los resultados.

Tabla 4-6: Resultados obtenidos y comparados

Velocidad de Campo Configurada	Mediciones Laboratorio				Mediciones Simulink			
	F (Hz)	(V)	I (A)	Nrot (RPM)	F (Hz)	(V)	I (A)	Nrot (RPM)
600	20	106,2	9,4	597	19,77	104,0	12,63	599,6
900	30	142,7	9,6	897	29,96	148,5	10,36	899
1050	35	168,5	9,6	1046	35,02	168,1	11,03	1050
1200	40	187,5	9,6	1196	39,98	187,9	10,93	1200
1500	50	227,2	9,7	1495	50	229,9	10,10	1498

A continuación se observan las curvas medidas en Simulink, de diferentes variables eléctricas, para corroborar los resultados. En la Figura 4-10, las mediciones corresponden a Velocidad, voltaje, frecuencia y torque eléctrico.

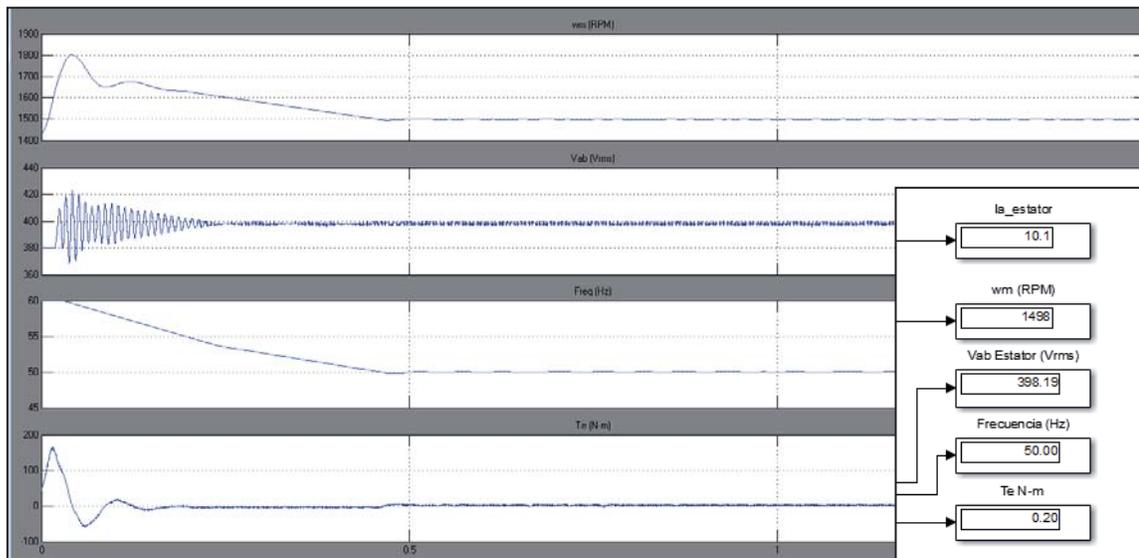


Figura 4-10: Mediciones en Simulink.

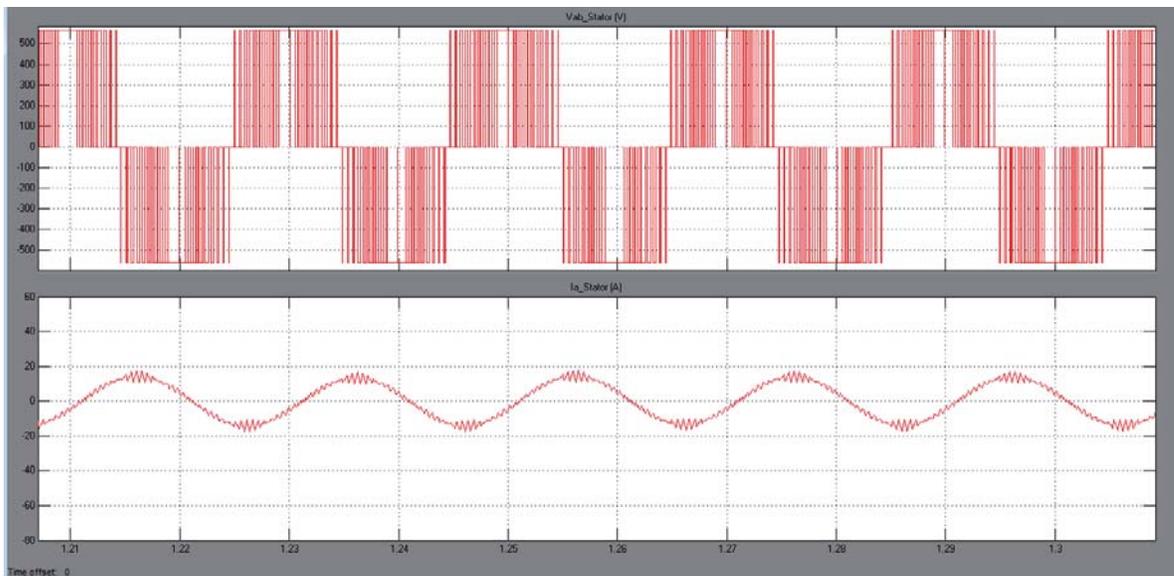


Figura 4-11: Mediciones de Voltaje y Corriente VDF

4.3 Simulación VDF SD700 y comportamiento en Régimen Permanente

En la Figura 4-12 se presenta el circuito del variador de frecuencia, considerando la red, la etapa rectificadora y el Bus CC.

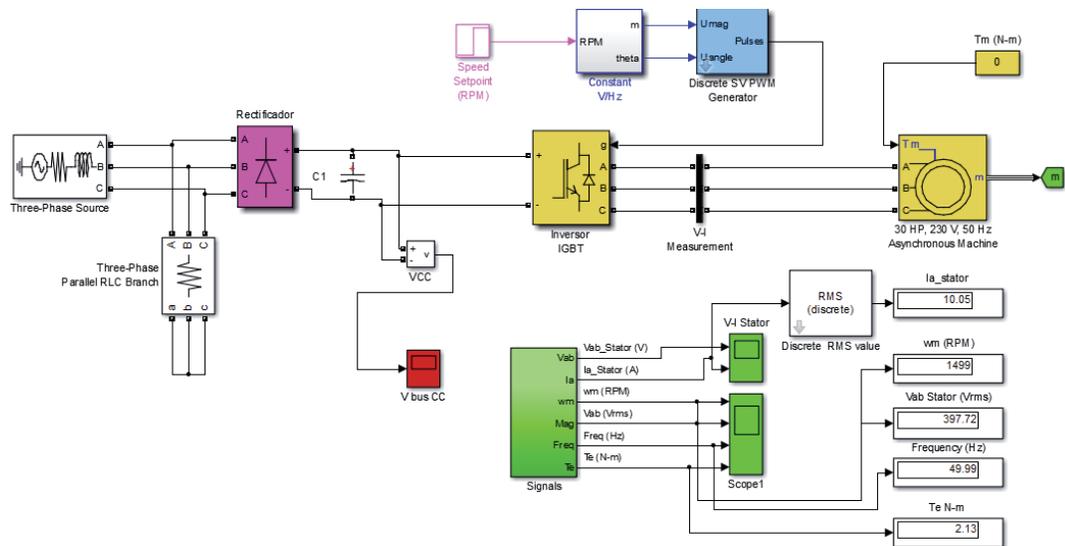


Figura 4-12: Circuito Completo del Variador de Frecuencia.

En la Figura 3-9 se observa el circuito del variador de frecuencia. A continuación se realizarán los cálculos respectivos para cada etapa en régimen permanente.

- Variables de Entrada

$$V_{eff} = 230 [V]$$

$$F = 50 [Hz]$$

- Tensión Rectificador

$$V_{Cmed} = 2,34 * 230 [V]$$

$$V_{Cmed} = 538 [V]$$

Como se instala un capacitor de gran capacidad, el valor medio de la tensión continua, tenderá ser el peak de la señal rectificadora.

$$V_{Cmed} = \sqrt{2}\sqrt{3} * 230[V]$$

$$V_{Cmed} = 567 [V]$$

- Variables de Salida

$$V_{seff} = 230[V]$$

$$F = 50 [Hz]$$

$$W_{sinc} = 1500 [RPM]$$

$$W_{rotor} = 1495 [RPM]$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{4-4}$$

$$S = 0,33 [\%]$$

4.4 Rampas de Desaceleración y Regeneración

Para analizar el fenómeno de Regeneración es necesario observar en Laboratorio cómo se comporta el variador de frecuencia ante diferentes rampas de Desaceleración y cómo reacciona el motor ante éstas rampas.

- **Experiencia en Laboratorio**

La intención de la experiencia en el laboratorio, es observar cuándo y cómo se produce el fenómeno de regeneración con el motor en vacío, lo cual se detectarán los niveles de tensión regenerada en el Bus CC y se observará cómo se corta la regeneración debido a la protección de

sobretensión. Estas pruebas se realizaron con diferentes rampas y cargas, lo cual se obtuvieron los siguientes resultados en las Tablas 4-7 y 4-8.

Tabla 4-7: Mediciones con Rampa de Desaceleración al 10%

Frecuencia (Hz)	Rampa Desaceleración	Tensión normal en Bus CC	Tensión Máxima Bus CC [V]
10	10 %	567	580
20	10 %	567	671
30	10 %	568	812
40	10 %	572	840
50	10 %	572	842

Tabla 4-8: Mediciones con Rampa de Desaceleración al 15%

Frecuencia (Hz)	Rampa Desaceleración	Tensión normal en Bus CC	Tensión Máxima Bus CC [V]
10	15 %	567	610
20	15 %	567	751
30	15 %	568	850
40	15 %	572	850
50	15 %	572	850

Primeramente, se tomaron mediciones con el motor sin cargas asociadas, para identificar el comportamiento a diferentes rampas de desaceleración, por tanto, se aplicaron dos rampas, una de 10% y otra de 15%, significa que la tensión y frecuencia aplicada al motor, disminuirán 10 o 15 % cada 1 segundo, respecto al valor que se encontraba funcionando el variador en régimen permanente.

Se observa que en vacío, con una rampa de 10%, a una velocidad baja (con frecuencia de 10 Hz), el motor ya regenera, pero no lo suficiente para obtener un voltaje de 850 [V] en el Bus CC.

Y respecto a la rampa de 15%, con la misma velocidad, regenera una mayor energía, por tanto, en las siguientes mediciones se observó que con la rampa de 10%, a 50 Hz, es decir a la velocidad nominal del motor, la máquina si regeneró energía, pero no superó los límites establecidos por la protección, en cambio con la rampa de 15%, a una velocidad media (con frecuencia de 30 Hz), la máquina regeneró hasta superar la tensión máxima en el Bus CC.

Luego, si acoplamos un generador de CC al eje del motor de Inducción y alimentamos una carga de ampolletas resistivas, se observarán otros comportamientos, de los cuales existen registros con videos, pero en resumen consiste en lo siguiente:

1.- Primeramente, se configuró el variador para obtener una frecuencia de 40 Hz y se aplicó una carga resistiva de 200 [W], en el generador, luego se aplicó una Rampa de 15%, y se observó que la carga no ejercía un gran torque contrario en el eje del motor, por tanto comenzó a subir la tensión en el Bus CC, hasta superar el límite de regeneración y el VDF soltó el motor hasta detenerse solo. Observar en Figura 4-13.



Figura 4-13: Carga resistiva de 200 [W]

2.- En el segundo caso, se encendieron todas las ampolletas, sumando un consumo total de 9 [KW] aproximadamente, luego se aplicaron las mismas condiciones que en el primer caso, es decir 40 Hz y una rampa de 15 %, lo cual, se observó que el eje se tornó más pesado y se produjo regeneración pero sin aumentar la tensión del Bus CC, en gran cantidad y el motor se detuvo rápidamente. Observar en Figura 4-14.



Figura 4-14: Carga de 9000 [W]

En el Protocolo de Mediciones, se utilizó un software llamado PowerComms para poder efectuar la medición en el Bus CC del alza de voltaje y la actuación de la protección por sobretensión.

4.5 Modelo VDF con Rama Disipativa

En la Figura 4-15, se presenta el modelo final del Variador de Frecuencia SD700, con la rama disipativa incorporada y también con todas las modificaciones relevantes, es decir, el VDF cuenta con los capacitores adecuados a la realidad, que son 2 capacitores de 470 μF en serie. Además la frecuencia de conmutación fue adecuada a valores reales del variador de frecuencia SD700, por tanto se ajustó a 4 kHz y la curva de control V/Hz se ajusta tal como se analizó en un principio.

Respecto a la rama disipativa, se conecta en paralelo al Bus CC y consiste en un séptimo IGBT con una resistencia para disipar la energía, y además un sistema de control que se basa en la lógica expresada en la Figura 3-17.

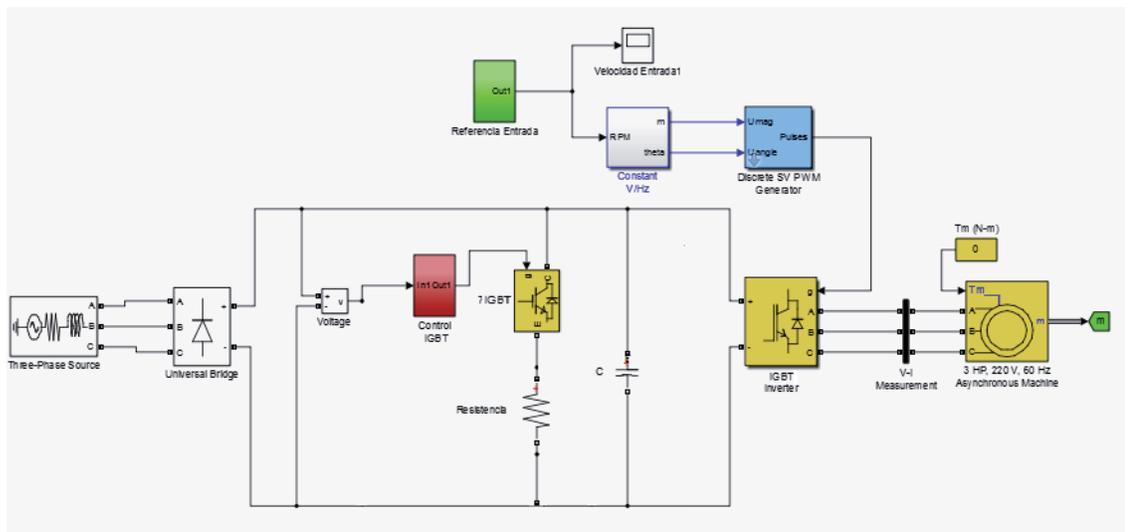


Figura 4-15: Circuito final del VDF SD700 con Rama Disipativa.

4.5.1 Circuito de Control Séptimo IGBT

La lógica del circuito es explicada en el capítulo 3, por tanto en la Figura 4-16 sólo se muestra el circuito lógico desarrollado.

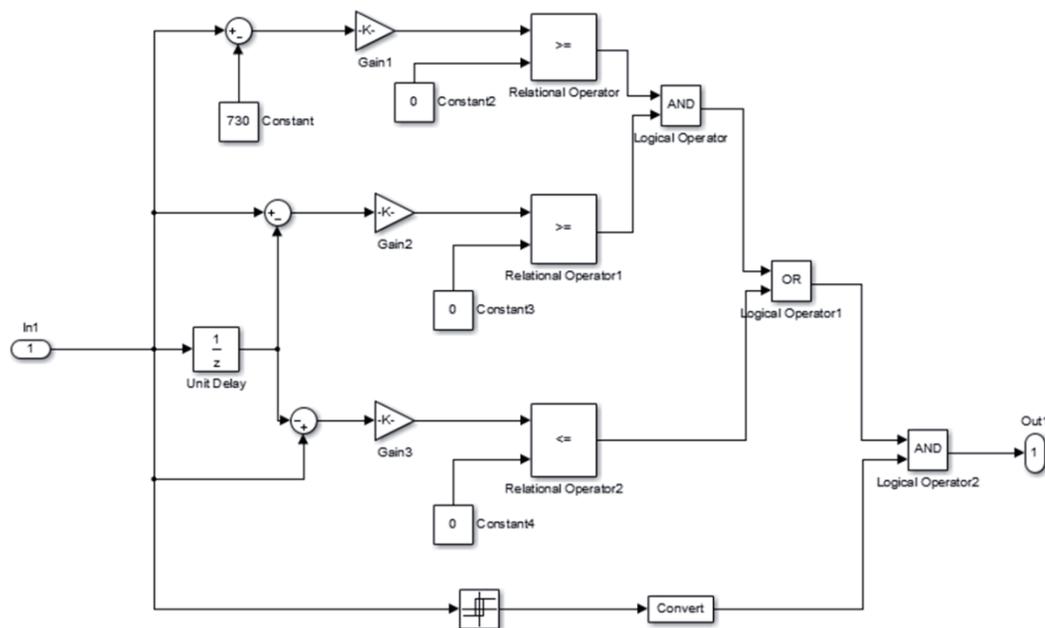


Figura 4-16: Circuito Lógico en Matlab Simulink.

4.5.2 Resistencia de Rama disipativa

El valor de la resistencia a implementar, se calcula en base a la condición de laboratorio. El motor se encuentra en vacío a velocidad nominal, se considera un consumo de 1706 [W] de potencia, por tanto, equivale a un 7,5% de la potencia nominal del motor. Con estos antecedentes se obtiene el siguiente valor:

$$P = 1706 [W]$$

$$V_{superior} = 730 [V]$$

$$I_{resistor} = \frac{P_{nominal}[kW]}{V_{superior}[V]} \quad (4-5)$$

$$I_{resistor} = \frac{1,706}{730}$$

$$I_{resistor} = 2,33 [A]$$

$$R_{disipativa} = \frac{V_{superior}[V]}{I_{resistor}} \quad (4-6)$$

$$R_{disipativa} = \frac{730}{2,33}$$

$$R_{comercial} = 330 \Omega$$

La resistencia debe ser diseñada para soportar una potencia máxima de 1706 [W] (para caso estudiado). Debido que en aplicaciones reales, es probable que haya mayor regeneración y la resistencia tome otro valor óhmico y también en términos de potencia, pero en cualquiera de los casos, es recomendable proyectar una resistencia con un mayor margen de potencia, respecto a la regenerada por el motor.

4.5.3 Curvas de Regeneración, Disipación y Frenado

A continuación se presentarán los resultados finales, en base a la incorporación de la Rama disipativa en el circuito del variador de frecuencia SD700.

Se compararán simulaciones finales, con diferentes casos de cargas, verificando el frenado y el control de la tensión en el Bus CC. Los 2 casos corresponden a motor en vacío y motor con carga. El motor en vacío con una inercia menor al motor con carga.

Para ambos casos, se simulará primeramente sin aplicar la rama disipativa, para luego hacer una comparación en las curvas de frenado y de tensión en el bus CC.

Caso.1a.- Motor en Vacío/Inercia: 0,12 Kg*m², Rampa: 20% /Sin Rama disipativa

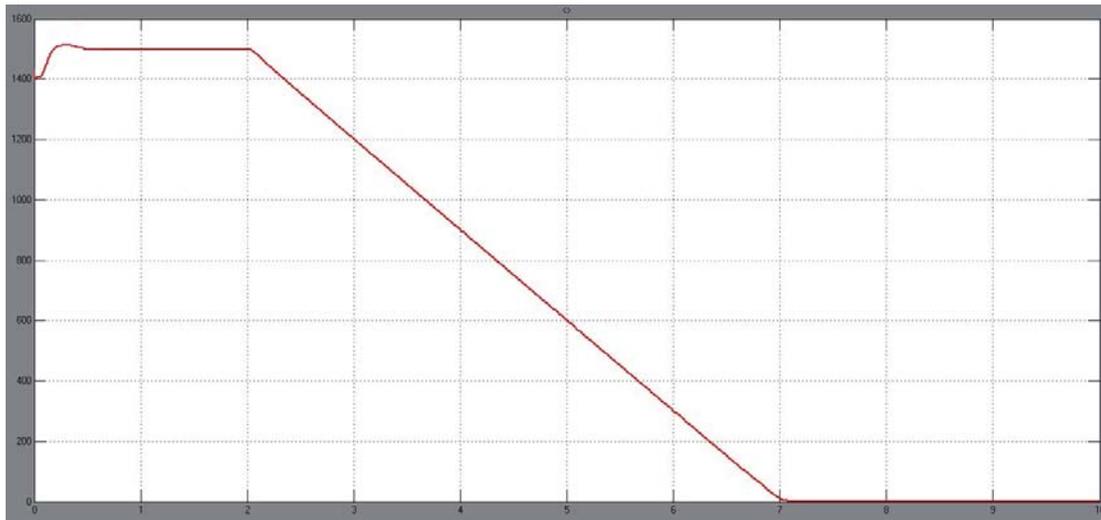


Figura 4-17: Curva de Velocidad en condiciones normales.

Se observa que el gráfico de velocidad, el motor para después de 5 segundos de haber activado la rampa de Desaceleración.

Caso.1b.- Motor en Vacío/Inercia: 0,12 Kg*m², Rampa: 20% /Con Rama Disipativa 330 Ohm.

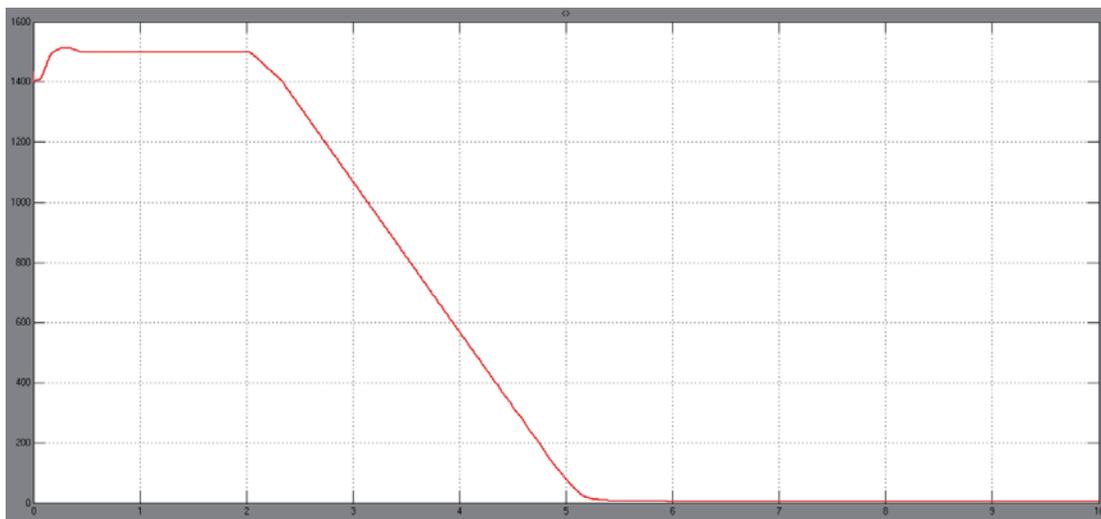


Figura 4-18: Curva de velocidad con aplicación de Rama Disipativa. (frena más rápido)

Se observa que el gráfico de velocidad, el motor se detiene después de 3 segundos de haber activado la rampa de Desaceleración.

Caso.1a.- Motor en Vacío/Inercia: 0,12 Kg*m2, Rampa: 20% /Sin Rama Disipativa

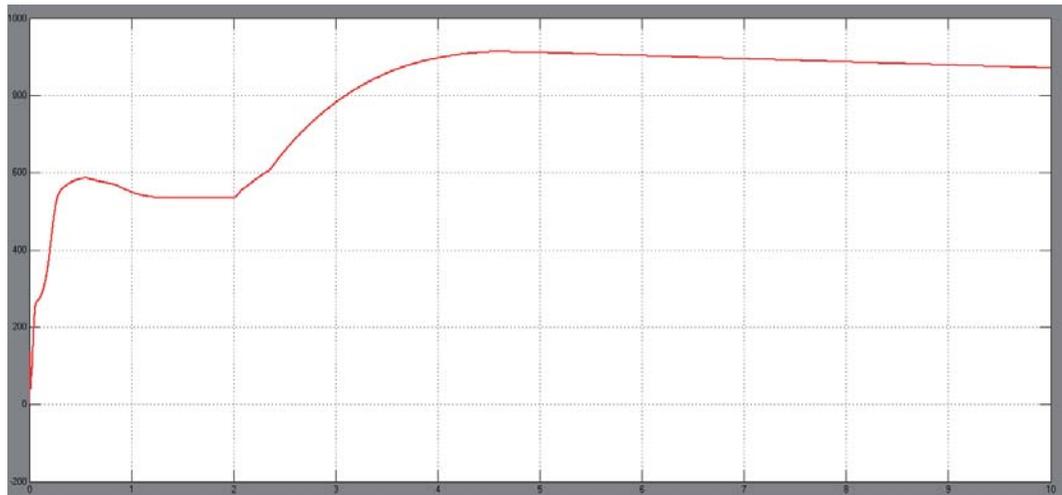


Figura 4-19: Curva de Voltaje Bus CC en condiciones normales.

El voltaje no es controlado y excede la tensión que soportan los Capacitores (850 V). En la realidad se activa protección por sobretensión.

Caso.1b.- Motor en Vacío/Inercia: 0,12 Kg*m2, Rampa: 20% /Con Rama Disipativa 330 Ohm.

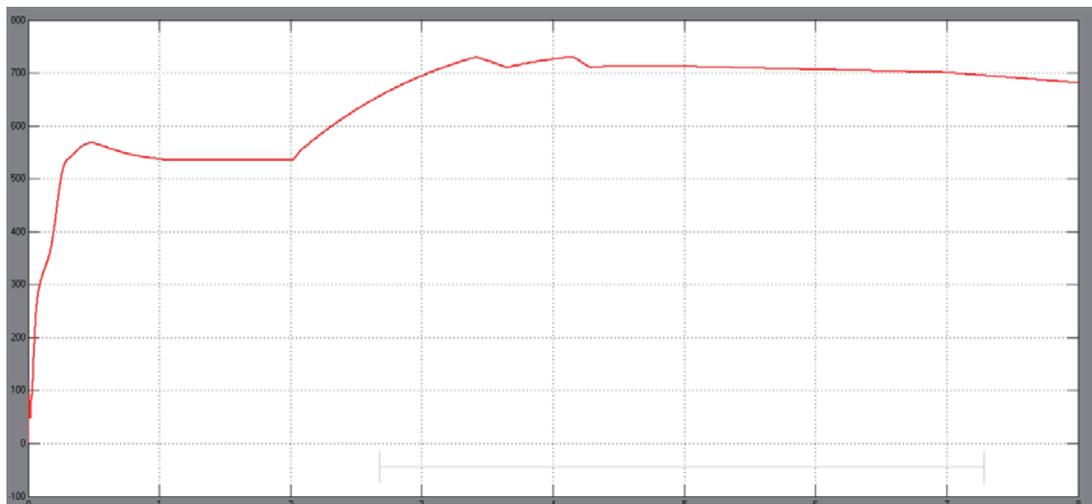


Figura 4-20: Curva de Voltaje Bus CC, con rama disipativa aplicada.

Se observa que el voltaje es limitado a 730 V y la potencia es disipada por Resistor de 330 Ω

Caso.2a.- Motor con Carga 10Nm /Inercia: 0,2 Kg*m2, Rampa: 20% / sin Rama disipativa

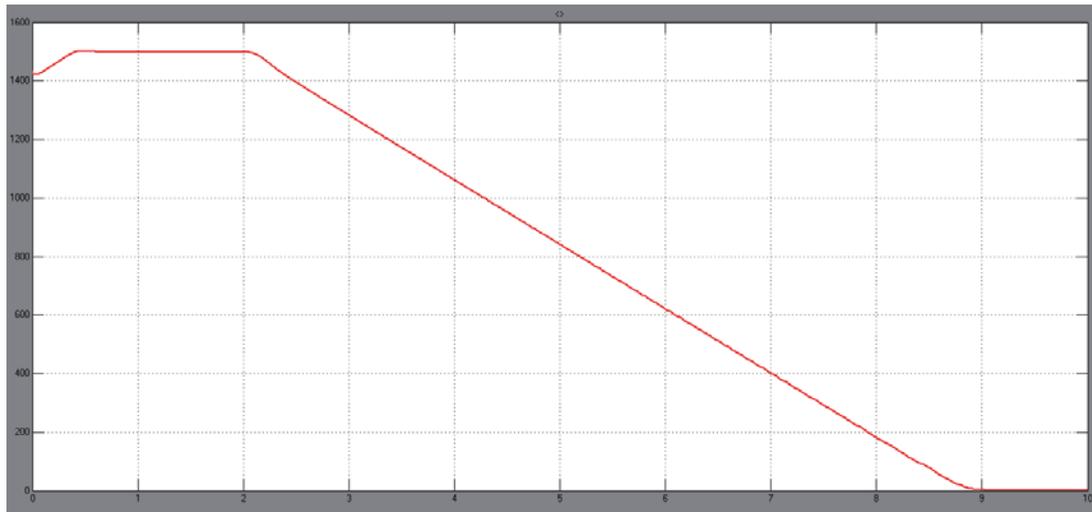


Figura 4-21: Curva de Velocidad en condiciones con carga e inercia.

Se observa que el gráfico de velocidad, el motor para después de 7 segundos de haber activado la rampa de Desaceleración.

Caso.2b.- Motor con Carga 10Nm /Inercia: 0,2 Kg*m2, Rampa: 20% / con Rama disipativa

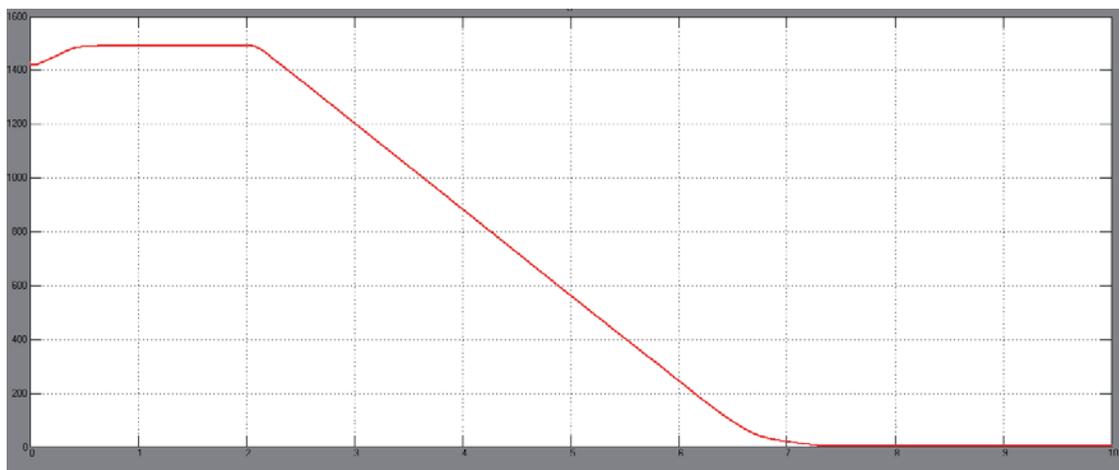


Figura 4-22: Curva de Velocidad en condiciones con carga y rama disipativa aplicada.

Se observa que el gráfico de velocidad, el motor para después de 5 segundos de haber activado la rampa de Desaceleración.

Caso.2a.- Motor en Vacío/Inercia: 0,12 Kg*m2, Rampa: 20% /Sin Rama Disipativa

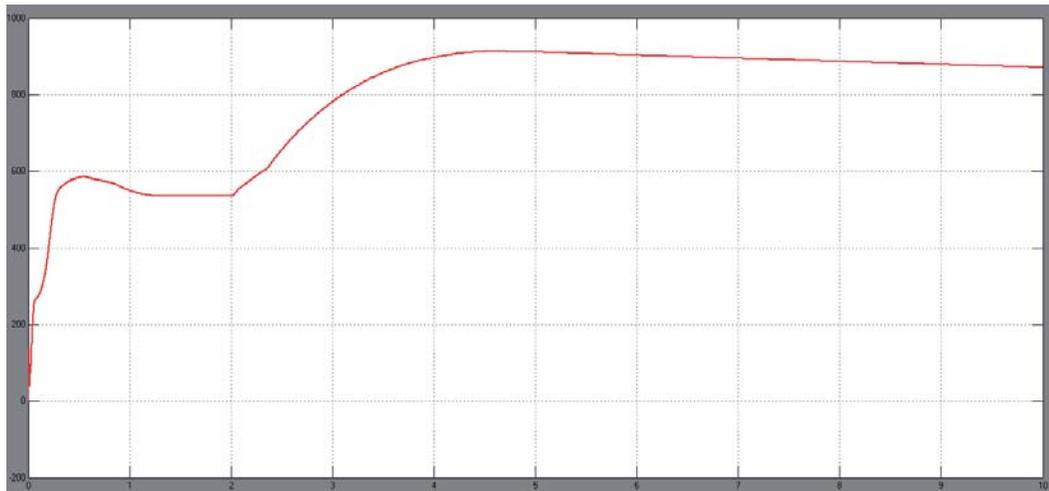


Figura 4-23: Curva de tensión medida en el Bus CC

Voltaje no controlado y excede la tensión que soportan los Capacitores (850 V). En la realidad se activa protección por sobretensión.

Caso.2b.- Motor en Vacío/Inercia: 0,12 Kg*m2, Rampa: 20% /Co Rama Disipativa

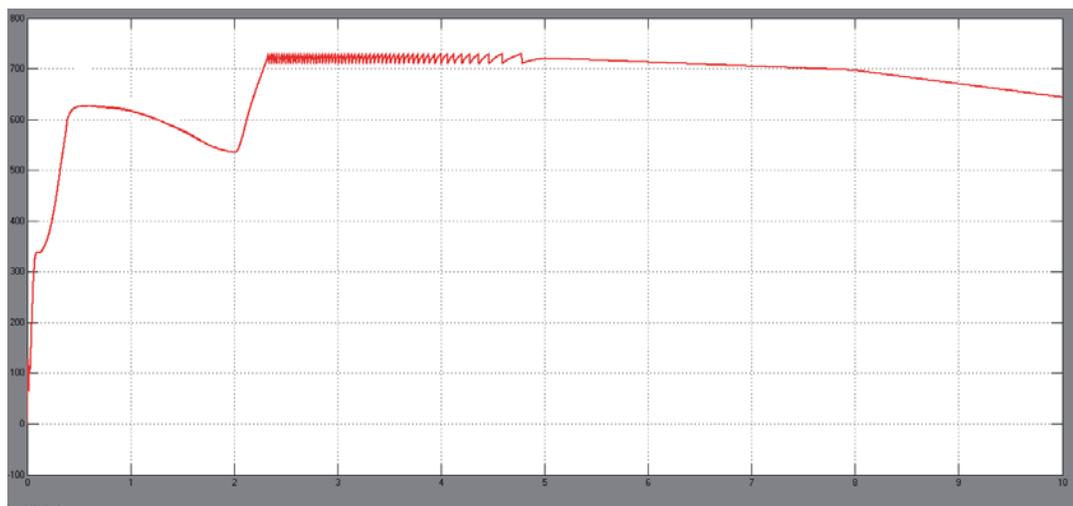


Figura 4-24: Curva de tensión medida en el Bus CC

Voltaje limitado a 730 V y potencia disipada por Resistor de 330 Ω . En un zoom realizado de la medición, se determinó un periodo estimativo, que considera dos tiempos y la diferencia elevado a menos 1 consiste en la frecuencia de conmutación.

Según las ecuaciones (3-12) y (3-13), se obtiene la siguiente frecuencia de conmutación para el caso analizado.

$$T = 3,122758 - 3,122737$$

$$T = 0,000021 \text{ (s)}$$

$$F = \frac{1}{0,000021}$$

$$F \approx 48 \text{ kHz}$$

Por tanto la frecuencia de conmutación que se debería proyectar para un adecuado uso del IGBT de la rama disipativa, corresponde a 48 kHz.

4.6 Evaluación de Costos por Implementación de Rama Disipativa

Implementar la Rama Disipativa en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, considera costos de equipos y también por servicio de instalación, lo cual, se realizó una cotización a modo de estudio con la empresa AVI Chile, quienes donaron el Variador de Frecuencia SD700 a la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

Para realizar el frenado disipativo, es necesaria la intervención de un módulo externo, según lo analizado en el capítulo 2, ya que el Variador de Frecuencia SD700 existente en laboratorio es Talla 5 y no cuenta con el sistema interno para conectar directamente una resistencia de frenado. Por tanto, dentro de los costos por equipamiento, se deberá considerar el valor del Módulo B150 de Frenado Dinámico (especial para el VDF SD700).

Y el otro componente importante que se debe considerar dentro de los costos de equipamiento, es el banco de resistencias que permita absorber y disipar la potencia regenerada por el motor, causada por una fuerte desaceleración o debido a características de la carga (cintas regeneradoras regenerativas, ascensores, grúas, etc.). Para el caso de Laboratorio, se estudia una máquina en vacío y la aplicación de una gran desaceleración, regenerándose una potencia de 1,7 [kW], por tanto, se solicitó a la empresa un banco de resistencias que puedan disipar una potencia aproximada de 2 [kW].

El costo por servicio de instalación, variará según los costos fijos, gastos generales y horas hombre que considere la empresa que emita el presupuesto. Pero de todas formas valor puede ser omitido, debido que existen manuales del módulo B150, donde se aprecian procedimientos de instalación bastante sencillos que podrían ser ejecutados por alumnos memoristas junto con supervisión de profesores.

A continuación, se aprecian los costos obtenidos a través de una cotización por estudio, en la Tabla 4-9 se observan los costos de los equipos y accesorios para realizar la interconexión entre los módulos y en la Tabla 4-10 se reflejan los costos por servicio de instalación:

Tabla 4-9: Costos asociados a Implementación de Equipos

Costos de Equipos	
Unidad de Frenado Dinámico B150	\$480.000
Banco de Resistencia con Potencia 2 [kW]	\$400.000
Conductores, Fusibles, Protecciones y otros	\$250.000

Tabla 4-10: Costos asociados a Servicio de Instalación

Costos de Instalación	
Servicio de Instalación Rama Disipativa	\$700.000

Por tanto, el costo total comprendido en la instalación del equipamiento completo para el frenado disipativo en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, considera un valor de **\$1.830.000.-** Es importante señalar que el valor podría variar y también puede ser reducido en base a lo planteado anteriormente, respecto a la instalación por parte de memoristas.

5 Discusión y Conclusiones

Es importante destacar que el uso de los variadores de frecuencia, proporcionan mejoras en la industria, debido que la ejecución de los procesos torna a ser más eficiente, ya que, es posible obtener un control adecuado para la utilización de las máquinas eléctricas, dependiendo el tipo de control que se implemente, ya sea control escalar o vectorial.

En este caso en particular, se estudió la manipulación del Variador de Frecuencia con Control Escalar en Lazo Abierto, debido que el VDF SD700 se encontraba configurado con tipo de control. Siendo un control más sencillo, ya que el variador solo se debe mantener el flujo magnético constante a través de la relación “V/F”, por tanto se observó en las mediciones que se cumplía ésta condición, excepto en frecuencias bajas y altas, donde existía un debilitamiento del flujo debido a características propias del control Escalar.

Por tanto, al tener la característica del VDF SD700, fue posible desarrollar un modelo y simulación adecuada y acorde a la realidad, ya que, se obtuvieron valores que concordaron con las mediciones efectuadas en laboratorio.

Respecto al desarrollo de la rama disipativa, se logró cumplir con los objetivos del proyecto, los que consistían en modelar y simular el frenado disipativo del motor, obteniendo un control adecuado de la energía regenerada que se reflejaba en el incremento de tensión en los terminales del Bus CC, es decir, en relación al nivel de tensión que debía controlar la rama para resguardar los IGBT's del inversor, fue posible desarrollar un circuito lógico en Simulink para el control de la activación y desactivación del transistor perteneciente a la rama disipativa, donde el circuito eléctrico de la rama, fue desarrollado en base a información obtenida de un módulo de frenado dinámico B150, que es especial para el Variador de Frecuencia SD700.

Respecto al cálculo de la resistencia incorporada en la rama, se utilizó un criterio sencillo aplicado generalmente en el sector minero. No fue posible realizar un cálculo más exacto, ya que, no se contaba con la información correspondiente, debido a la antigüedad de la máquina eléctrica conectada al VDF SD700, pero de todas formas, el cálculo realizado fue coherente y se obtuvo el valor óhmico y térmico en relación a la situación de máquina conectada al VDF SD700.

En relación a los objetivos del proyecto, fueron cumplidos a medida que fue desarrollado el proyecto. Los objetivos específicos se basaban en tres aspectos, primeramente en desarrollar el modelo y simular para verificar si cumplía con la situación observada en el Laboratorio, luego una vez perfeccionado el circuito del variador junto con su sistema de control, se consideró un segundo aspecto, que se basó en el desarrollo de la Rama Disipativa, la cual requirió de investigación y análisis de características de regeneración y por último, teniendo cumplido ambos objetivos anteriores, se dio enfoque en analizar diferentes situaciones donde se manipuló la carga y también la resistencia de frenado, para obtener diversas conclusiones que fueron observadas en el capítulo 4.

Es necesario mencionar que puede ser factible un desarrollo más concreto de la comparación de la Rama Disipativa proyectada en el modelo respecto a una rama disipativa implementada físicamente en el Variador de Frecuencia SD700 del laboratorio. Por tanto, en base al análisis de costos, estos podrían ser reducidos al valor de la Unidad de Frenado Dinámico B150 y al banco de resistencias aplicada, que según cálculos y análisis de regeneración, es de una baja potencia, debido a las condiciones existentes en el laboratorio, lo cual, la obtención de fondos podría ser más posible para implementar la Rama Disipativa, ya que, realizar la interconexión de los módulos formaría parte de un valor agregado para un proyecto en desarrollo de un alumno memorista. Por tanto, siendo conectado el Frenado Disipativo, será posible ejecutar mayores mediciones para comprender de mejor forma la característica regenerativa de los Motores de Inducción. En comparación a un sistema regenerativo con inyección de energía a la red, es bastante más sencilla y económica la implementación del sistema con frenado disipativo.

También conjunto a las simulaciones, información y protocolo de mediciones, se pueden realizar nuevas actividades en asignaturas obligatorias y optativas, para que los alumnos entiendan con mayor profundidad el uso y características de los Variadores de Frecuencia y tipos de Frenado, ya que, son prácticas bastantes utilizadas en la práctica.

Bibliografía

- [1] E. M. S., «Enrique Muñoz S. Blog Profesional Dedicado a la Ingeniería Industrial,» 04 Junio 2003. [En línea]. Available: <http://blog.enrimusa.com/>.
- [2] P. E. Valenzuela, «Varimak, Nota Numero 7,» 07 Marzo 2011. [En línea]. Available: <http://www.varimak.com/nota7.htm>.
- [3] Power Electronics Academy, «Capitulo 3 "Variadores de Velocidad" Seminario Técnico SD700,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.power-electronics.com>.
- [4] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, Madrid, 2003.
- [5] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, 2000.
- [6] Power Electrónica, Variador de Velocidad SD700, Manual de Hardware e Instalación, 2012.
- [7] Power Electronics, Unidad de Frenado Dinámico B150, 2012.
- [8] Motortico, «Motortico, Control Escalar V/Hz en Variadores de Frecuencia,» 12 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://www.motortico.com/>.
- [9] Antech El Salvador, «Antech El Salvador, Qué es el Freno Dinámico,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.antechsv.com>.
- [10] Ancap, «Dispositivos Electrónica de potencia Cap 2.,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.ancap.com.uy>.

A Protocolo de Mediciones VDF SD700

A.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. En la Figura A-1 se observa el módulo del variador de frecuencia SD700.



Figura A-1: Módulo interacción VDF SD700

- **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 desaceleración, 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 desaceleración. 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.

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

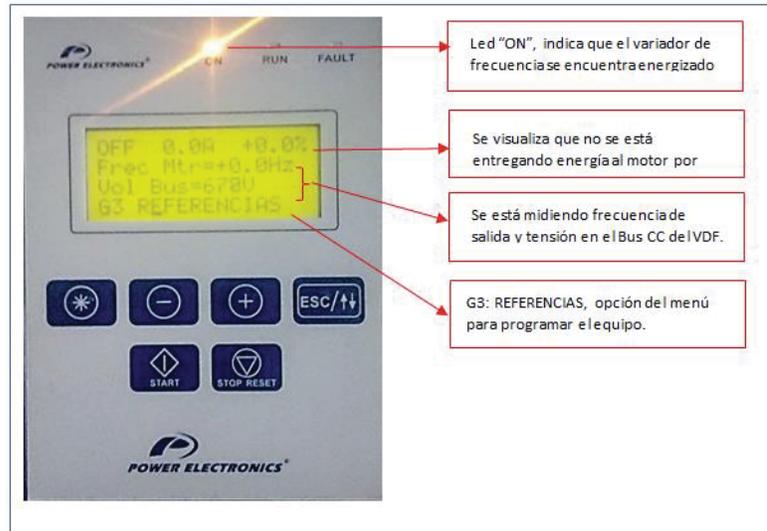


Figura A-2: Opción para programar Referencias.



Figura A-3: Modificación de porcentaje de Velocidad que se requiere.



Figura A-4: Configuración de rampas de aceleración y desaceleración.

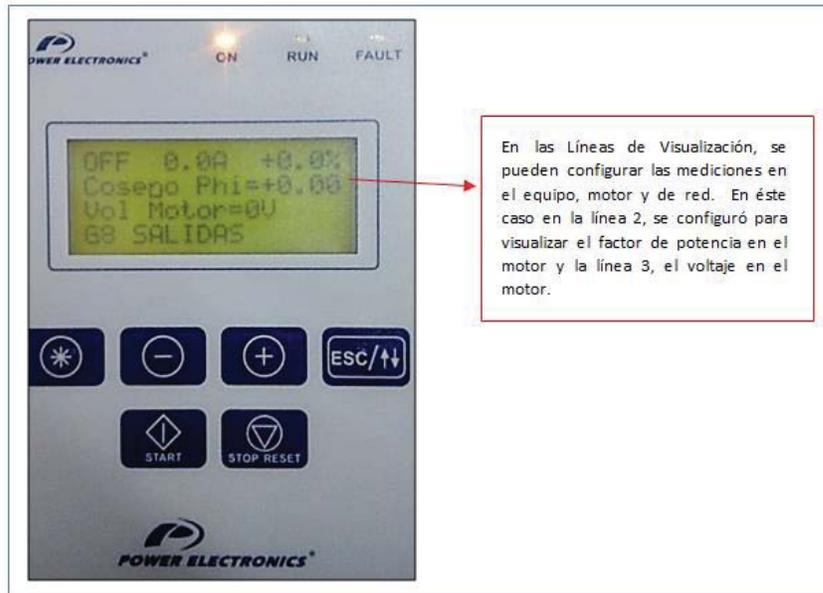


Figura A-5: Configuración de parámetros a visualizar en mediciones.

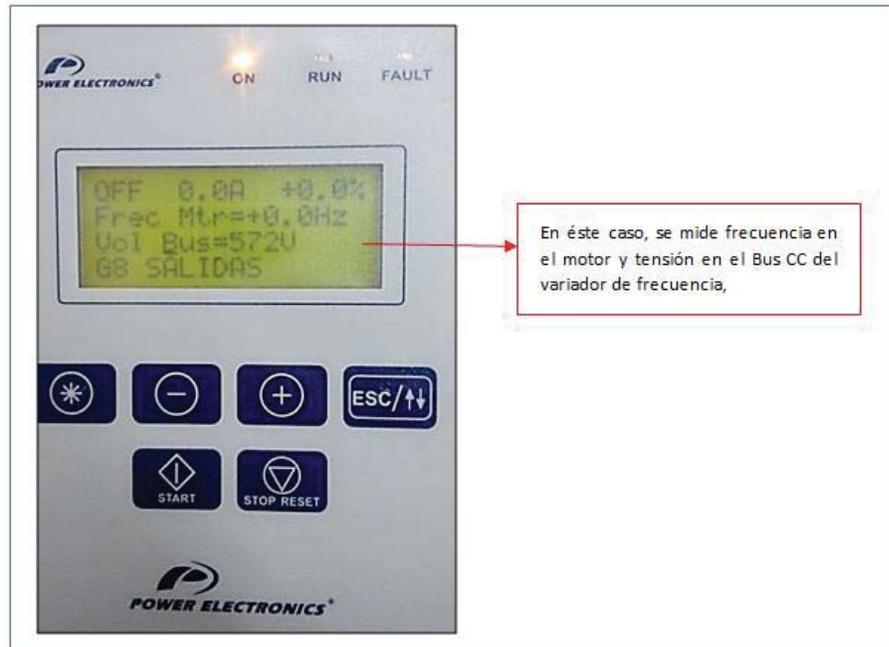


Figura A-6: Configuración de parámetros a visualizar en mediciones.

A.2 Mediciones del Comportamiento del Motor a Diferentes Frecuencias

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 en la Figura A-7 se presenta un diagrama de bloques, indicando cómo se deben conectar los instrumentos para efectuar las mediciones.

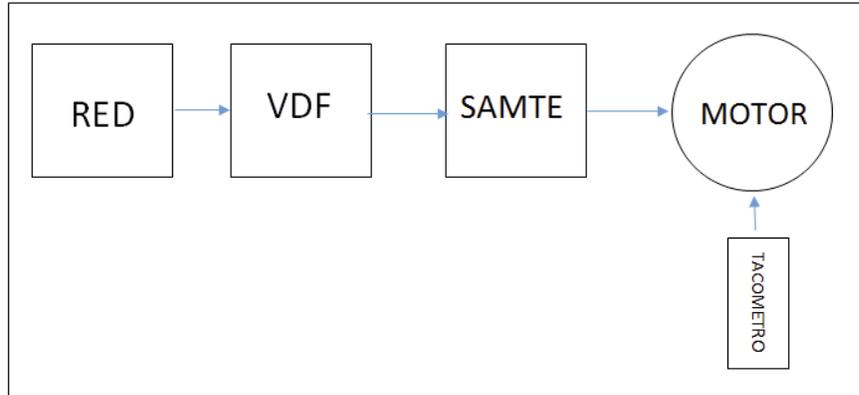


Figura A-7: Esquema simple de conexiones para mediciones.

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.

- **Esquema de conexiones de equipos de medida**

En la Figura A-8, se muestra el esquema de conexiones entre el variador de frecuencia, el equipo de medida SAMTE y el motor.

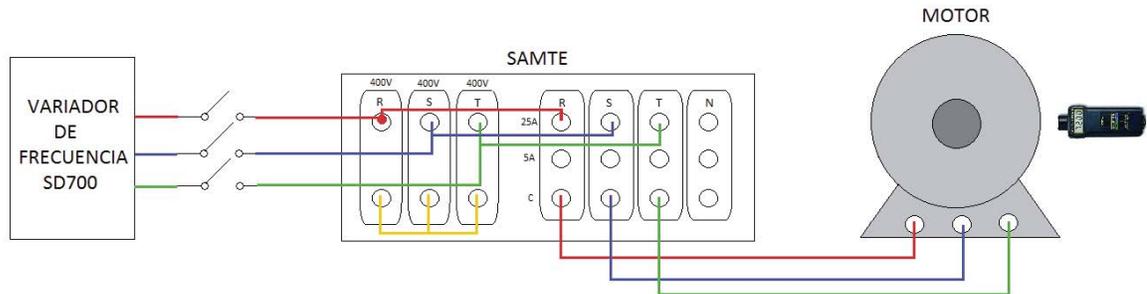


Figura A-8: Diagrama detallado de conexiones para mediciones

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



Figura A-9: Instrumentos y máquinas utilizadas en los ensayos

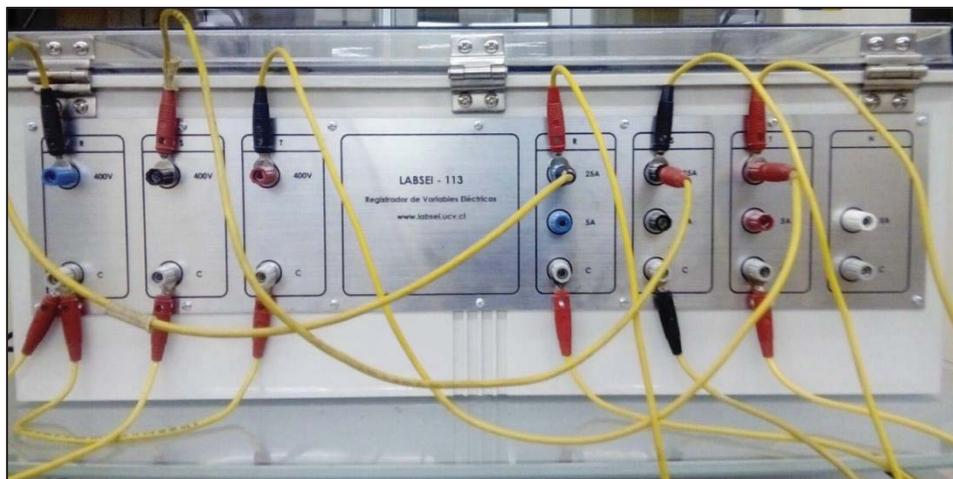


Figura A-10: Conexión real de SAMTE.

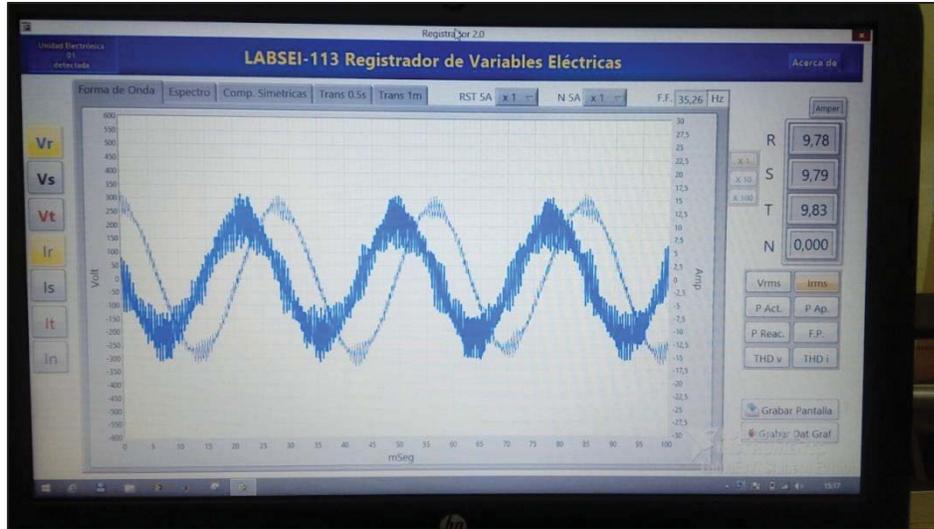


Figura A-11: Módulo de mediciones con SAMTE.

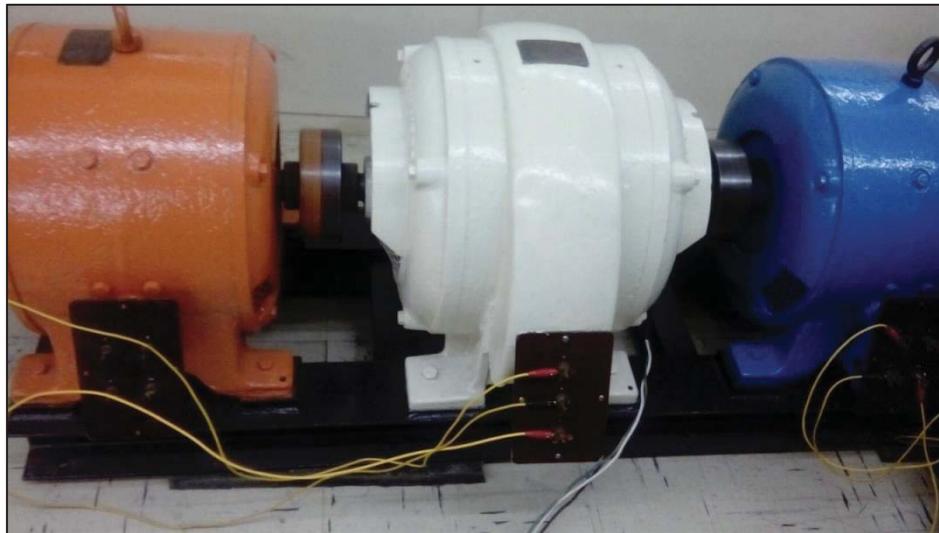


Figura A-12: Máquina de Inducción utilizada y conexión



Figura A-13: Medición con Tacómetros.

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.

A.3 Ensayo de Rotor libre

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 magnetizaste.

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 ésta 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.

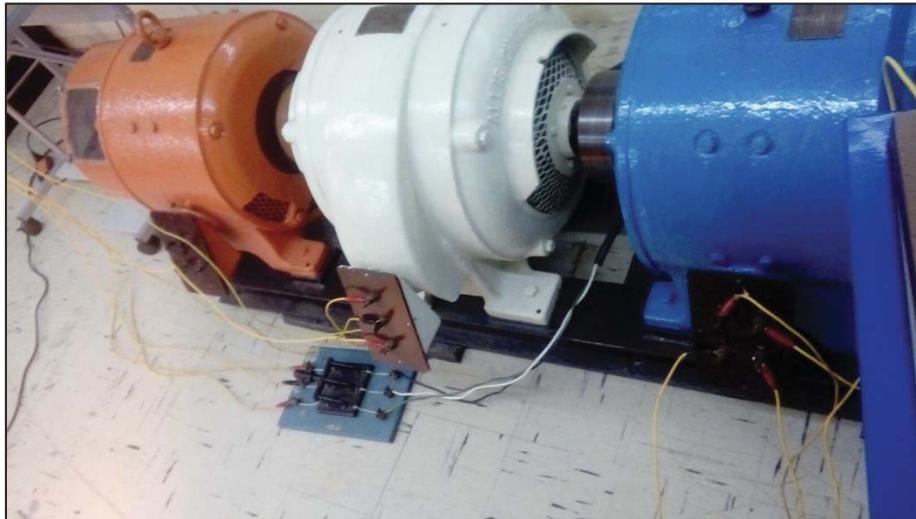


Figura A-14: Máquina de Inducción y de Corriente Continua acopladas

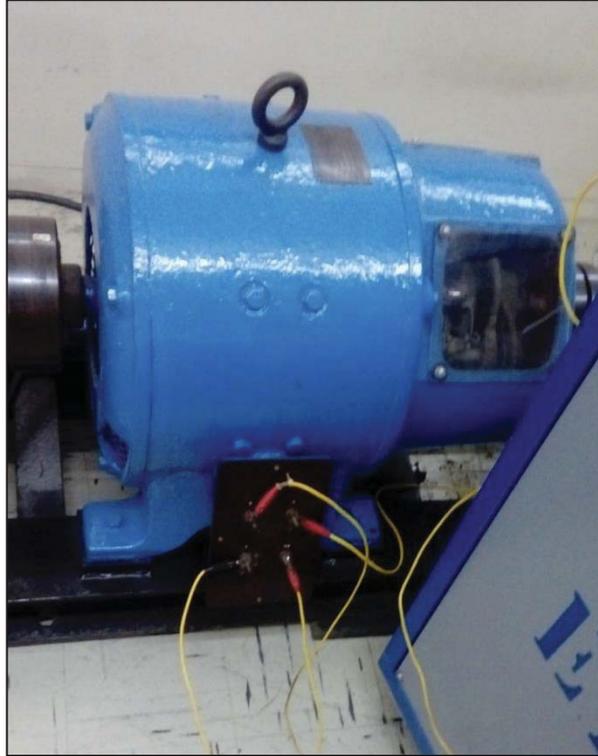


Figura A-15: Máquina de CC, con sus respectivas conexiones.



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



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

A.4 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:

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 A-18: Bloqueo del rotor con palo de madera.



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

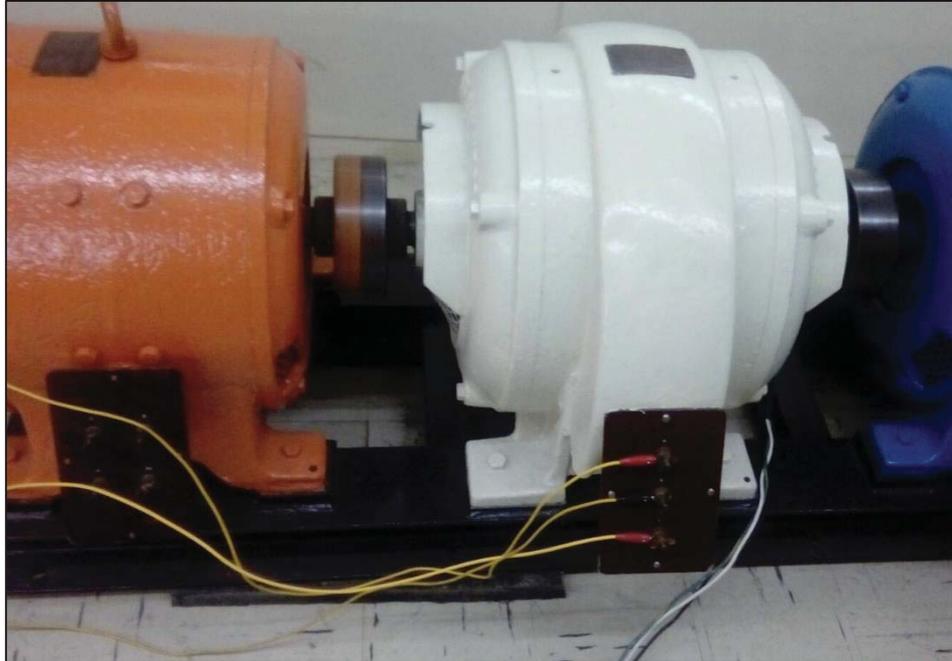


Figura A-20: Motor de Inducción conectado a fuente AC Variable.

A.5 Medición con diferentes cargas resistivas.

El 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.

Por lo tanto se conecta de igual forma que en los experimentos anteriores el VDF SD 700 con el equipo de medida SAMTE, luego 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 experimento las máquinas y equipos quedan conectados de la siguiente manera:

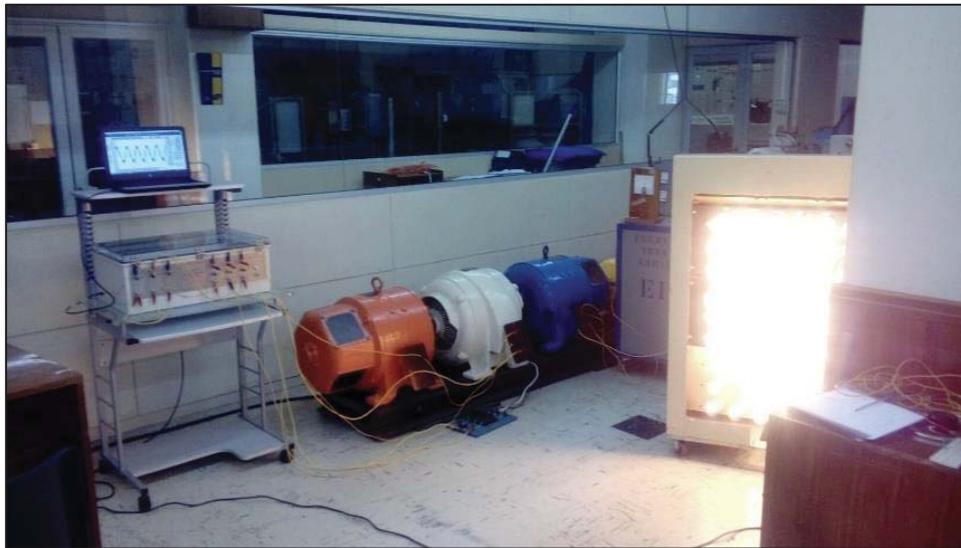


Figura A-21: Equipos y carga conectada al Generador CC.

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 A-22: Fuente CC variable con amperímetro para registrar Corriente en Campo

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



Figura A-23: Manipulación de VDF.

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



Figura A-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 A-25: Equipos SAMTE para mediciones de variables.

A.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 Figura A-26 se aprecia la conexión para las mediciones de curva en el Bus CC, velocidad y corriente.



Figura A-26: Conexión de computador por cable USB con VDF SD700

-Para realizar las mediciones, se ejecuta 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".

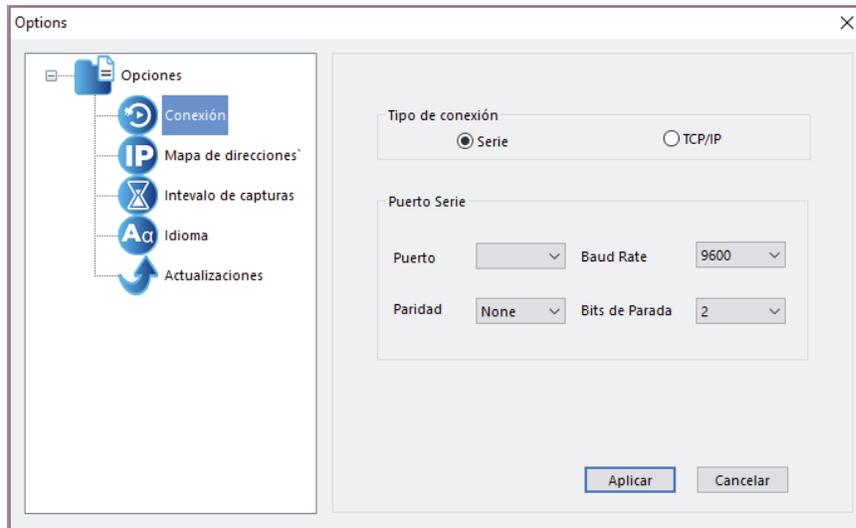


Figura A-27: Configuración de conexión de VDF a PC.

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



Figura A-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:

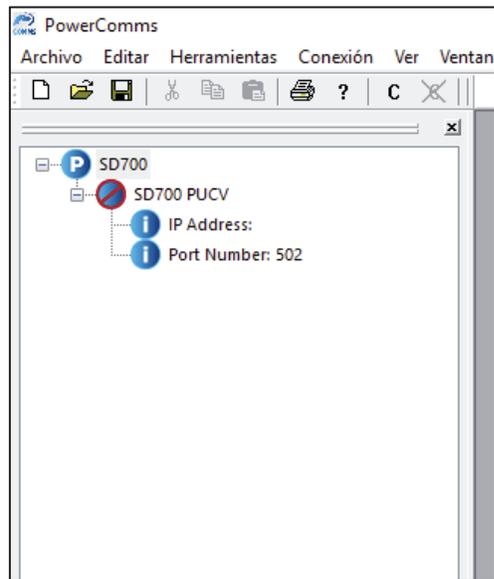


Figura A-29: Visualización de pestañas

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 ésta opción se podrán elegir las variables que se desean medir, con respecto al motor, equipo, externo, etc.

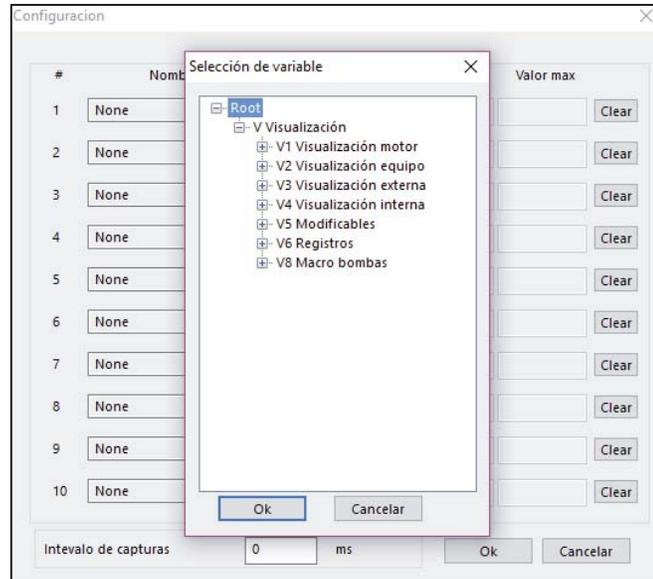


Figura A-30: Visualización de pestañas

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

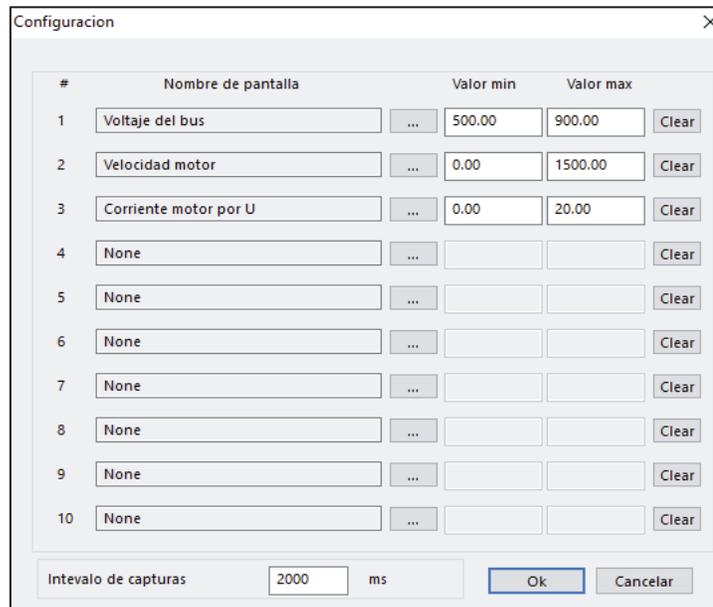


Figura A-31: Configuración de variables a medir.

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.

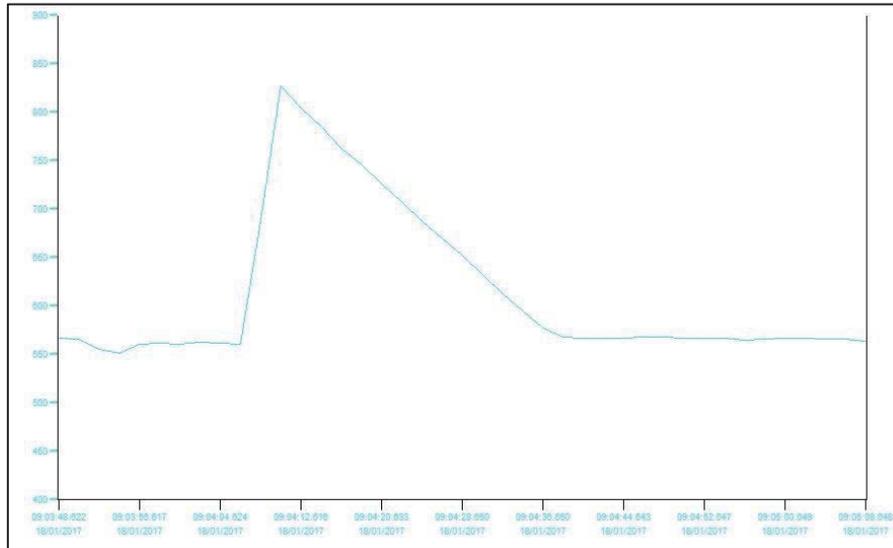


Figura A-32: Medición de aumento de voltaje en Bus CC.

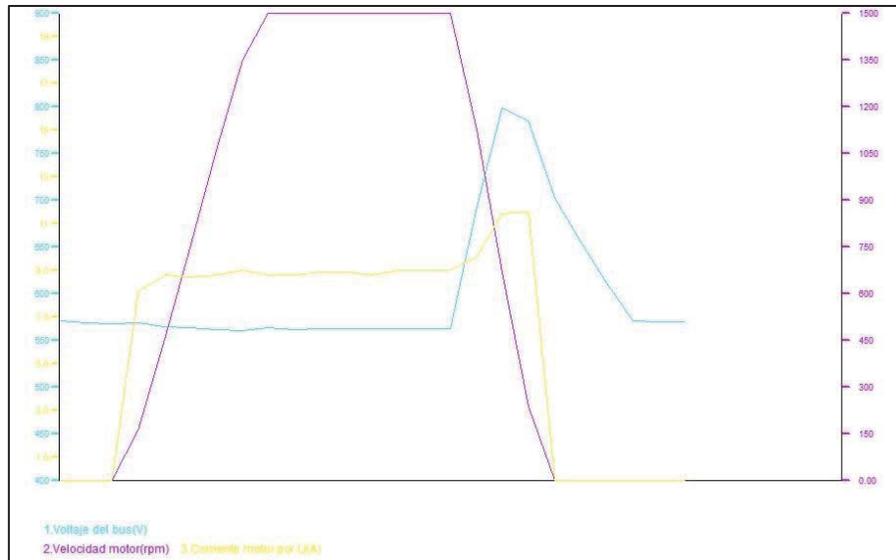


Figura A-33: Medición de voltaje en Bus CC, corriente y velocidad de Motor.

A.7 Ejemplo de Demostración

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

6 Cargas Resistivas a 40 Hz

Para comenzar 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 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:

	Torque (Nm)	Irms (A)	Pactiva (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

Tabla A-1: Resultados con diferentes Torques.

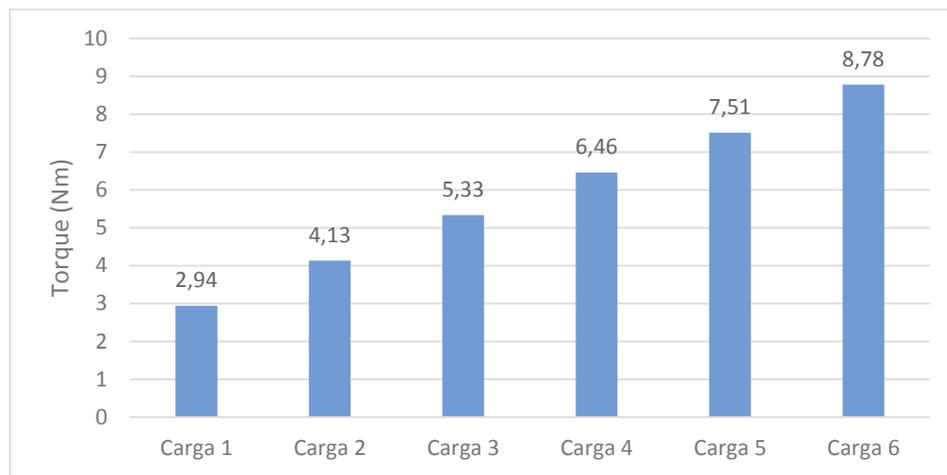


Figura A-34: Torques aplicados al motor con 40 Hz.

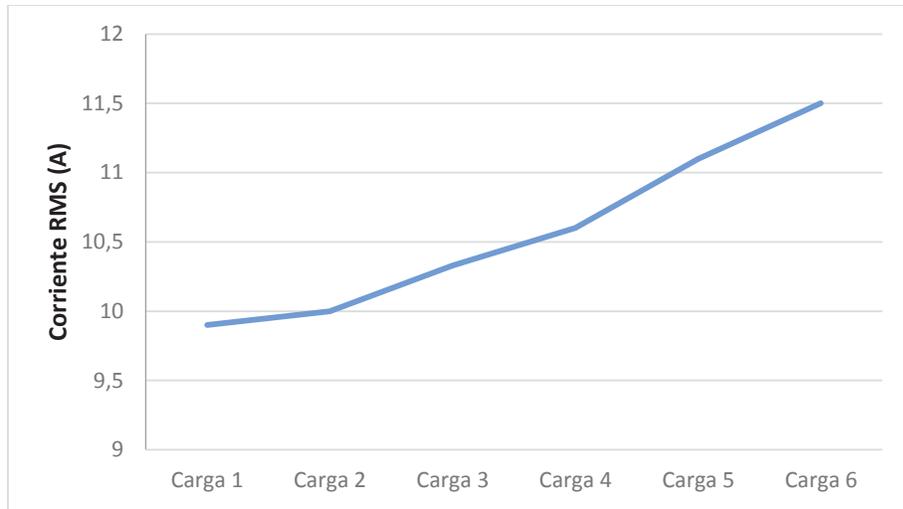


Figura A-35: Corriente RMS en el Estator.

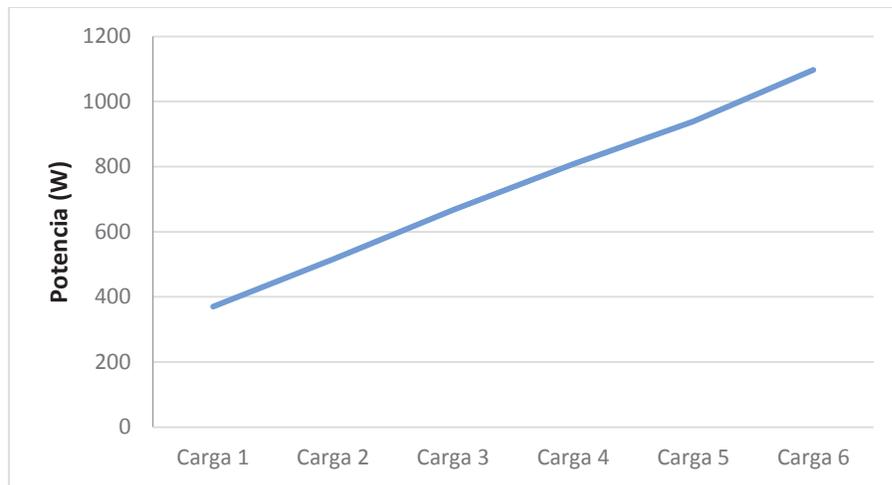


Figura A-36: Potencia activa suministrada al Motor.

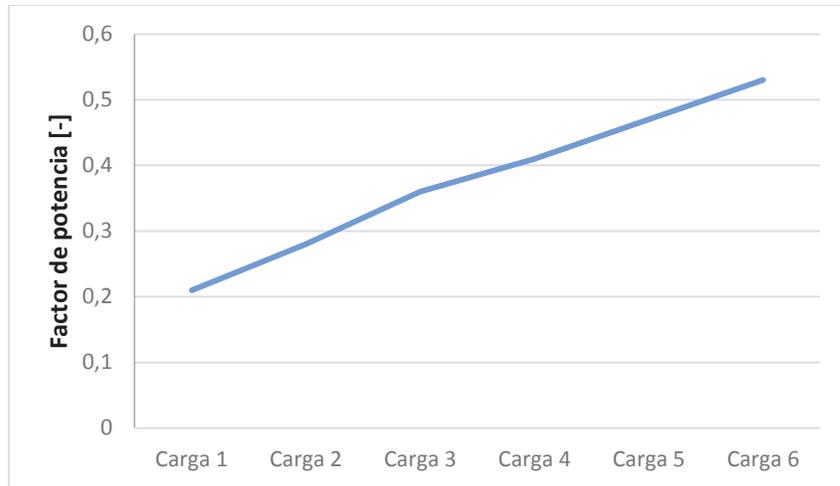


Figura A-37: Factor de Potencia [-]

Carga Resistiva Fija y variando la frecuencia entre 10 Hz y 50 Hz

Para este experimento se utilizará un banco de ampollitas sin variar la carga (se dejaran todas las ampollitas 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 Tabla A-2.

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

Tabla A-2: Mediciones obtenidas.

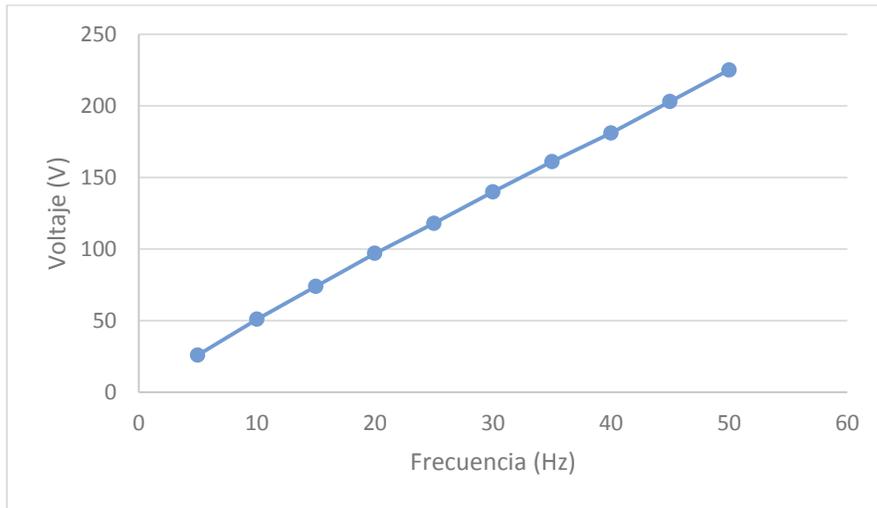


Figura A-38: Curva característica de Voltaje v/s Frecuencia.

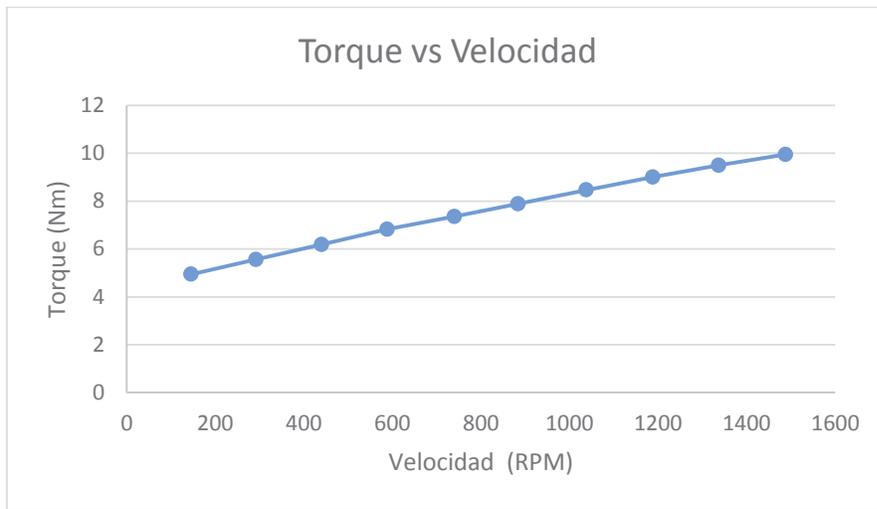


Figura A-39: Curva característica Torque v/s Velocidad.

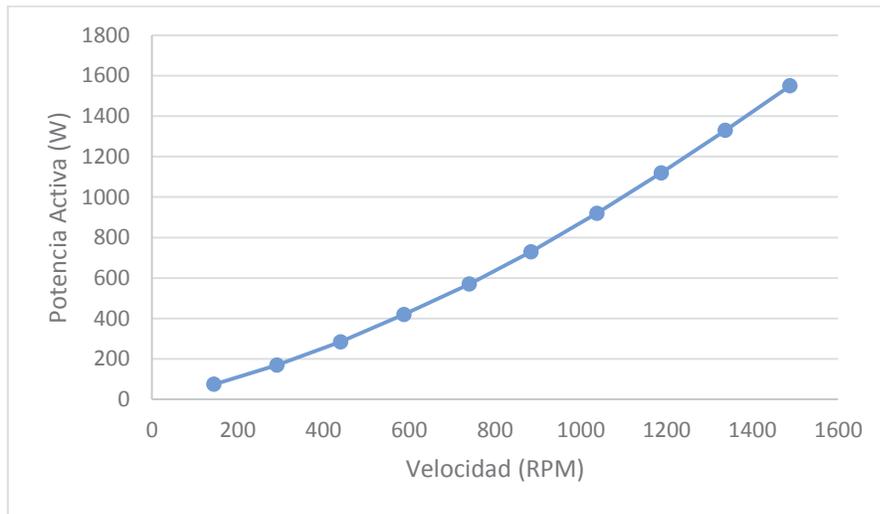


Figura A-40: Potencia Activa v/s Velocidad.

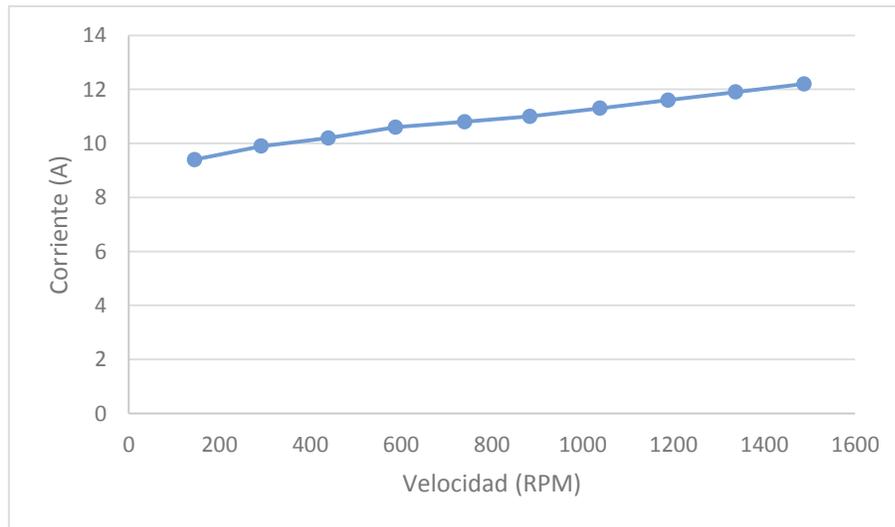


Figura A-41: Corriente v/s Velocidad.