REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE LAS MÁQUINAS SINCRÓNICA DE IMANES PERMANENTES Y DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA DEL EMULADOR DE GENERACIÓN EÓLICA DEL DEPARTAMENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA

DIANA ALEXANDRA MOTOCHE VIRACOCHA

DIRECTOR: JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.

Quito, mayo 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diana Alexandra Motoche Viracocha, bajo mi supervisión.

JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Diana Alexandra Motoche Viracocha, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

DIANA ALEXANDRA MOTOCHE VIRACOCHA

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza necesaria para lograr uno de mis anhelos más soñados.

A mis padres, que por su lucha constante para sacar a sus hijos adelante a lo largo de estos años, he llegado hasta aquí y me he convertido en la persona que soy.

A mi abuelita, que con su amor, consejos y compañía hicieron que toda esta etapa sea más llevadera.

"Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber" Albert Einstein

AGRADECIMIENTO

A Dios por nunca abandonarme, guiarme y bendecirme en cada paso de mi vida.

A mis padres, Galo y María, por su entrega, amor y consejos brindados a lo largo de mi vida. Y sobre todo, por el voto de confianza al enviarme a estudiar aquí.

A mis hermanos, Galo, Alexander y Gabriel, que han sido siempre la motivación para no darme por vencida. Espero que este logro sea un incentivo para que ustedes también luchen por sus sueños.

A mis tías y prim@s, por sus palabras y gestos de apoyo durante todo este proceso.

A mi abuelita, María Antonia, porque gracias a usted no me sentí muy sola, por darme los ánimos cuando parecía que todo se derrumbaba a mi alrededor y por los cuidados cuando me enfermaba.

A mi director de tesis, Ph.D Jesús Játiva, por la confianza, la paciencia y los conocimientos transmitidos hasta la culminación de este proyecto.

A los Ingenieros Mauricio Soria, Juan Ramírez y Richard Chicango, por su buena predisposición y guía en las dificultades que se presentaron a lo largo de este trabajo.

A Hámilton, por el apoyo y comprensión brindada a lo largo de la realización de este trabajo.

A Génesis, por su amistad, consejos y aventuras vividas en el transcurso de esta carrera.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos, por las tareas que realizamos juntos, las veces que me explicaron algo y por los momentos compartidos.

Gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL iii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA iv
DEDICATORIA v
AGRADECIMIENTO vi
RESUMEN xi
ABSTRACT xii
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivos 2
1.2 Alcance 2
1.3 Marco Teórico 3
1.3.1 Descripción del Emulador de Generación Eólica 3
1.3.1.1 Interfaz de Adquisición y Control de Datos 4
1.3.1.2 Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación 5
1.3.1.3 Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes (PMSM) 7
1.3.1.4 Máquina de Inducción de Rotor Bobinado 7
1.3.1.5 Módulo IGBT Chopper/Inverter 8
1.3.1.6 Paquete de Batería de Plomo-Ácido 8
1.3.1.7 Fuente de Alimentación 9
1.3.1.8 Carga Resistiva 9
1.3.1.9 Módulo Rectificador y Capacitor de Filtro 10
1.3.2 Tipos de Turbinas Usadas en Generación Eólica 10
1.3.2.1 Generadores Asincrónicos 11
1.3.2.1.1 Generador de Inducción Jaula de Ardilla 11
1.3.2.1.2 Generador de Inducción de Rotor Bobinado 11
1.3.2.2 Generadores Sincrónicos 12
1.3.2.2.1 Generador de Rotor Bobinado Doblemente Alimentado 12
1.3.2.2.2 Generador Sincrónico de Imanes Permanentes 12
1.3.3 Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes (PMSM) 12
1.3.3.1 Curva de Histéresis 13
1.3.3.2 Descripción Física 14

1.3.3.3 Clasificación de las Máquinas Sincrónicas de Imanes Permanentes 15
1.3.3.4 Principio de Funcionamiento de la Máquina de Imanes Permanentes [23] 18
1.3.4 Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG) 19
1.3.4.1 Partes Constitutivas de la Máquina de Inducción 20
1.3.4.2 Principio de Funcionamiento de la Máquina DFIG 21
1.3.4.3 Funcionamiento de la DFIG Hipersincrónica y Subsincrónica 22
1.3.5 Detección de Valores Atípicos 23
1.3.5.1 Técnica de la Envolvente Elíptica basado en Mahalanobis 24
1.3.5.2 Técnica del Factor Local de Valores Atípicos 24
2. METODOLOGÍA 26
2.1 Datos de Placa de las Máquinas 26
2.1.1 Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes 26
2.1.2 Máquina de Inducción de Rotor Bobinado 26
2.2 Pruebas para la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes 27
2.2.1 Resistencia de Armadura 27
2.2.2 Flujo Magnético 28
2.2.3 Número de Polos 30
2.2.4 Reactancias de Eje Directo y de Cuadratura 31
2.2.4.1 Prueba con Carga 31
2.2.4.2 Medidor RLC 32
2.2.4.3 Voltaje de Paso Aplicado en los Bornes del Estator [34] 33
2.2.4.4 Cortocircuito Trifásico Súbito 37
2.2.5 Parámetros Mecánicos 40
2.2.5.1 Constantes de Rozamiento Viscoso y de Fricción Seca 40
2.2.5.2 Constante de Torque 42
2.2.5.3 Momento de Inercia 42
2.2.5.3.1 Adquisición de Datos A través del Software LabView 43
2.2.5.3.2 Circuito para Detectar la Posición del Rotor 43
2.2.5.3.3 Aplicación en LabView 44
2.3 Pruebas de la Máquina de Inducción de Rotor Bobinado Doblemente Alimentado 48
2.3.1 Pruebas con la DFIG Funcionando como Máquina Sincrónica 49
2.3.1.1 Valores Bases de la Máquina 49

2.3.1.2 Resistencia del Estator 49
2.3.1.3 Reactancia de Eje Directo Saturada y No Saturada 50
2.3.1.3.1 Prueba de Circuito Abierto [39] 50
2.3.1.3.2 Prueba de Cortocircuito [39] 51
2.3.1.4 Reactancia de Eje de Cuadratura 54
2.3.1.5 Reactancias Sincrónicas de Eje Directo Subtransitoria y Transitoria 57
2.3.1.6 Constantes de Tiempo de Cortocircuito de Eje Directo [39] 58
2.3.1.7 Constantes de Tiempo de Circuito Abierto de Eje Directo 59
2.3.1.8 Prueba de Cortocircuito Bifásico Súbito 59
2.3.1.9 Reactancia de Secuencia Negativa 60
2.3.1.10 Reactancia de Secuencia Cero 62
2.3.1.11 Coeficiente de Amortiguamiento 63
2.3.1.11.1 Prueba de Rechazo de Carga 63
2.3.1.11.2 Pérdida de Fuerza Electromotriz 64
2.3.2 Pruebas con la DFIG Funcionando como Motor de Inducción 66
2.3.2.1 Prueba en Vacío 66
2.3.2.2 Prueba de Rotor Bloqueado 67
2.3.2.3 Resistencia del Rotor 69
2.3.3 Obtención de Parámetros de la Máquina a partir de los Datos de Catálogo 70
3. RESULTADOS 71
3.1 Resultados de la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes 71
3.1.1 Valores Bases 71
3.1.2 Resistencia de Armadura 71
3.1.3 Flujo Magnético 71
3.1.4 Número de Polos 73
3.1.5 Reactancias en Ejes Directo y de Cuadratura 74
3.1.5.1 Prueba con Carga 74
3.1.5.2 Medidor RLC 75
3.1.5.3 Voltaje de Paso Aplicado a los Bornes 76
3.1.5.4 Cortocircuito Trifásico Súbito 78
3.1.6 Parámetros Mecánicos 79
3.1.6.1 Constantes de Rozamiento Viscoso y de Fricción Seca 79
3.1.6.2 Constante de Torque 81

3.1.6.3 Momento de Inercia 83
3.1.6.4 Coeficiente de Amortiguamiento 84
3.2 Resultados de la Máquina de Inducción de Rotor Bobinado 85
3.2.1 Resistencia de Armadura 85
3.2.2 DFIG Funcionando como Máquina Sincrónica 86
3.2.2.1 Reactancia de Eje Directo Saturada y No Saturada 86
3.2.2.2 Reactancia de Eje de Cuadratura 88
3.2.2.3 Reactancias de Eje Directo Subtransitoria y Transitoria 90
3.2.2.4 Constantes de Tiempo de Cortocircuito de Eje Directo 91
3.2.2.5 Constantes de Tiempo de Circuito Abierto de Eje Directo 92
3.2.2.6 Prueba de Cortocircuito Bifásico Súbito 93
3.2.2.7 Reactancia de Secuencia Negativa 94
3.2.2.8 Reactancia de Secuencia Cero 96
3.2.2.9 Coeficiente de Amortiguamiento 96
3.2.3 DFIG Funcionando como Máquina de Inducción 98
3.2.3.1 Prueba de Rotor Bloqueado 98
3.2.3.2 Prueba en Vacío 99
3.2.3.3 Resistencia del Rotor 100
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 102
4.1 Análisis de la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes 102
4.2 Análisis de la Máquina de Rotor Devanado Doblemente Alimentada 105
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 110
5.1 CONCLUSIONES 110
5.2 RECOMENDACIONES 112
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113
ORDEN DE EMPASTADO 116

RESUMEN

En este trabajo se presenta un conjunto de pruebas de laboratorio ejecutadas para obtener los parámetros eléctricos y mecánicos de las dos máquinas existentes en el emulador de generación de energía eólica del Departamento de Energía Eléctrica (DEE), una máquina sincrónica de imanes permanentes y una máquina de inducción doblemente alimentada.

La máquina de inducción de rotor bobinado puede funcionar como máquina de inducción y como máquina sincrónica, considerando esto, las pruebas realizadas se basan en las normas de la IEEE Std.112 y Std. 115, respectivamente.

Con lo que respecta a la máquina de imanes permanentes, existe la norma IEEE Std. 1812 que presenta el procedimiento para realizar pruebas de circuito abierto, cortocircuito y con carga, más no detalla que parámetros determinar con cada prueba. Por ello se realiza experimentos basados en investigaciones publicadas, trabajos de titulación y documentos, ejecutando las pruebas con la máquina funcionando como motor y generador.

Los parámetros mecánicos son obtenidos por medio del dispositivo de adquisición de datos NI myDAQ y una aplicación en el software LabView, que permite procesar las señales obtenidas desde un circuito detector de posición del rotor por medio de un codificador óptico.

Con los parámetros eléctricos y mecánicos, se realiza una comparación de valores atípicos con la finalidad de determinar si se encuentran dentro del conjunto de valores típicos respecto a este tipo de máquinas.

PALABRAS CLAVE: Máquina sincrónica de imanes permanentes, máquina de inducción doblemente alimentada, LabView, parámetros eléctricos y mecánicos, codificador óptico, valores atípicos.

ABSTRACT

This document presents a set of laboratory tests performed to obtain the electrical and mechanical parameters of the two existing machines in the wind energy generation emulator of the Department of Electric Energy (DEE), a permanent magnet synchronous machine and a double-fed induction generator.

The winding rotor induction machine can function as an induction machine and as a synchronous machine, considering that the tests performed are based on the IEEE Std.112 and Std. 115 standards respectively.

Regarding the permanent magnet machine, there is the IEEE Std. 1812 standard that presents the procedure to perform open circuit, short circuit and load tests but does not detail what parameters to determine with each test. Therefore, experiments are carried out based on published research, titling and documents, executing the tests with the machine functioning as a motor and generator.

The mechanical parameters are obtained by means of the NI myDAQ data acquisition device and an application in the LabView software, which allows to process the signals obtained from a rotor position detector circuit by means of an optical encoder

With the electrical and mechanical parameters, a comparison of outliers is made in order to determine if they are within the set of typical values with respect to this type of machines.

KEYWORDS: Permanent magnet synchronous machine, double-fed induction generator, LabView, electrical and mechanical parameters, optical encoder, outliers.

1. INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de mitigar la creciente contaminación ambiental, se ha dado impulso a la generación de energía limpia, por lo que se ha empezado a explorar nuevas formas de obtenerla a partir de recursos naturales renovables. Como respuesta a esta necesidad se está invirtiendo en centrales de energía con fuentes no agotables.

Considerando esto, en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional se encuentra en pleno desarrollo un Laboratorio físico de Sistemas Eléctricos de Potencia a pequeña escala con generación de energía tradicional, eólica e incluso fotovoltaica, dos líneas de transmisión, transformadores de dos y tres devanados, un conjunto de cargas residenciales, comerciales e industriales y demás elementos que conforman un SEP, cuyo comportamiento es monitoreado por un sistema SCADA.

Con lo que respecta a la generación eólica, se adquirió un equipo que conjuntamente con dispositivos de hardware y software [1] permite la implementación de sistemas de conversión de energía eólica, simulando el comportamiento dinámico y estático de una turbina eólica. Este equipo cuenta con dos máquinas, una sincrónica de imanes permanentes (por sus siglas en inglés PMSM) y una máquina de inducción de rotor bobinado doblemente alimentada (por sus siglas en inglés DFIG), para realizar proyectos futuros de investigación relacionados con la simulación del comportamiento de aerogeneradores con DFIG y PMSM en estado estable y transitorio, es necesario conocer sus parámetros eléctricos y mecánicos.

La utilización de PMSM en la generación eléctrica se ha expandido enormemente, debido a su alta eficiencia, menores costos por mantenimiento, menor precio y menor espacio requerido, en comparación con generadores de inducción doblemente alimentados y otros empleados en generación con fuentes renovables. Por otro lado, las máquinas de inducción son mayormente empleadas en el ámbito industrial, debido a su simplicidad, robustez, confiabilidad y variadas opciones de control, en particular como DFIG en aerogeneración. Esta enorme utilización requiere el conocimiento de sus parámetros a fin de implementar nuevos métodos de control de velocidad, control de torque, control en los ciclos de trabajo, entre otros.

1.1 Objetivos

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Determinar mediante pruebas de laboratorio los parámetros eléctricos y mecánicos del generador sincrónico de imanes permanentes PMSM y del generador de inducción doblemente alimentado DFIG, existentes en el emulador de generación eólica del Departamento de Energía Eléctrica.

Los objetivos específicos de este Proyecto Técnico son:

- Estudiar los métodos para determinar los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina PMSM: 1) accionamiento de la máquina como generador, 2) como motor sin carga y 3) como motor con carga.
- Estudiar los métodos para determinar los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina DFIG: 1) respuesta transitoria, 2) ensayos de carga, rotor bloqueado, operación en vacío y 3) a partir de los datos de catálogo.
- Realizar las pruebas de laboratorio para obtener los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina PMSM mediante los tres métodos señalados.
- Realizar las pruebas de laboratorio para obtener los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina DFIG mediante los tres métodos señalados.
- Efectuar una comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio mediante los métodos indicados para las dos máquinas PMSM y DFIG con aquellos provenientes de catálogos y trabajos de investigación.

1.2 Alcance

- Se investigan tres métodos para la obtención de parámetros de la máquina sincrónica de imanes permanentes: uno cuando la máquina actúa como generador accionado por un motor primario, otro cuando funciona como motor sin carga y el último cuando es impulsada por un inversor como un motor con carga al eje. Para la máquina de inducción de rotor bobinado se utilizan tres métodos: uno mediante ensayos de carga, de vacío y de rotor bloqueado, otro mediante respuesta transitoria y el último a partir de datos de catálogo.
- Se realizan las pruebas de laboratorio con los métodos mencionados anteriormente para la PMSM y la DFIG.
- Las máquinas del emulador de energía eólica tienen los siguientes datos de placa:

Máquina sincrónica de imanes permanentes: Motor: 260 W; 6000 r.p.m.; 3 A; Ke: 10,4 Vrms/1000 r.p.m.; Voltaje de la barra DC del inversor: 160 V; Codificador: 0/5 V; 2048 PPR.

La máquina de inducción de rotor bobinado: Voltaje: 208 V, trifásica, 60 Hz; Motor: 200 W; 0,64 pf; 1720 r.p.m., 1,15 A; Generador: 480 VA, 200 W, 0,41 pf, 1875 r.p.m., 1,33 A.

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Descripción del Emulador de Generación Eólica

Festo Didactic lleva más de 40 años desarrollando sistemas de capacitación dinámicos de alta calidad para mejorar el aprendizaje en áreas técnicas, y continúa fortaleciendo su posición a nivel mundial a través de la obtención de Lab-Volt System, a los que denomina "serie LabVolt". Esta fusión permite tener un mayor acceso a productos para poder ampliar su gama de programas de entrenamiento y brindar una experiencia real. Sus programas de entrenamiento se centran en cubrir temas relacionados a ingeniería eléctrica, electrónica, mecánica, mantenimiento industrial, mecatrónica, control de procesos, entre otros [2].

El emulador de generación eólica permite simular el comportamiento del viento que mueve las aspas en un aerogenerador y juntamente con equipos y software recrear los aspectos de un parque eólico, de este modo aumenta la capacitación y práctica en este campo.

Este módulo posibilita entender temas relacionados con la energía eléctrica, ya que involucra conocimientos en electrónica de potencia, máquinas rotativas, transmisión y producción de energía a partir de fuentes renovables como la eólica y la hidroeléctrica. De igual manera se puede entrenar con el equipo acciones a llevarse a cabo cuando se simule condiciones de falla o crear escenarios meteorológicos, mecánicos y eléctricos difíciles de maniobrar en un entorno real. Es posible realizar este tipo de requerimientos ya que los equipos son robustos y aseguran una vida útil amplia trabajando en un exigente ambiente de laboratorio [2].

El equipo principal del sistema de entrenamiento de generación de electricidad mediante energía eólica se observa en la Figura 1.1:

Figura 1.1 Sistema de entrenamiento de generación eólica LabVolt de Festo

Este emulador es una combinación de software y hardware, que se detallan a continuación.

1.3.1.1 Interfaz de Adquisición y Control de Datos

La interfaz de adquisición y control de datos (por sus siglas en inglés DACI) es un conjunto de instrumentos y funciones de control que permiten medir, visualizar y estudiar los parámetros eléctricos y mecánicos en sistemas de energía eléctrica y circuitos de electrónica de potencia por medio del software LVDAC-EMS. Este software es un potente multímetro, que proporciona mediciones de voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, velocidad, torque, frecuencia, entre otros, incluye también un osciloscopio que permite observar hasta ocho señales a la vez, un analizador de fasores, un analizador de armónicos, una tabla donde se registran las mediciones de los instrumentos escogidos previamente y a partir de estos valores graficar los resultados. Este software guarda archivos compatibles con Excel.

En el emulador existen 2 módulos DACI que constan de cuatro voltímetros de hasta 800 V, cuatro amperímetros con escalas de 4 y 40 A, ocho entradas analógicas, una entrada de codificador digital, dos salidas analógicas, dos salidas digitales y una multi-pines para conectarse con el módulo de IGBT. Se conecta a una computadora por medio de un cable USB y necesita estar alimentado por una fuente de poder de 24 V [3]. En la Figura 1.2 se puede ver un módulo DACI del emulador y en la Figura 1.3 un despliegue de funciones del software LVDAC-EMS.

Figura 1.2 Módulo DACI del emulador eólico [3]

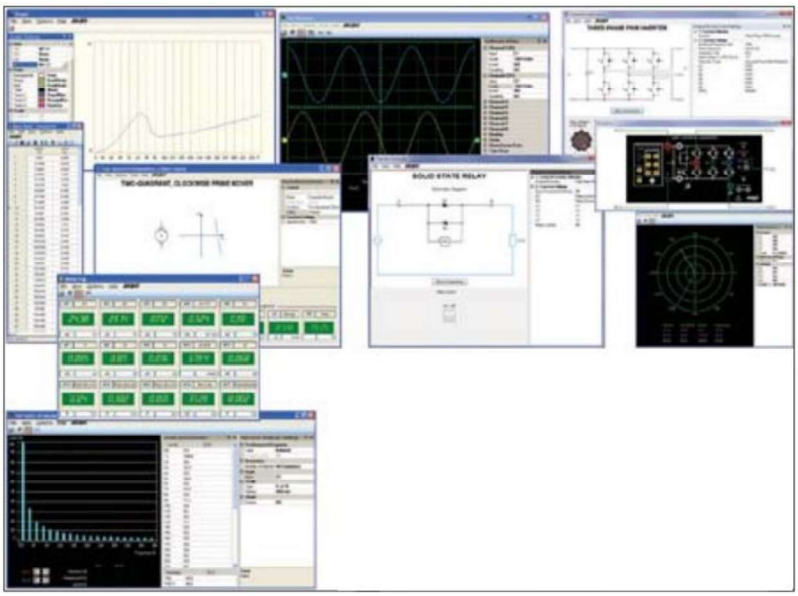


Figura 1.3 Despliegue de funciones del software LVDAC-EMS

1.3.1.2 Dinamómetro de Cuatro Cuadrantes/Fuente de Alimentación

El dinamómetro de cuatro cuadrantes/fuente de alimentación consta de un motor/generador de corriente continua de imán permanente que gira a 2500 r.p.m., alcanza un par magnético de hasta 3 N-m y su potencia puede llegar a 350 W, una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes de 5 A, 150 V y hasta 500 W y un microcontrolador

integrado. En la parte frontal presenta dos salidas analógicas una para velocidad y otra para torque, dos entradas de termistor para censar temperatura, dos salidas de codificador de eje y una entrada de comando analógico externo. También presenta un interruptor para seleccionar el modo de operación del módulo, un botón para escoger las distintas funciones, un botón de marcha/paro y una perilla que permite ajustar el parámetro deseado. Tiene dos modos de operación y dentro de ellos dispone de distintas funciones, las que se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Funciones para cada modo de operación del dinamómetro

Modo Dinamómetro	
1	Freno de torque constante en dos cuadrantes
2	Motor de impulsión y freno en sentido horario
3	Motor de impulsión y freno en sentido antihorario
4	Motor de impulsión y freno en sentido horario a velocidad constante
5	Motor de impulsión y freno en sentido antihorario a velocidad constante
6	Motor de impulsión y freno a torque constante positivo
7	Motor de impulsión y freno a torque constante negativo
Modo Fuente de alimentación	
1	Fuente de voltaje positivo
2	Fuente de voltaje negativo
3	Fuente de corriente positiva
4	Fuente de corriente negativa
5	Fuente de poder a 50 Hz
6	Fuente de poder a 60 Hz
7	Barra de 200 V DC
8	Cargador flotante de batería de plomo ácido

El panel frontal se puede abrir para colocar una correa en la polea ubicada en el eje de la máquina y acoplarla a otra máquina rotativa. En la Figura 1.4 se muestra el dinamómetro/fuente de cuatro cuadrantes del emulador. De igual manera cuenta con una entrada USB para poder operarlo desde la computadora [4].

Figura 1.4 Dinamómetro/Fuente de cuatro cuadrantes del emulador eólico [4]

1.3.1.3 Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes (PMSM)

Un módulo contiene a esta máquina de 260 W, los devanados del estator están conectados en estrella, tiene dos salidas de termistor que permite detectar el sobrecalentamiento de la máquina, en su eje tiene montado un codificador para medir la velocidad y posición de la máquina con una gran precisión, las nueve salidas de codificador proporcionan señales en el eje para emplearlas con fines de control. Se requiere alimentar el módulo con una fuente de alimentación de 24 V, en la Figura 1.5 se muestra la PMSM del emulador [5].

Figura 1.5 PMSM del emulador eólico [5]

1.3.1.4 Máquina de Inducción de Rotor Bobinado

En la Figura 1.6 se puede ver la máquina de inducción de rotor bobinado existente en el emulador dentro de un módulo. El panel frontal puede ser abierto para instalar una correa dentada en su eje y acoplarla a otras máquinas rotativas. Tiene dos salidas de termistor que protege la integridad de la máquina ante un sobrecalentamiento, de igual forma tiene una protección de sobrevoltaje que hace que la máquina se detenga cuando detecte cualquiera de estas dos condiciones peligrosas [6].

Figura 1.6 Máquina de rotor bobinado trifásica del emulador eólico [6]

1.3.1.5 Módulo IGBT Chopper/Inverter

El módulo IGBT Chopper/Inverter está constituido de siete transistores IGBT, seis de ellos se emplean para implementar los inversores y el séptimo junto con una resistencia de descarga posibilita la disipación del exceso de energía en la barra de DC. El circuito de descarga se habilita con un interruptor ubicado en el panel frontal del módulo. Los IGBTs están protegidos contra cualquier anormalidad que pudiese presentarse, como sobrecalentamiento, sobrevoltajes, sobrecorrientes y cortocircuitos. Tiene seis salidas de control que permiten medir las señales de conmutación de los IGBTs. Estas señales son llevadas por medio del conector multi-pines hasta el DACI, también tiene una salida de sincronización para activar el osciloscopio cuando se observen las señales de conmutación. Las señales se presentan en pulsos de 0 a 5 V. Para habilitar el módulo se necesita alimentarlo con una fuente de 24 V ac. En el emulador se encuentran dos módulos IGBT Chopper/Inverter, como puede verse uno de ellos en la Figura 1.7 [7].

Figura 1.7 Módulo IGBT Chopper/Inverter del emulador eólico [7]

1.3.1.6 Paquete de Batería de Plomo-Ácido

El módulo alberga cuatro baterías de plomo-ácido de 12 V, conectadas en serie el paquete de baterías suministra un voltaje fijo de 48 V. Consta de tres puntos de prueba para medir

el voltaje suministrado por cada batería, una entrada de carga paralelo para cargar las baterías. En el emulador se tienen tres paquetes de baterías, en la Figura 1.8 se muestra uno de ellos [8].

Figura 1.8 Paquete de baterías de plomo-ácido del emulador eólico [8]

1.3.1.7 Fuente de Alimentación

Consta de una fuente de alimentación de corriente alterna trifásica de voltaje fijo y una fuente de alimentación de corriente continua de voltaje fijo, encapsuladas en un módulo, con interruptores independientes para habilitar cada fuente, un interruptor de reinicio que protege de sobrecorriente a las entradas y salidas, posee luces que indican la presencia de voltaje en cada fase. En la Figura 1.9 se muestra la fuente de alimentación disponible en el emulador [9].

Figura 1.9 Fuente de alimentación del emulador eólico [9]

1.3.1.8 Carga Resistiva

El módulo de carga alberga nueve resistencias de potencia, distribuidas en tres bancos idénticos. Cada banco consta de tres resistencias en paralelo cuyos valores son 300/600/1200 Ω en cada grupo, que se pueden aumentar o disminuir por pasos mediante

interruptores independientes. En la Figura 1.10 se puede observar un módulo de carga resistiva [10].

Figura 1.10 Módulo de carga resistiva del emulador eólico [10]

1.3.1.9 Módulo Rectificador y Capacitor de Filtro

Este módulo consta de un rectificador de puente trifásico y dos capacitores separados, el primero permite convertir una entrada de voltaje trifásica en un voltaje DC no filtrado y por medio de los capacitores se filtra este voltaje, cada uno protegido por un diodo. En la Figura 1.11 se puede observar este módulo [11].

Figura 1.11 Módulo rectificador y capacitor de filtro del emulador eólico [11]

1.3.2 Tipos de Turbinas Usadas en Generación Eólica

Una turbina eólica convierte la energía cinética del viento en energía mecánica mediante las aspas y en energía eléctrica a través de generador. La turbina que más se usa en estos días es la de eje horizontal. Las turbinas se clasifican según su control de velocidad en: de velocidad fija y de velocidad variable [12].

Los generadores empleados en turbinas eólicas son generadores asincrónicos y sincrónicos.

1.3.2.1 Generadores Asincrónicos

1.3.2.1.1 Generador de Inducción Jaula de Ardilla

El generador de inducción jaula de ardilla se acopla a una turbina de velocidad fija. Se debe conectar directamente a un transformador, su desventaja es un consumo de energía reactiva incontrolable, el control mecánico de potencia es limitado, genera grandes fluctuaciones en la red, para reducir el consumo de energía reactiva es necesario colocar un sistema de arranque suave y un banco de capacitores como se muestra en la Figura 1.12 [13].

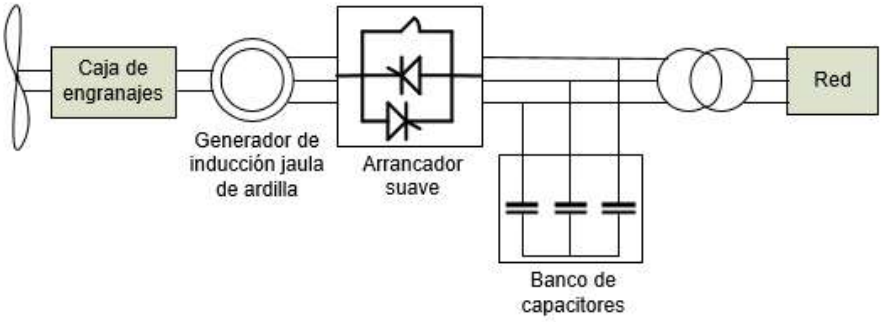


Figura 1.12 Configuración del aerogenerador de inducción jaula de ardilla

1.3.2.1.2 Generador de Inducción de Rotor Bobinado

El generador de inducción de rotor bobinado se acopla a una turbina de velocidad variable. De manera similar a la configuración anterior se debe conectar a un transformador antes de conectar a la red, para controlar el deslizamiento y la potencia de salida se usa una resistencia variable. La demanda de potencia reactiva es controlada por un banco de capacitores y requiere de un arrancador suave como se muestra en la Figura 1.13. Es limitado el rango de velocidad [13].

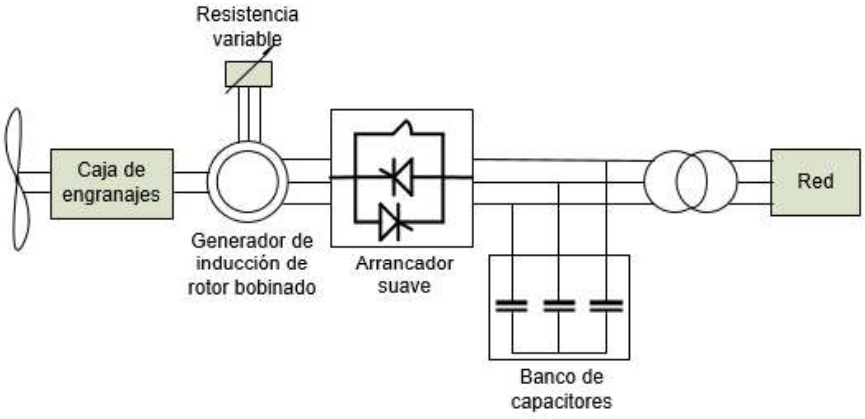


Figura 1.13 Configuración del aerogenerador de inducción de rotor bobinado

1.3.2.2 Generadores Sincrónicos

1.3.2.2.1 Generador de Rotor Bobinado Doblemente Alimentado

El generador de inducción de rotor bobinado doblemente alimentado se acopla a una turbina de velocidad variable, es conocido como Generador de Inducción Doblemente Alimentado porque se alimenta por el estator y por el rotor, a diferencia del generador mencionado en el punto anterior en los bornes del rotor se instala un convertidor AC/DC/AC en lugar de la resistencia variable, es por ello que opera igual que una máquina sincrónica y hace que tenga una buena eficiencia [14], en la Figura 1.14 se observa su configuración.

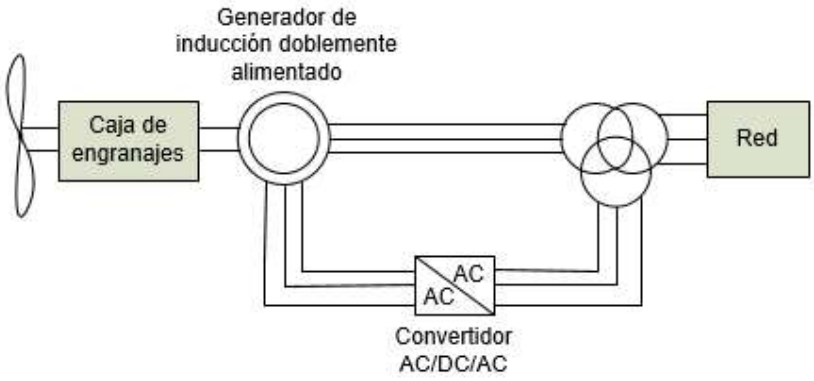


Figura 1.14 Configuración del aerogenerador DFIG

1.3.2.2.2 Generador Sincrónico de Imanes Permanentes

El generador sincrónico de imanes permanentes se conecta a una turbina de velocidad variable. No requiere de caja de engranajes, también requiere de un convertidor AC/DC/AC que permita fijar su frecuencia a la de la red, debido a que este generador produce corrientes con frecuencias elevadas [14], en la Figura 1.15 se muestra su esquema.

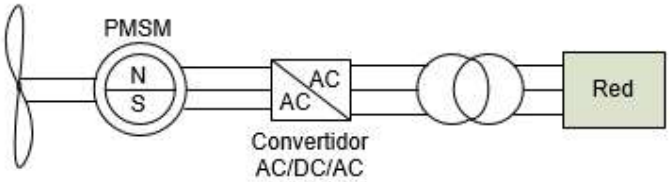


Figura 1.15 Configuración del aerogenerador de imanes permanentes

1.3.3 Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes (PMSM)

El desarrollo de la máquina sincrónica de imanes permanentes tiene sus inicios en la década de los 60s. El primer imán con el que se elaboraron estas máquinas provenía de

una aleación de Aluminio, Níquel y Cobalto (Alnico), no requería de inversor para su funcionamiento y solo se empleaba en máquinas pequeñas por lo que su uso era limitado.

Con el avance de la tecnología, el desarrollo de materiales magnéticos, los sistemas de control, los elementos electrónicos más sofisticados y el comienzo de la exploración de tierras raras, se descubrió el imán de Neodimio, Hierro y Boro. Este hecho impulso el desarrollo de este tipo de máquinas que resaltan de las tradicionales por su alta eficiencia, gran almacenamiento de energía, coercitividad alta y costo no muy elevado, llamando mucho la atención de su uso en diversos campos.

Los imanes permanentes se diferencian de un imán convencional porque no requieren de una fuerza externa que les permita inducir un campo magnético, sino que pueden generar un campo de forma permanente [15].

La PMSM no tiene un devanado de campo al que se le pueda aplicar una excitación variable para tener control sobre el voltaje de salida, su excitación es constante por lo que al conectar carga en sus bornes su voltaje caerá sin elección a que se le pueda controlar.

Posee muchas ventajas, entre ellas está el relativamente bajo costo pues al emplear imanes, la fabricación y construcción del rotor disminuye. Al no tener escobillas su mantenimiento es innecesario, tiene una alta consistencia mecánica y también se caracteriza por su simplicidad [15].

1.3.3.1 Curva de Histéresis

En la Figura 1.16 se presenta la curva de histéresis, que permite caracterizar el material magnético. La curva inicia en el origen, al aplicarse un campo magnético los dominios magnéticos presentes en cada material empiezan a alinearse hasta estar totalmente alineados y la presencia de un campo magnético ya no genere su movimiento, es ahí donde se produce la saturación del material. Conforme se va disminuyendo el campo aplicado la magnetización disminuye hasta el punto Br, en donde sin un campo aplicado existe un flujo magnético. Esto se produce por un flujo remanente existente en los imanes permanentes, al aplicarse un campo en dirección contrario, el flujo también disminuye hasta llegar al punto donde se hace cero, esto se conoce como coercitividad, posteriormente conforme se aumenta en esa misma dirección el campo, también aumentará el flujo en dirección opuesta a la que estaba hasta llegar a la saturación y después se disminuye el campo hasta que se cierra el ciclo [16].

Al estar los imanes permanentemente excitados, le permite a la máquina responder adecuadamente a las variaciones de carga.

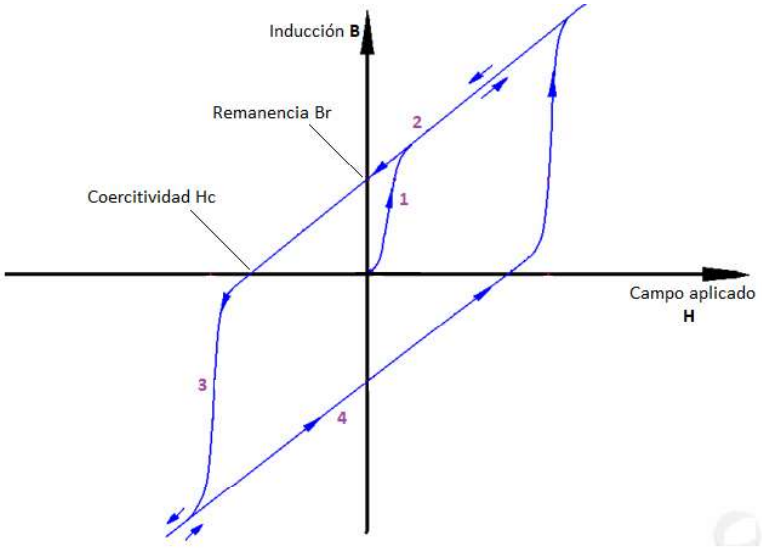


Figura 1.16 Curva de magnetización

1.3.3.2 Descripción Física

Un generador sincrónico de imanes permanentes está constituido por dos partes principales: estator y rotor.

El estator no difiere de el de las máquinas convencionales. Es conocido así por ser la parte estática de la máquina, posee un devanado trifásico de corriente alterna también conocido como devanado inducido, un apilamiento de chapas magnéticas forma un circuito magnético, cuyo flujo gira a la velocidad sincrónica.

El rotor se ubica dentro del estator y aloja los imanes. La estructura del rotor determina las características de la máquina de imanes permanentes. Con el uso de materiales magnéticos modernos en la construcción del rotor se puede prescindir del hierro y usar aluminio en la fabricación del bastidor del rotor. Los imanes se pegan sobre esté de manera que la distribución de la densidad de flujo sinusoidal se consiga en el entrehierro de la máquina. Un problema de esto es que se desperdicia el material del imán, para evitar aquella situación se suele colocar una capa de acero delgada o un tubo de acero delgado, con el segundo hay un peligro de que sobrecaliente al rotor debido al efecto de los armónicos del estator. En la Figura 1.17 se muestra la configuración del rotor de un generador de imanes permanentes [17].

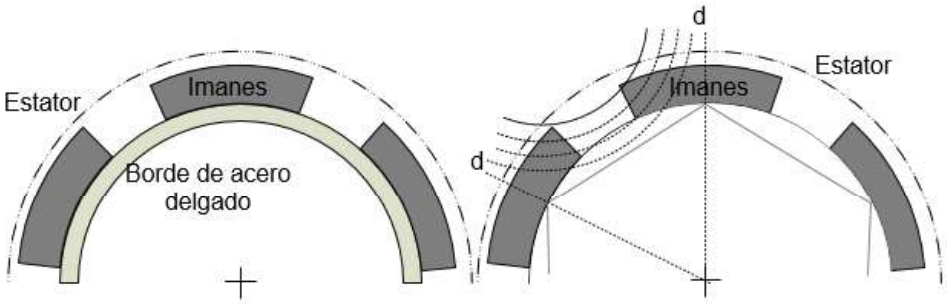


Figura 1.17 Configuración del rotor de una PMSM [17]

1.3.3.3 Clasificación de las Máquinas Sincrónicas de Imanes Permanentes

En la Figura 1.18 se muestra la clasificación de las PMSM. Dependiendo de la dirección del flujo magnético y según la posición de los imanes, las máquinas sincrónicas de imanes permanentes pueden clasificarse en axial, radial o transversal, así como de imanes externos o internos.

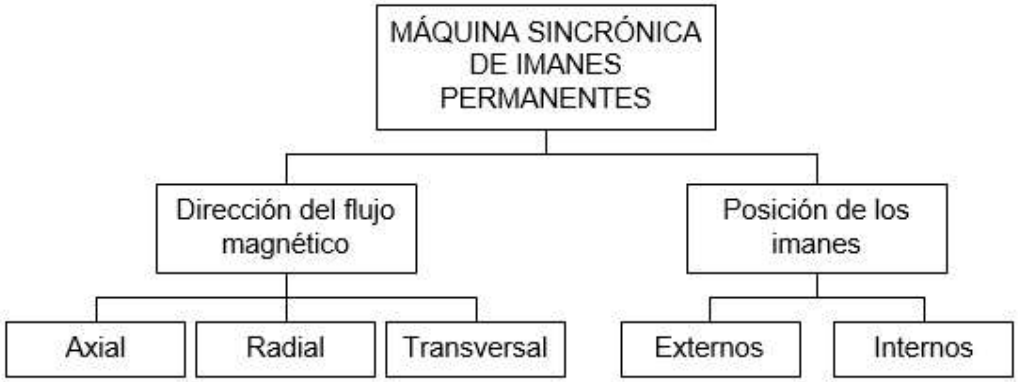


Figura 1.18 Clasificación de las PMSM

- En las máquinas de flujo axial, el campo magnético producido por los imanes gira en la misma dirección que el eje de rotación. Los imanes están ubicados sobre un disco de hierro, el entrehierro se puede ajustar en el ensamblaje, al ser abierto y llano el estator es fácil de bobinar, sin embargo esta topología no es muy empleada [18]. En la Figura 1.19 se observa una máquina de flujo de axial.

Figura 1.19 Máquina de flujo axial [19]

- En las máquinas de flujo radial, el campo magnético producido por los imanes produce un flujo perpendicular al eje de rotación. Los imanes se colocan lateralmente sobre la superficie del rotor. A diferencia del tipo de imanes empleados en el tipo de máquinas visto anteriormente, los imanes empleados para estas máquinas deben ser curvos a diferencia de los rectangulares [18]. En la Figura 1.20 se observa una máquina de flujo radial.

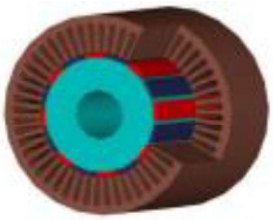


Figura 1.20 Máquina de flujo radial [19]

- En las máquinas de flujo transversal, el flujo producido por los imanes es perpendicular al eje de rotación, los imanes son colocados sobre el rotor en forma de anillo, esto hace que posea mejores características que las máquinas de flujo axial y radial. Entre ellos se tiene una densidad de fuerza alta, las pérdidas en el cobre son bajas y el devanado es más fácil de bobinarlo. No son muy usados debido a su dificultad en la fabricación y montaje y por ende su costo elevado [18]. En la Figura 1.21 se observa una máquina de flujo transversal.

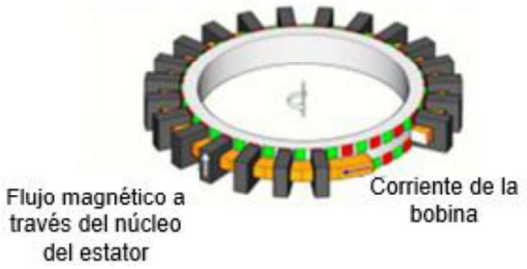


Figura 1.21 Máquina de flujo transversal [19]

- En las máquinas con imanes montados en la superficie del rotor, los imanes se colocan sobre la superficie del rotor, con esto se logra sacar provecho al máximo la energía de los imanes y de igual manera aumentar la densidad de flujo del entrehierro. Por lo general, las inductancias son bajas y aproximadamente iguales, debido a que la permeabilidad del aire y la del imán son iguales, otra característica importante es que la inercia es baja, son empleadas en robótica o en herramientas que requieren un alto rendimiento [20]. En la Figura 1.22 se puede observar una máquina de imanes montados en la superficie.

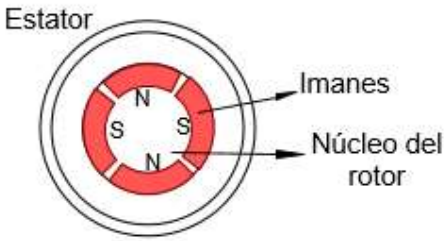


Figura 1.22 Máquina con imanes superficiales [20]

- Las máquinas de imanes interiores o embebidos se emplean en aplicaciones donde se requiera una alta velocidad, generalmente los imanes se colocan de manera horizontal o vertical, formando una I o una V. La inductancia de magnetización es baja debido que se protege a los imanes contra la desmagnetización parcial al estar más alejados del estator. En la Figura 1.23 se muestra un ejemplo de este tipo de máquinas.

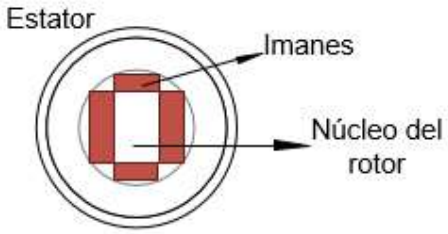


Figura 1.23 Máquina con imanes embebidos [20]

Los imanes empleados en la máquina de imanes montados en la superficie son curvos, a diferencia de los empleados en la máquina de imanes embebidos que son rectangulares. Esto provoca que el flujo magnético producido en el entrehierro no tenga forma sinusoidal, por ello se deben colocar imanes de gran volumen para que produzcan la misma potencia que los superficiales [21].

La Tabla 1.2 muestra la saliencia y la inductancia dependiendo de los diferentes tipos de excitación [22].

Tabla 1.2 Inductancia, saliencia y tipo de excitación de máquinas sincrónicas

Tipo de excitación	Saliencia	Inductancias
Imanes superficiales	Igual a cero	$L_d = L_q$
Imanes embebidos	Menor a cero	$L_d < L_q$
Con devanado de campo	Mayor a cero	$L_d > L_q$

1.3.3.4 Principio de Funcionamiento de la Máquina de Imanes Permanentes [23]

El principio de funcionamiento de una PMSM es similar al de las máquinas sincrónicas convencionales. El rotor gira a la misma velocidad que el campo rotatorio del estator, es decir, la velocidad sincrónica. Esta velocidad depende del número de polos de la máquina y de la frecuencia del voltaje en el devanado del estator, en la Ecuación 1.1 se observa esta relación.

$$n = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Ecuación 1.1 Velocidad en función de la frecuencia y número de polos

Donde:

n: velocidad sincrónica de la máquina, en r.p.m.

p: número de polos

f: frecuencia del voltaje del estator, en Hz

En modo motor, al alimentar el estator con corriente altera genera un campo magnético rotatorio, que por la interacción con los imanes permanentes induce un campo magnético en el rotor. A diferencia de las máquinas convencionales, estas no giran inmediatamente al conectarse a una fuente trifásica de corriente alterna, la PMSM necesita un impulso que permita eliminar la inercia del rotor durante el arranque, esto se soluciona agregando un devanado de amortiguamiento en el rotor, similar a agregarle una jaula de ardilla. En el caso de las PMSM no es posible eliminar el campo magnético del rotor con esta solución, por lo que se requiere de un inversor trifásico, que aumente gradualmente la frecuencia de la corriente circulante por el estator con la finalidad de que el rotor tome una velocidad para que empiece a girar.

En modo generador, el acoplamiento mecánico a una turbina genera un torque mecánico que mueve el eje y por el campo fijo de los imanes se induce un voltaje en los devanados de la armadura.

Una manera sencilla de entender el funcionamiento de las PMSM es a través del circuito equivalente del modelo monofásico que se presenta en la Figura 1.24. Este circuito depende de si la máquina es de imanes externos o internos, puesto que será modelada como una máquina sincrónica cilíndrica o de polos salientes, respectivamente.

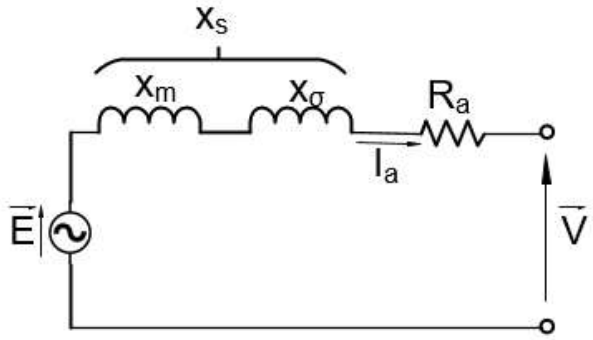


Figura 1.24 Circuito monofásico equivalente de una PMSM [23]

Donde:

X_s: reactancia sincrónica de la PMSM

R_a: resistencia de armadura

I_a: corriente que circula por una bobina de la armadura

E: voltaje interno de la máquina

V: voltaje en bornes de la armadura

El comportamiento en estado estable de la máquina está dado por la Ecuación 1.2.

$$\vec{E} = (R_a + jx_s) \cdot \vec{I_a} + \vec{V}$$

Ecuación 1.2 Voltaje interno desarrollado en una PMSM [22]

1.3.4 Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG)

El aerogenerador con máquina de inducción doblemente alimentada ha incrementado su uso en los últimos años, principalmente en unidades de gran tamaño. Ofrece una ventaja con respecto a los generadores asincrónicos y sincrónicos de velocidad fija, al no necesitar una potencia mecánica constante en el eje del rotor. De este modo, independientemente de la velocidad del viento que mueve el eje de la máquina, el voltaje y la frecuencia se mantendrán constantes en los bornes del generador evitando así perder el sincronismo con la red. Otra ventaja es que, debido a la electrónica de potencia, se tiene un control sobre la frecuencia de la corriente con que se alimenta al rotor, es decir, se tiene una manipulación de un fragmento de la potencia de salida total (aproximadamente un 30%), lo que implica tener un control de la velocidad, factor de potencia y pérdidas de energía a un costo menor. Es importante mencionar que es posible también utilizar esta máquina como máquina de inducción o como máquina sincrónica [24]. En la Figura 1.25 se muestra la configuración del aerogenerador DFIG.

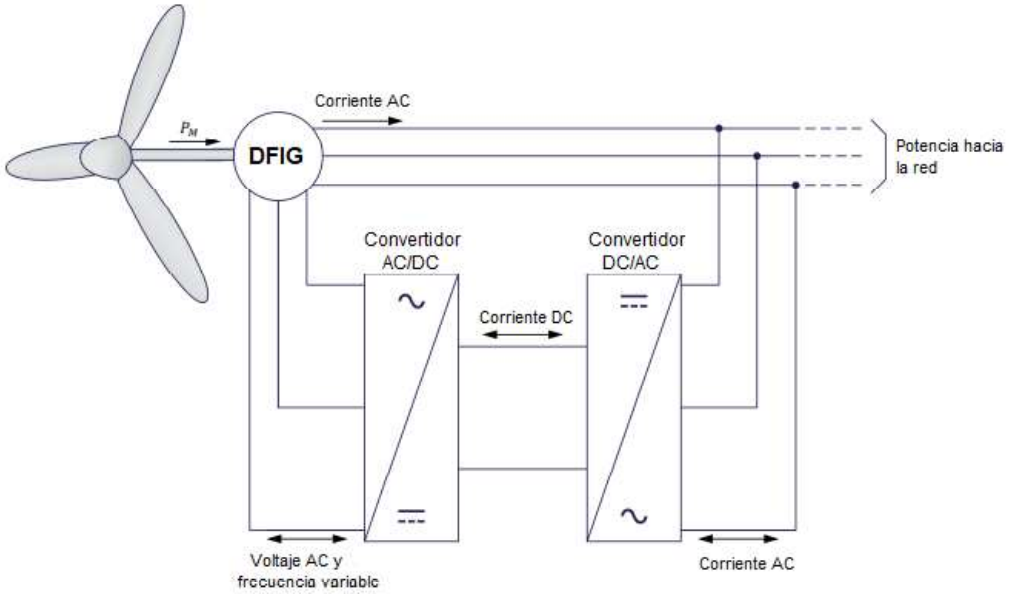


Figura 1.25 Configuración del aerogenerador DFIG [24]

1.3.4.1 Partes Constitutivas de la Máquina de Inducción

Se denomina máquina de inducción o asincrónica debido a que la velocidad a la que gira el rotor es menor que la del campo magnético del estator.

La máquina de inducción está formada de dos partes: estator y rotor. En el estator se aloja el devanado trifásico y es la parte fija de la máquina. La parte móvil de la máquina es el rotor y también aloja un devanado en sus ranuras. Tanto el estator como el rotor se arman sobre chapas estampadas de acero electromagnético [25].

Existen dos tipos de rotores: jaula de ardilla y de rotor bobinado. El primero, tiene la forma de un cilindro montado en un eje, con barras conductoras de aluminio o cobre colocadas en su interior y conectadas entre sí, de este modo se cortocircuitan los anillos dando la forma de una jaula, de ahí su nombre. En el segundo, las bobinas están unidas en un punto común, formando una estrella y los otros terminales están en el exterior permitiendo conectar una fuente de voltaje con magnitud y frecuencia variable. En la Figura 1.26 y 1.27 se presentan estos dos tipos de rotores.

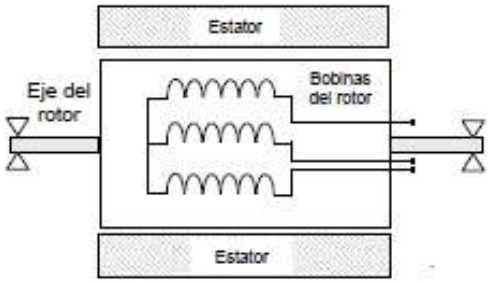


Figura 1.26 Esquema de rotor bobinado [26]

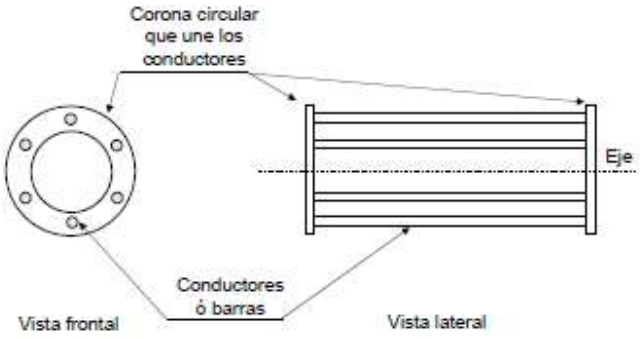


Figura 1.27 Esquema de rotor jaula de ardilla [26]

1.3.4.2 Principio de Funcionamiento de la Máquina DFIG

La máquina DFIG se conecta a la red por el estator y se alimenta al rotor por medio de un convertidor AC/DC/AC, funcionando de manera similar al de una máquina sincrónica.

Para explicar el funcionamiento de una máquina DFIG, se parte de una máquina sincrónica convencional. Una turbina mueve el eje de la máquina y una fuente de corriente continua alimenta el devanado inductor, de este modo se genera un campo magnético estático que induce un voltaje en los devanados del estator. En las DFIG sucede lo mismo, su diferencia es que el rotor esta alimentado con corriente alterna que genera un campo magnético que cambia en el tiempo conforme varía la frecuencia de dichas corrientes. De este modo la frecuencia de las corrientes que atraviesan el devanado inducido dependen no solo de la velocidad de giro del rotor sino también de la frecuencia de las corrientes suministradas al mismo [24].

La máquina DFIG se modela como un motor clásico de inducción, con resistencias en el estator y el rotor, la rama paralelo considera solamente la reactancia de magnetización. Se incluye el voltaje que puede alimentar al rotor. En la Figura 1.28 se presenta el circuito equivalente de una DFIG con sus parámetros referidos al estator.

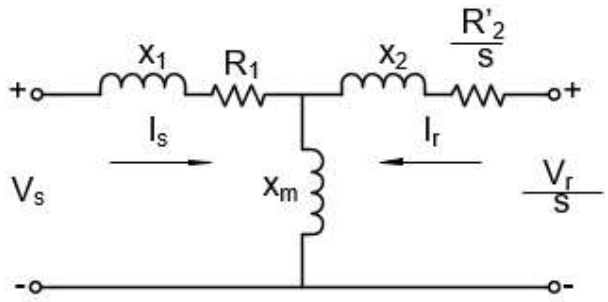


Figura 1.28 Circuito equivalente de la máquina DFIG [27]

1.3.4.3 Funcionamiento de la DFIG Hipersincrónica y Subsincrónica

El motivo principal para emplear una DFIG es por su capacidad para producir una frecuencia constante en sus bornes, es decir aquella de la red a la que está conectada. La frecuencia no depende de la velocidad con la que gira la turbina (viento), para asegurar esto se debe intercalar paulatinamente la frecuencia de las corrientes que ingresan al rotor de manera que compense las variaciones dadas por las fluctuaciones de la velocidad del rotor, haciendo que la turbina trabaje en el máximo punto de rendimiento.

La frecuencia de las corrientes del rotor que se tiene que inyectar para mantener invariante la frecuencia de la red se calcula con la Ecuación 1.3:

$$f_{rotor} = f_{red} - \frac{n_{rotor} \times p}{120}$$

Ecuación 1.3 Frecuencia del rotor en función de su velocidad

Donde:

f_{rotor}: frecuencia de las corrientes que alimentan el devanado del rotor, necesaria para mantener el valor de la frecuencia de la DFIG igual a la de la red constante, en Hz

f_{red}: frecuencia de la red a la que está conectada la DFIG, en Hz

n_{rotor}: velocidad del eje de la máquina, en r.p.m.

p: número de polos de la máquina

Para entender cuando una máquina DFIG funciona hipersincrónica y subsincrónica se observa la Figura 1.29.

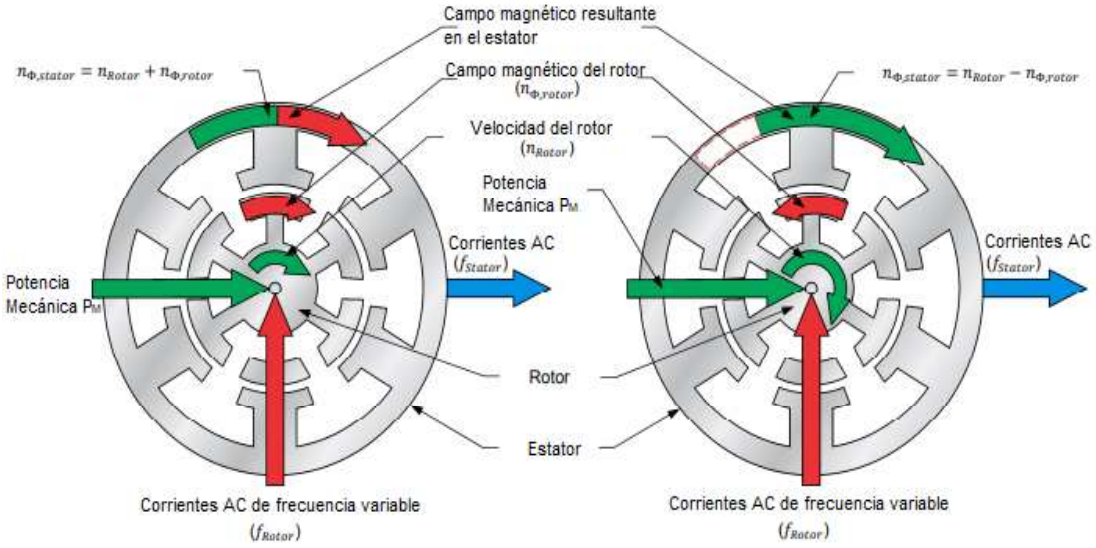


Figura 1.29 Esquema de la interacción entre el campo magnético del rotor, velocidad del rotor y el flujo resultante en el estator [24]

El campo magnético en el estator de la máquina depende de la velocidad del rotor y de la frecuencia de las corrientes que alimentan el rotor, es decir, si esta frecuencia genera un campo magnético que gira en la misma dirección que el eje de la máquina se sumará el flujo magnético del rotor con la velocidad del rotor, por el contrario, si esta frecuencia crea un campo magnético en sentido contrario a la velocidad del rotor, se substrae de la velocidad este campo magnético y de este modo se tiene un funcionamiento hipersincrónico o subsincrónico, respectivamente [24].

Para explicar de mejor manera este funcionamiento se emplea la Ecuación 1.3. Se observa que, si la máquina estuviese girando a la velocidad sincrónica, la frecuencia de las corrientes que se necesitaría es de 0 Hz, en este caso la máquina doblemente alimentada funciona como una máquina sincrónica. Si la velocidad del rotor disminuye con respecto a la velocidad de sincronismo, se deberá compensarla suministrando en el rotor una corriente cuya frecuencia sea de polaridad positiva, es decir, que sea aditiva; en cambio, si la velocidad aumenta, se requerirá una corriente con frecuencia de polaridad negativa que alimente el rotor, con la finalidad de que sea sustraída de la velocidad del rotor y pueda mantenerse a la velocidad sincrónica.

1.3.5 Detección de Valores Atípicos

Al momento de tomar decisiones es importante realizar un análisis de la magnitud de los datos y los resultados, lo que conlleva a un adecuado discernimiento de sus valores. Entre los errores más comunes que se presentan en los datos se consideran aquellos con valores

atípicos. Se conoce como valor atípico a todo elemento que difiere del resto en un conjunto de datos o que presentan una desviación con respecto a otra observación, que podría desembocar en que se emplearon distintos mecanismos para obtener dichos valores. En algunas ocasiones, estos valores son eliminados para evitar que afecten su análisis, sin embargo, su eliminación suele presentar desviaciones en los datos de ciertas situaciones.

Se recurrió al uso de esta metodología para realizar la comparación de los parámetros obtenidos en las distintas pruebas ejecutadas con los recolectados en diferentes trabajos investigativos y artículos académicos, para discernir si los resultados obtenidos se encuentran dentro de valores característicos de este tipo de máquinas.

No existe un planteamiento característico o genérico para la detección de estos datos, pero se han propuestos cuatro categorías, de acuerdo a las técnicas empleadas: distribución, densidad, clusters o agrupamientos [28].

En este trabajo de titulación se emplearon dos técnicas: envolvente elíptica y factor de valor atípico local (LOF: local outlier factor, por sus siglas en inglés).

1.3.5.1 Técnica de la Envolvente Elíptica basado en Mahalanobis

En esta técnica se asume que la procedencia de los datos viene de una distribución conocida, entonces una vez definida la forma de los datos se considera como datos típicos aquellos que se encuentren cerca de la forma ajustada y aquellos que se encuentren lo suficientemente lejos se consideran como valores atípicos.

La distancia que considera esta técnica como referencia es la distancia de Mahalanobis, que está definida como la distancia entre el centro de masa y cada punto de datos. Cuando un dato se encuentra en el centro de masa, la distancia de Mahalanobis es cero y cuando se encuentra lejano, la distancia será distinta de cero, por lo que los valores alejados del centro de masa se consideran como atípicos [29].

1.3.5.2 Técnica del Factor Local de Valores Atípicos

Esta técnica compara entre datos vecinos locales y no entre datos distribuidos globalmente. Evalúa la desviación de la densidad de un valor dado con respecto a la de sus vecinos y los valores cuyas densidades sean bajas o altas con respecto al valor de referencia se consideran como valores atípicos [28].

El presente trabajo está organizado en cuatro fases sistemáticas que se detallan a continuación:

A. Fase teórica

- Revisión de las generalidades, principios de funcionamiento y aplicaciones de las máquinas PMSM y DFIG disponibles en el emulador de energía eólica.
- Estudio de conceptos necesarios para ejecutar los diferentes métodos de obtención de parámetros tanto para las PMSM como para las DFIG.

B. Fase de diseño, análisis o implementación metodológica

- Implementación de los métodos para la PMSM: 1) accionamiento de la máquina como generador, 2) como motor sin carga y 3) como motor con carga, utilizando los dispositivos disponibles en el emulador y adaptando las condiciones requeridas en cada proceso.
- Implementación de los métodos para la DFIG: 1) respuesta transitoria, 2) ensayos de carga, rotor bloqueado, operación en vacío y 3) a partir de los datos de catálogo, utilizando los dispositivos disponibles en el emulador y adaptando las condiciones requeridas en cada proceso.

C. Fase de simulación y/o aplicación práctica

Se realiza pruebas de laboratorio a las dos máquinas del emulador de energía eólica con los respectivos métodos especificados.

D. Fase de validación / análisis de resultados/ pruebas de funcionamiento

Se efectúa un análisis de la validez de los parámetros obtenidos en base a comparación con datos de otras máquinas de similares características.

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo se fundamenta en una investigación aplicada, para determinar los parámetros de las máquinas de imanes permanentes y de inducción doblemente alimentada, realizando pruebas de laboratorio.

Se consultaron diversas fuentes bibliográficas como publicaciones, normas, trabajos de titulación, libros y páginas en internet con la finalidad de conocer los distintos procedimientos que se pueden realizar para medir los parámetros de las máquinas. Se recolecta toda la información encontrada para posteriormente analizar la ejecución de las pruebas que se puedan realizar en función de los equipos disponibles en el laboratorio.

2.1 Datos de Placa de las Máquinas

Los datos de placa de las dos máquinas analizadas se listan a continuación.

2.1.1 Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes

Motor

- Potencia nominal: 260 W
- Velocidad nominal: 6000 r.p.m.
- Corriente nominal: 3 A
- Torque nominal: 0,41 N.m (3,6 lb.in)
- Voltaje de la barra del inversor: 160 V
- Codificador digital: 2048 pulsos por revolución - 0/5 Vdc diferencial
- Fuerza contraelectromotriz: 10,4 Vrms/1000 r.p.m.
- Dimensiones: 308 x 291 x 440 mm (12,1 x 11,5 x 17,3 in)

2.1.2 Máquina de Inducción de Rotor Bobinado

- Voltaje nominal: 120/208 V
- Número de fases: 3
- Frecuencia: 60 Hz
- Velocidad hipersincrónica: 1875 r.p.m.
- Velocidad subsincrónica: 1720 r.p.m.

- Protección de sobrevoltaje del rotor
- Protección térmica con termistor, $10\ \mathrm{k}\Omega$, LV type 2
- Dimensiones: 308 x 291 x 440 mm (12,1 x 11,5 x 17,3 in)

Motor

- Voltaje estator: 120/208 V
- Voltaje rotor: 360/624 V
- Potencia mecánica: 200 W
- Factor de potencia: 0,64 (-)
- Corriente nominal: 1,15 A

Generador

- Voltaje estator: 120/208 V
- Voltaje rotor: 360/624 V
- Potencia Aparente: 480 VA
- Potencia nominal: 200 W
- Factor de potencia: 0,41 (-)
- Velocidad: 1800 r.p.m.
- Corriente nominal: 1,33 A

2.2 Pruebas para la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes

2.2.1 Resistencia de Armadura

Para medir la resistencia de armadura se emplea el método del voltímetro – amperímetro, que consiste en alimentar con un voltaje continuo a las bobinas de la armadura. Con voltaje continuo la reactancia sincrónica es cero y la única componente que va a limitar la corriente que circula por el devanado es la resistencia de las bobinas. Se aumenta el voltaje hasta llegar a la corriente nominal y se toman valores de voltaje y corriente. En el caso de que la conexión del devanado del estator sea en delta, el valor de la resistencia medida debe ser dividido para $\frac{3}{2}$ y en el caso de que sea en estrella hay que dividirlo para $\frac{1}{2}$. De ser necesario se corrige el error por temperatura.

Para la prueba se realiza el diagrama de conexión presentado en la Figura 2.1. Esta prueba es realizado para las máquinas PMSM y DFIG [30].

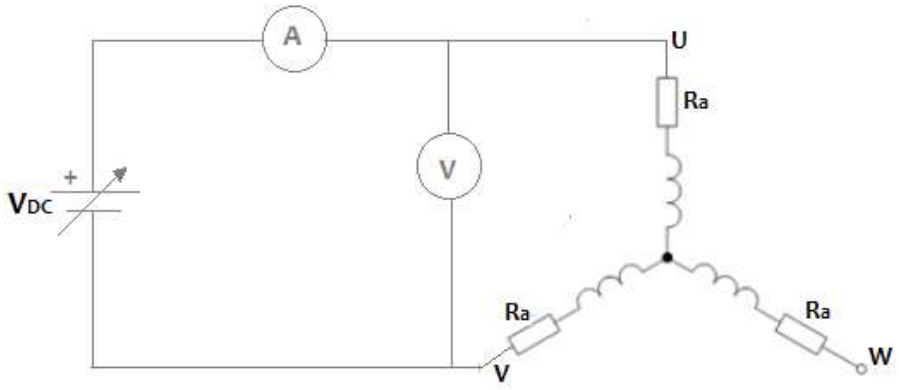


Figura 2.1 Esquema de conexión para medir la resistencia de armadura

En la Figura 2.2 se aprecia la instrumentación utilizada en esta prueba.

Figura 2.2 Medición de la resistencia de armadura por medio del método voltímetro amperímetro

2.2.2 Flujo Magnético

La cantidad de flujo magnético de los imanes es medida a través de la prueba de circuito abierto. Esta prueba no es tan simple de realizar en este tipo de máquinas, a diferencia de lo que sucede en una máquina sincrónica convencional en la que el voltaje de circuito

abierto es en función de la corriente de campo, en una máquina de imanes permanentes el voltaje de circuito abierto se ve afectado por la intensidad de los imanes y la temperatura del imán, que no se puede medir ni controlar fácilmente. Un ejemplo de esta característica se presenta en la Tabla 2.1 para imanes de tierras raras y de ferrita.

Tabla 2.1 Variaciones de las características del imán frente al aumento de la temperatura

Características del imán	Imán de tierras raras	Imán de ferrita
Densidad de flujo residual	Disminuye	Disminuye
Coercitividad	Disminuye	Aumenta

Para llevar a cabo esta prueba es necesario que la máquina se encuentre térmicamente en estado estable. Para verificar esto se debe hacer girar a la máquina a una velocidad fija y medir la temperatura de la máquina principalmente en el inducido. Si la máquina no ha sido operada, se considera que se encuentra a temperatura ambiente, la prueba debe ser realizada rápidamente y los resultados corresponden a dicha condición.

Al momento de realizar la prueba es posible que la velocidad varíe un poco, por lo que se recomienda que los datos sean medidos empleando un osciloscopio o un sistema de adquisición de datos [31].

En la prueba de circuito abierto se hace girar a la máquina sin carga y se toman valores de voltaje y velocidad, conforme aumenta la frecuencia de giro. A diferencia de las máquinas sincrónicas tradicionales que necesitan variar su excitación para que el voltaje en bornes del estator disminuya o aumente, estas máquinas solo necesitan aumentar la velocidad de giro del eje del rotor, para que se cree un flujo magnético variable en los imanes que induzcan un voltaje en la armadura. En la Figura 2.3 se muestra el esquema que se utiliza en esta prueba [23], mientras que en la Figura 2.4 se muestra la instrumentación empleada en esta.

Figura 2.3 Esquema de conexión para la prueba de circuito abierto

Figura 2.4 Prueba de circuito abierto para medir el flujo magnético de la máquina

Una vez obtenidos los datos, se aplica la Ecuación 2.1 para determinar el flujo magnético del imán y de igual manera conocer el voltaje nominal de la máquina.

$$\varphi = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{of}}{p \cdot \omega_r}$$

Ecuación 2.1 Ecuación del flujo magnético resultante [32]

Donde:

E_{of}: voltaje de fase en los bornes de la máquina, en V

φ: flujo del imán expresado, en Vs

ω_r: velocidad mecánica de la máquina, en rad/s

p: pares de polos de la máquina

2.2.3 Número de Polos

La frecuencia angular eléctrica tiene una relación directa con la velocidad mecánica y con el número de polos en una máquina sincrónica. Se realiza la prueba de circuito abierto con la instrumentación mostrada en la Figura 2.3, se toma distintos valores de velocidad y frecuencia en los bornes del generador y mediante la Ecuación 2.2 [33] se calcula el número de polos de la máquina.

$$\omega = \frac{p}{2} \cdot \omega_r$$

Ecuación 2.2 Ecuación para determinar el número de polos [33]

Donde:

ω: frecuencia angular eléctrica en los bornes de la máquina, en rad/s

ω_r: velocidad mecánica de la máquina, en rad/s

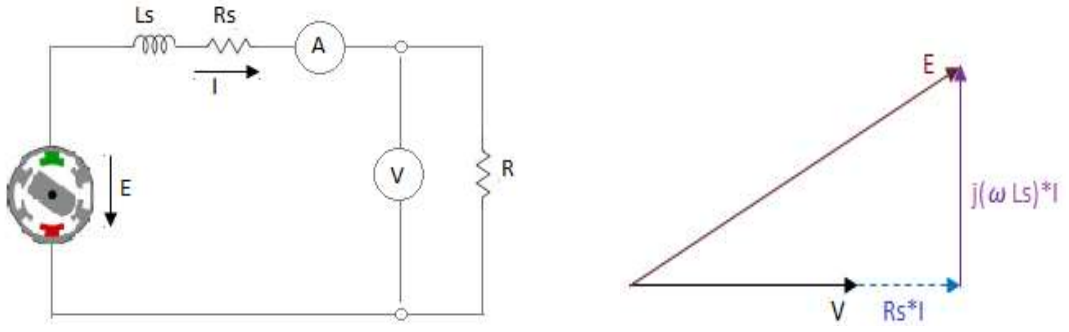
p: número de polos de la máquina

2.2.4 Reactancias de Eje Directo y de Cuadratura

La máquina PMSM, al tener un rotor diferente a las maquinas sincrónicas tradicionales, no se puede realizar la prueba de cortocircuito para encontrar el valor de inductancia, por ello se lleva a cabo distintas pruebas, así como el uso de medidores RLC, pruebas con carga y voltaje de paso aplicado en el estator. A continuación, se detallan los procedimientos realizados para cada método.

2.2.4.1 Prueba con Carga

Consiste en calcular la reactancia sincrónica a través de la prueba con carga puramente resistiva. Se considera este tipo de carga para evitar el desfase entre la corriente y el voltaje. En la Figura 2.5 se presenta el esquema de conexión y el diagrama fasorial para esta prueba. Se deben tomar valores de voltaje, corriente y velocidad de la máquina para diferentes valores de carga resistiva. Como precaución, evitar el paso de corrientes elevadas para no desmagnetizar los imanes [33].



(a) (b)

Figura 2.5 (a) Prueba con carga resistiva y (b) Diagrama fasorial del circuito

En la Figura 2.6 se presenta la instrumentación utilizada en la prueba de carga de una máquina de imanes permanentes.

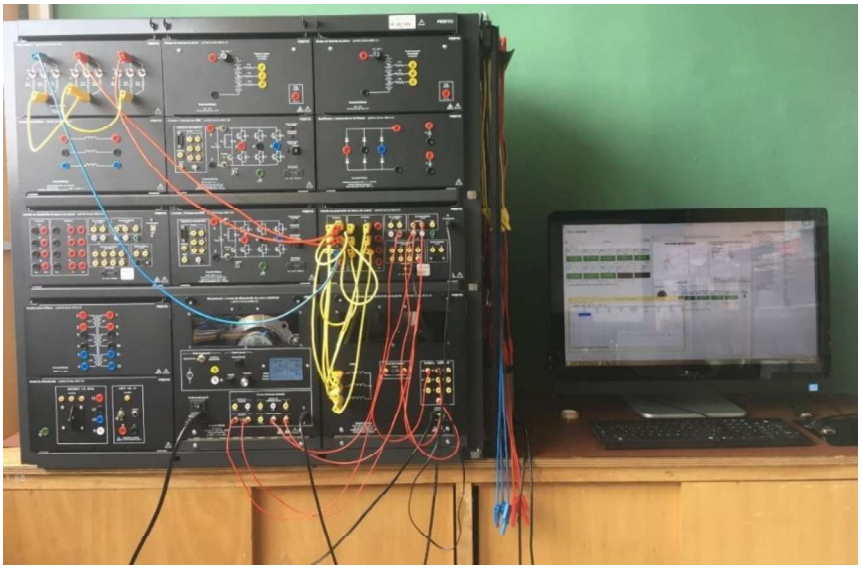


Figura 2.6 Prueba de carga con elementos de medición digitales

De la Ecuación 1.2 se despeja la reactancia sincrónica y se tiene la Ecuación 2.3.

$$Xs = \sqrt{\left(\frac{E - V}{I}\right)^2 - Rs^2}$$

Ecuación 2.3 Cálculo de la reactancia sincrónica

La prueba se realiza con un banco de resistencias trifásicas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, conectadas en delta, la misma que no influye en la obtención de datos, ya que los equipos de medición se colocan con el fin de medir el voltaje entre líneas y la corriente de línea. Adicionalmente, se mide la velocidad para cada paso de carga y con la ayuda de la prueba de vacío se estima el valor del voltaje interno.

2.2.4.2 Medidor RLC

Los medidores RLC se emplean para medir resistencia, capacitancia e inductancia, ya sea independientemente o en conjunto con gran precisión. Dependiendo de la sofisticación del equipo, se puede medir impedancias haciendo un barrido de frecuencia o a una sola dada, con la finalidad de conocer como varían dichos parámetros en función de la frecuencia.

En el Laboratorio de Alta Frecuencia se tiene un medidor RLC, que se encuentra en la Figura 2.7.

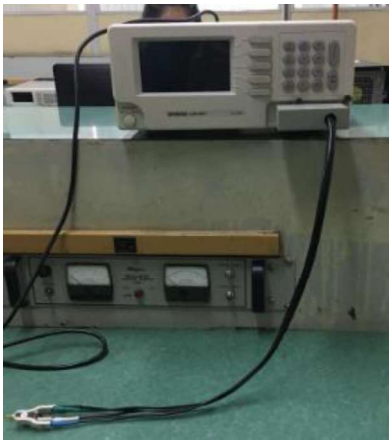


Figura 2.7 Medidor RLC del Laboratorio de Alta Frecuencia

2.2.4.3 Voltaje de Paso Aplicado en los Bornes del Estator [34]

La prueba de voltaje de paso aplicado en los bornes del estator se la realiza con el propósito de calcular las inductancias de eje directo y eje de cuadratura, por lo que es indispensable identificar los ejes. En la Tabla 2.2 se indica el procedimiento llevado a cabo y en la Figura 2.8 se muestra la ejecución para la prueba.

Tabla 2.2 Alineación del rotor con el eje directo de la máquina

Pasos	Procedimientos
1.	La prueba será realizada con una fuente de voltaje continuo variable.
2.	La fase A se conecta al terminar positivo y las fases B y C se cortocircuitan y conectan al terminal negativo.
3.	Se fija un límite de corriente de la fuente, con el fin de poder girar el eje manualmente. Este límite está entre el 10% y 20% de la corriente nominal, para máquinas muy robustas su valor disminuye.
4.	Se dibuja una línea cada vez que el rotor se alinee con el eje d. Cuando se alimenta con un voltaje al estator, el rotor tiende a moverse al eje d más cercano.

Figura 2.8 Determinación de la posición de los ejes q y d

En la Figura 2.9 se presenta los ejes d y q encontrados en la prueba.

Figura 2.9 Eje d y q determinados al aplicar un voltaje continuo a los bornes del estator

Una vez establecidos las posiciones donde se estabiliza el rotor, se realiza la prueba para determinar las impedancias correspondientes a cada eje. Para esto, se debe verificar que la corriente en las tres fases esté balanceada. Cuando se alinea la fase A del estator con el eje del rotor se puede encontrar la inductancia en eje directo a partir de la Figura 2.10. Para la inductancia de eje de cuadratura se ajusta el eje del rotor a 90º eléctricos de la posición anterior. En la Tabla 2.3 se presenta el procedimiento llevado a cabo para la obtención de las inductancias.

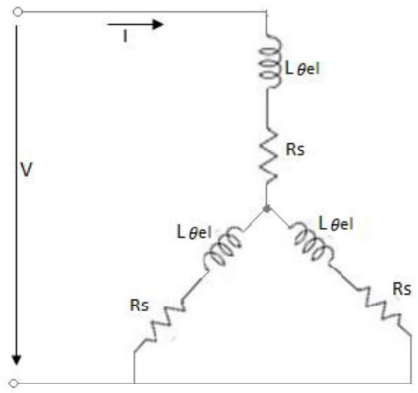


Figura 2.10 Circuito para medir las inductancias de los ejes d y q [34]

Al reducir el circuito se tiene los valores encontrados en la Figura 2.11.

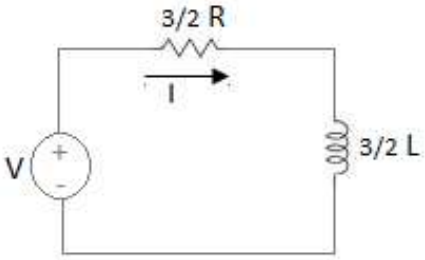


Figura 2.11 Circuito simplificado para encontrar las inductancias en los ejes d y q

Del circuito se obtienen las ecuaciones 2.4 y 2.5 para el cálculo de las inductancias en el eje directo y de cuadratura, respectivamente, L es la inductancia total antes de conectarse en serie y paralelo.

$$\mathrm{Ld} = \frac{2}{3}\mathrm{L} \qquad \text{para } \theta_{\mathrm{el}} = 0°$$

Ecuación 2.4 Cálculo de la inductancia en el eje directo en función de la inductancia total [34]

$$\mathrm{Lq} = \frac{2}{3}\mathrm{L} \qquad \text{para } \theta_{\mathrm{el}} = 90°$$

Ecuación 2.5 Cálculo de la inductancia en el eje de cuadratura en función de la inductancia total [34]

Del circuito de primer orden se obtiene la Ecuación 2.6:

$$\mathrm{R} \cdot \mathrm{i(t)} + \mathrm{L} \cdot \frac{\mathrm{d\,i(t)}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{v(t)}$$

Ecuación 2.6 Ecuación diferencial del circuito de primer orden

A esta ecuación se la compara con la Ecuación 2.7.

$$\frac{d\,x(t)}{dt} + \lambda \cdot x(t) = f(t)$$

Ecuación 2.7 Ecuación general para solución de circuitos de primer orden

Donde:

$$f(t) = \frac{v(t)}{L} = \frac{Vdc}{L}$$

$$\lambda = -\frac{R}{L}$$

$$\tau = -\lambda = \frac{L}{R}$$

Ecuación 2.8 Constante de tiempo eléctrica [34]

Se reemplaza la Ecuación 2.8 en la Ecuación 2.4 y la inductancia en eje directo puede ser calculada con la Ecuación 2.9:

$$Ld = \frac{3}{2} \cdot R \cdot \tau$$

Ecuación 2.9 Cálculo de la inductancia en el eje directo [29]

Tabla 2.3 Obtención de las inductancias de eje directo y de cuadratura

Pasos	Procedimiento
1	Se alinea el eje en la misma dirección de la fase A para la inductancia de eje directo y a 90º de esa fase para la inductancia de eje de cuadratura.
2	Se bloquea el eje del rotor.
3	Se conecta la fase A del estator al terminal negativo de la fuente y las fases B y C cortocircuitadas al terminal positivo de la fuente.
4	Se aplica un voltaje de paso, la magnitud de la corriente que entrega esta fuente debe ser de aproximadamente el 10% de la corriente nominal.
5	Se mide la respuesta al paso de la corriente y se calcula el tiempo hasta el 63,2% de la corriente total.

En la Figura 2.12 se muestra la prueba llevada a cabo.

Figura 2.12 Prueba para determinar las inductancias de los ejes d y q

2.2.4.4 Cortocircuito Trifásico Súbito

Cuando sucede una falla en la máquina, la corriente que circula está definida por sus impedancias. Se ejecuta la prueba de cortocircuito trifásico súbito cuando se requiere conocer las constantes de tiempo e impedancias en estado estable, transitorio y subtransitorio, pues, la corriente que circula por la máquina al instante de la falla no es la misma que la que circula poco tiempo después [35].

En una máquina sincrónica convencional, la corriente que circula cuando se aplica un cortocircuito trifásico en sus bornes consta de dos componentes: una componente DC que varía exponencialmente hasta llegar a cero y una componente que varía sinusoidalmente [35].

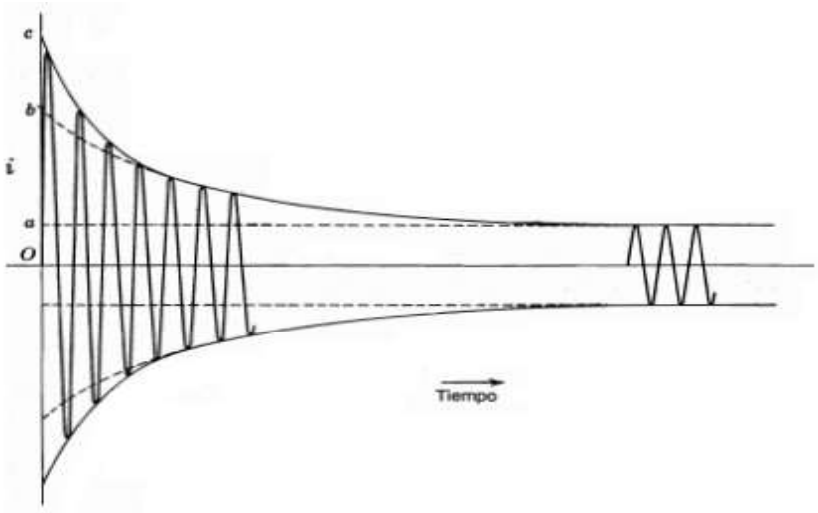


Figura 2.13 Variación de la corriente en función del tiempo cuando sucede una falla [35]

En la Figura 2.13 se observa que hay casos en que la onda de corriente no presenta componente DC, pero se observa claramente tres períodos, dos que decaen hasta llegar a un estado estable. Estas partes son conocidas como períodos subtransitorio, transitorio y estable, respectivamente [35].

Existe un decremento rápido de la corriente en los primeros ciclos, conocida como corriente subtransitoria y viene descrita por la Ecuación 2.10:

$$|I''| = \frac{o - c}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X''_d}$$

Ecuación 2.10 Corriente subtransitoria [35]

El valor efectivo de la corriente poco tiempo después de que sucede la falla es conocida como corriente transitoria, descrita en la Ecuación 2.11:

$$|I'| = \frac{o - b}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X'_d}$$

Ecuación 2.11 Corriente transitoria [35]

Y finalmente la corriente en estado estable definida por la Ecuación 2.12:

$$|I| = \frac{o - a}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X_d}$$

Ecuación 2.12 Corriente estable [35]

En una máquina sincrónica de imanes permanentes, la ausencia de los devanados de amortiguamiento y del devanado de campo hacen que no exista componente subtransitoria

por la carencia de efectos de acoplamiento entre el estator y rotor. De la misma manera no existe la componente transitoria por la falta del devanado de campo [36].

La prueba consiste en hacer girar a la máquina en vacío en condiciones nominales de voltaje y velocidad, y cortocircuitar las fases de la máquina. Como es una falla simétrica solo basta analizar lo que sucede en una fase.

Se registrarán oscilogramas de voltaje y corriente de armadura, justo en el momento en que se produce la falla. Se toman lecturas del voltaje en los bornes del estator antes de que suceda la falla. En la Figura 2.14 y Figura 2.15 se presenta el esquema y la instrumentación para la ejecución de esta prueba.

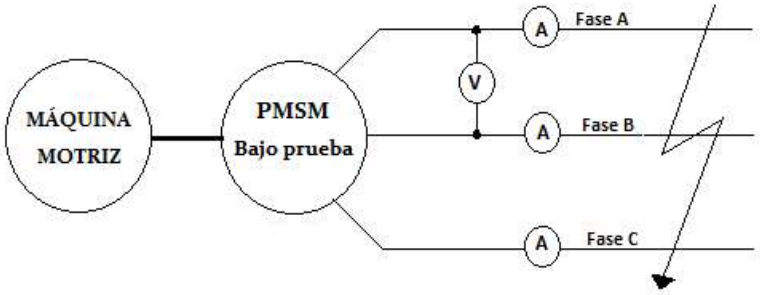


Figura 2.14 Esquema de conexión para la prueba de cortocircuito trifásico súbito

En la Figura 2.15 se muestra la prueba de cortocircuito trifásico.

Figura 2.15 Prueba de cortocircuito trifásico súbito

2.2.5 Parámetros Mecánicos

2.2.5.1 Constantes de Rozamiento Viscoso y de Fricción Seca

Para determinar estos parámetros se debe considerar la ecuación de equilibrio mecánico en función de los diferentes torques:

$$T = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_f + T_L$$

Ecuación 2.13 Ecuación de equilibrio mecánico [37]

Donde:

T: torque desarrollado por la máquina, en N.m

J: inercia del rotor, en kg.m^2

$\frac{d\omega}{dt}$: aceleración angular, en rad/s^2

ω: velocidad angular, en rad/s

B: coeficiente de rozamiento viscoso, en N.m.s

$B\omega$: torque de rozamiento viscoso, en N.m

T_f: torque de rozamiento seco, en N.m

T_L: torque de carga, en N.m

Cuando la máquina llega a una velocidad constante y gira sin carga los términos $\frac{d\omega}{dt}$ y T_L se anulan, se rescribe la Ecuación 2.13 en función de los rozamientos viscoso y seco.

$$T = B\omega + T_f$$

Ecuación 2.14 Torque en función de los rozamientos seco y viscoso [37]

Se compara la Ecuación 2.14 con la Ecuación 2.15 (ecuación de la recta con pendiente y que interseca el eje y).

$$y = mx + b$$

Ecuación 2.15 Ecuación de la recta que interseca el eje y [37]

En la Ecuación 2.15 se constata que el torque varía con la velocidad angular, B representa la pendiente lineal y cuando la velocidad angular sea nula $T = T_f$.

La potencia de la máquina está definida por el producto del torque y la velocidad angular como se indica en la Ecuación 2.16.

$$P = T \cdot \omega$$

Ecuación 2.16 Potencia en términos de torque y velocidad angular [37]

Donde:

T: torque desarrollado por la máquina, en N.m

P: potencia de la máquina, en W

ω: velocidad angular, en rad/s

Para la ejecución de esta prueba se hace funcionar a la máquina como motor, el esquema de conexión y la instrumentación empleada en la prueba se presentan en la Figura 2.16 y Figura 2.17, respectivamente. Se aplican distintos valores de voltaje y para cada uno de ellos se registran valores de corriente, potencia y velocidad.

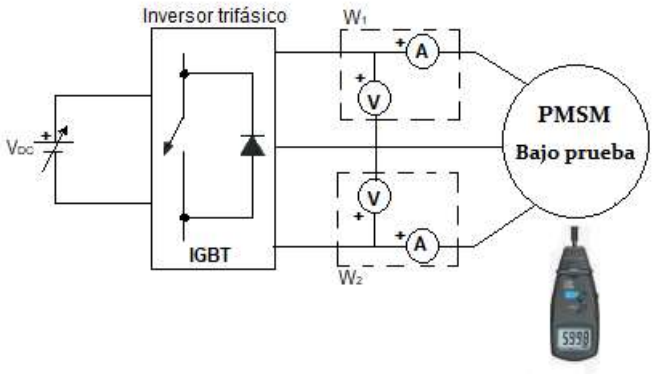


Figura 2.16 Esquema de la prueba para determinar los coeficientes de viscosidad y torque seco

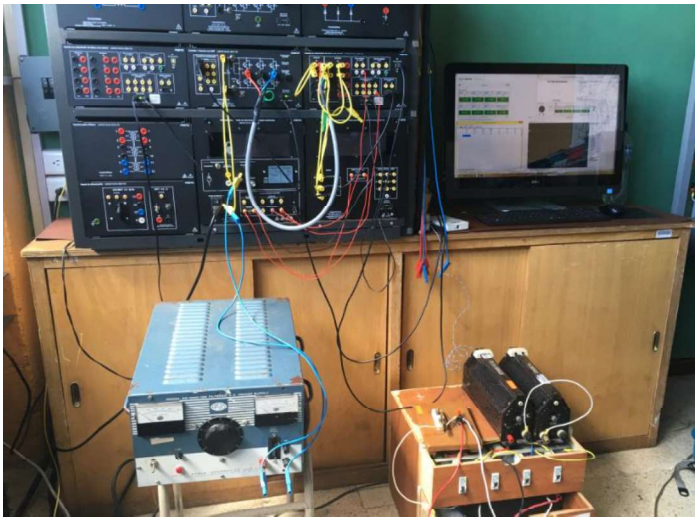


Figura 2.17 Prueba para determinar los coeficientes de viscosidad y fricción seca

2.2.5.2 Constante de Torque

La constante se calcula de los datos obtenidos en la prueba descrita en 2.2.5.1, empleando la Ecuación 2.17.

$$T = k_T \cdot I_a$$

Ecuación 2.17 Torque en función de la corriente de armadura [37]

2.2.5.3 Momento de Inercia

El momento de inercia de una máquina es su capacidad para oponerse al movimiento o a dejar de moverse. Para ello su cálculo se considera que la máquina está girando a una velocidad constante y se retira su alimentación $(V = 0)$, con ello la fuerza mecánica se pierde hasta detenerse en un tiempo Δt. La Ecuación 2.13 se ajusta a las condiciones descritas, según la ecuación 2.18.

$$0 = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_f$$

Ecuación 2.18 Ecuación de equilibrio mecánico considerando la pérdida de fem [37]

Resolviendo la ecuación diferencial de primer orden se tiene:

$$\omega(t) = \left(\omega_0 + \frac{T_f}{B}\right) e^{\left(-\frac{B}{J}t\right)} - \frac{T_f}{B}$$

Evaluando la ecuación cuando $t = 0$ y despejando J resulta la Ecuación 2.19.

$$\frac{\frac{T_f}{B}}{\omega_0 + \frac{T_f}{B}} = e^{\left(-\frac{B}{J}t\right)}$$

$$\ln\left(\frac{\frac{T_f}{B}}{\omega_0 + \frac{T_f}{B}}\right) = -\frac{B}{J}t$$

$$J = \frac{B \cdot \Delta t}{\ln\left(\frac{\omega_0 + \frac{T_f}{B}}{\frac{T_f}{B}}\right)}$$

Ecuación 2.19 Cálculo del momento de inercia [37]

Para medir el tiempo que se demora en decaer la velocidad se emplea un circuito que facilita conocer la posición del rotor, por medio de un sensor de velocidad y a través del software LabView.

2.2.5.3.1 Adquisición de Datos A través del Software LabView

El software permite adquirir datos eléctricos como voltaje, frecuencia y corriente. Necesita de un codificador óptico, una tarjeta de adquisición de datos (por sus siglas en inglés DAQ) y una computadora con el software LabView. En la Figura 2.18 se muestra un diagrama de los dispositivos requeridos para la adquisición de datos.

Figura 2.18 Diagrama de cómo se adquiere datos con el software LabView [38]

- Sensor: dispositivo que permite captar la señal física ya sea de temperatura, corriente, voltaje, posición, fuerza, sonido, entre otros, y enviar la señal a la tarjeta DAQ. Es necesario un acondicionamiento del circuito para evitar quemar las entradas analógicas de la tarjeta.
- Dispositivo DAQ: enlace entre las señales físicas que se presentan en el exterior y la computadora, internamente cuenta con un circuito que digitaliza la señal analógica enviada por el sensor, y la transmite por medio de una barra de datos a la computadora.
- PC: recibe, procesa, almacena y despliega los resultados de la adquisición. Se necesita de una aplicación programada que permita tratar los datos tomados por el sensor y procesados por la tarjeta de adquisición.

2.2.5.3.2 Circuito para Detectar la Posición del Rotor

Se emplea un sensor de velocidad de motor, que es muy utilizado para detectar la velocidad del motor, contar pulsos, limitar la posición, entre otros. Este módulo permite contar los pulsos provenientes de la máquina en un determinado tiempo y de este modo calcular su frecuencia de giro.

En la Figura 2.19 se presenta el módulo sensor de velocidad y su disco codificador. El módulo está compuesto principalmente por un sensor óptico (diodo infrarrojo) OS25B10 y un fototransistor OC1, el primero proporciona iluminación, mientras que el segundo detecta

la presencia de iluminación y manda un pulso. Al estar ubicados frente a frente evitan las interferencias de fuentes de luz externas, además cuenta con un chip comparador LM393, que está configurado como disparador Schmitt, con la finalidad de procesar las señales y extraer datos digitales en ambientes extremadamente ruidosos. Un led que se enciende cuando detecta la presencia de un objeto. El módulo esta alimentado por un voltaje continuo de 5,5 V.

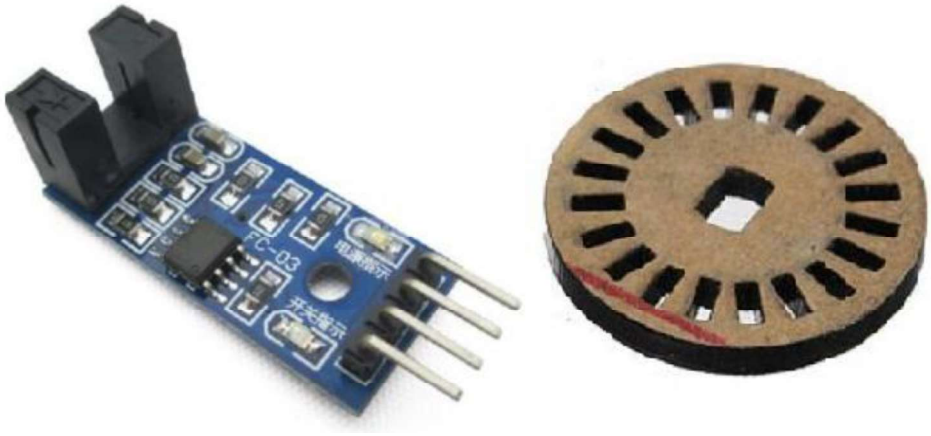


Figura 2.19 Módulo de sensor de velocidad

Este sensor detecta la frecuencia del rotor y para calcular la frecuencia del estator usa la Ecuación 2.20.

$$f_s = \frac{p}{2} \cdot f_r$$

Ecuación 2.20 Frecuencia del estator en función del número de polos y la frecuencia del rotor

2.2.5.3.3 Aplicación en LabView

Se desarrolla en LabView una aplicación que permite el registro de los pulsos enviados por el sensor, se observan digitalmente y presenta el oscilograma de la frecuencia por medio de una interfaz gráfica.

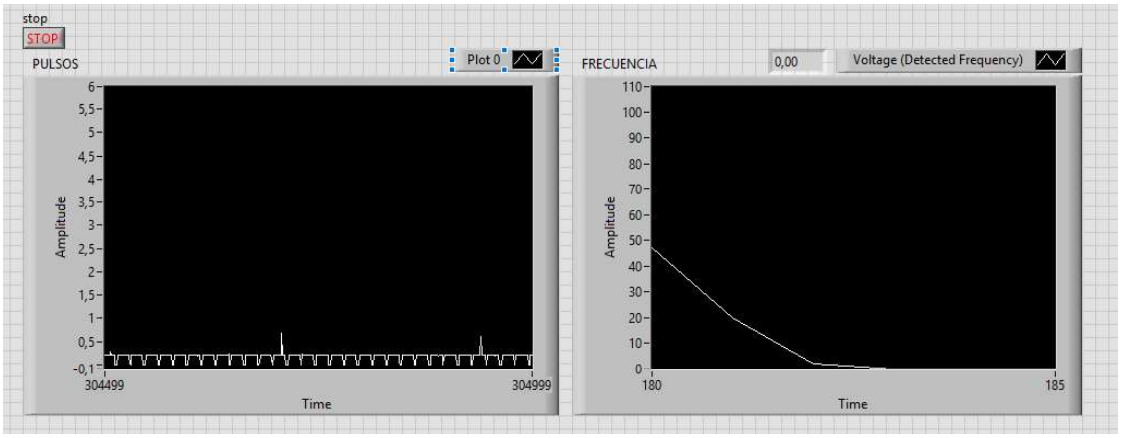


Figura 2.20 Interfaz gráfica del programa medidor de frecuencia del rotor

En la Figura 2.20 se observa que existen dos indicadores gráficos y un indicador numérico. El de la izquierda “Waveform Graphs” presenta gráficos de mediciones tomadas en función de una sola variable $y = f(x)$. Presenta gráficos que contiene una gran cantidad de número de puntos. El de la derecha “Waveform Chart” es un indicador grafico especial, presenta una o más gráficas de datos que se adquieren a una velocidad constante, se caracteriza por mantener un historial de datos de actualizaciones anteriores. La longitud predeterminada del historial para un gráfico de forma de onda es 1024 puntos de datos. La frecuencia con la que se dibuja está determinada por la velocidad con la que los puntos son enviados. El indicador numérico muestra digitalmente el valor de la frecuencia.

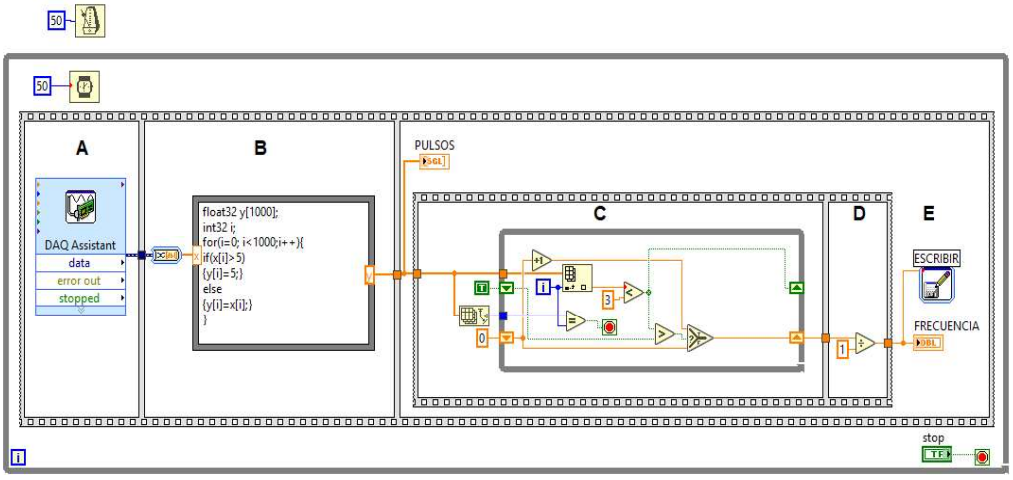


Figura 2.21 Diagrama de bloques para medir la frecuencia del rotor

En la Figura 2.21 se presentan los bloques necesarios para el procesamiento de las señales proporcionadas por el módulo de velocidad. A continuación, se detalla la aplicación desarrollada.

Figura 2.22 Estructura While existente en los diagramas de bloques LabView

Se observa que los subdiagramas están contenidos en un gran cuadro que permite que el programa se repita hasta que se produzca una condición específica. Este cuadro consta de un terminal de iteración que permite contar el número de iteraciones del lazo y un terminal condicional, permite detener el programa evaluando un valor booleano de entrada, como se observa en la Figura 2.22.

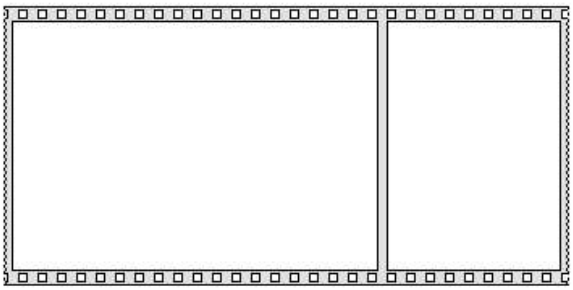


Figura 2.23 Estructura de secuencia existente en los diagramas de bloques LabView

En la Figura 2.23 se presenta una estructura de secuencia, que permite ejecutar distintos subdiagramas de izquierda a derecha y cuando los datos de cada cuadro estén disponibles, es decir, la entrada de un cuadro depende de la salida de otro cuadro.

De los diagramas de bloques mostrados en la Figura 2.21 se tiene:

A: DAQ Assistant

En este bloque se configura la tarjeta DAQ con la que se va a trabajar. Para este trabajo se utiliza la NI myDAQ. Este dispositivo es de bajo costo y aparte de medir y analizar señales funciona como multímetro además de tener entradas de audio. En la Figura 2.24 se presenta la tarjeta NI myDAQ empleada.

Figura 2.24 Tarjeta NI myDAQ

Sus características principales son:

- Número de canales: 2 diferenciales, 1 entrada de audio estéreo
- Resolución ADC: 16 bits
- Tasa de muestreo máxima: 200 kS / s
- Precisión de tiempo: 100 ppm de frecuencia de muestreo
- Resolución de tiempo: 10 ns

Rango

- Entrada analógica: ± 10 V, ± 2 V, acoplamiento DC
- Entrada de audio: ± 2 V, acoplamiento en CA

Banda de paso (-3 dB)

- Entrada analógica: DC a 400 kHz
- Entrada de audio: 1,5 Hz a 400 kHz

Tipo de conector

- Entrada analógica: Terminales de tornillo
- Entrada de audio: 3,5 mm conector estéreo

- Tipo de entrada (audio): Entrada de línea o micrófono
- Excitación del micrófono (entrada de audio): 5,25 V a 10 kΩ

B: Se realiza una eliminación del ruido proveniente de la fuente que provoca mediciones erróneas en el análisis de la frecuencia. En la Figura 2.25 se muestra el tren de pulsos después de filtrarlo.

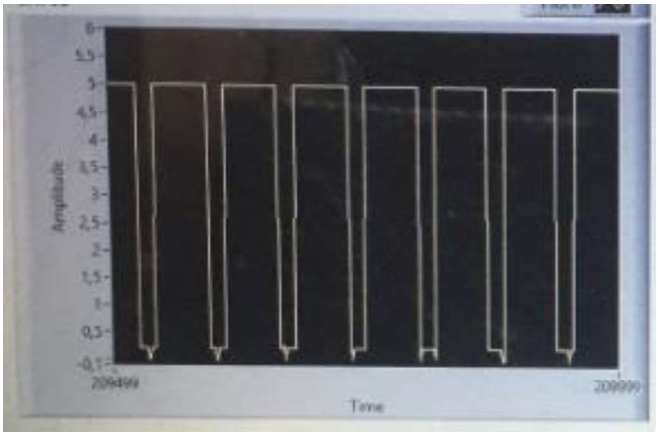


Figura 2.25 Tren de pulsos proveniente del giro de la máquina

C: Cuenta el número de pulsos que existen en 1000 ms, detecta cada pulso por flaco de bajada, entonces cada vez que cambie de estado se cuenta el pulso y se guardan los datos en un registro.

D: Para conocer la frecuencia se divide el número de pulsos almacenados para el intervalo de tiempo.

E: Se presenta la frecuencia del rotor por medio de indicadores numéricos y gráficos. Se almacena gráficamente con el bloque Write To Measurement File.

- Write To Measurement File

Los datos medidos en el gráfico se escriben en archivos de medición basados en formato texto (.lvm), archivos de medición binarios (tdm o tdms) o archivos de Microsoft Excel (.xlsx). El usuario debe configurar la forma en que se guardan estos valores y si se guardan automáticamente o se debe preguntar cada vez que se ejecute el programa.

2.3 Pruebas de la Máquina de Inducción de Rotor Bobinado Doblemente Alimentado

Para determinar los parámetros de esta máquina se ejecuta pruebas cuando la máquina funciones como máquina sincrónica y como máquina de inducción.

2.3.1 Pruebas con la DFIG Funcionando como Máquina Sincrónica

2.3.1.1 Valores Bases de la Máquina

Se selecciona y calcula los valores base para transformar los parámetros obtenidos de valores reales a valores en por unidad (p.u.) y se obtiene la impedancia base de la máquina DFIG con la Ecuación 2.21.

$$S_{base} = 480\ VA$$

$$V_{base} = 208\ V$$

$$I_{base} = 1{,}33\ A$$

$$Z_{base} = \frac{{V_{base}}^2}{S_{base}}$$

Ecuación 2.21 Cálculo de la impedancia base de la máquina

$$Z_{base} = \frac{(0{,}208)^2}{4{,}8 \times 10^{-4}} = 90{,}133\ \Omega$$

2.3.1.2 Resistencia del Estator

De igual manera como se detalla en el punto 2.2.1, se procede a calcular la resistencia en el estator.

En la Figura 2.26 se muestra la realización de dicha prueba en el devanado del estator.

Figura 2.26 Prueba de voltímetro-amperímetro en el devanado estatórico

2.3.1.3 Reactancia de Eje Directo Saturada y No Saturada

Las curvas de circuito abierto y cortocircuito muestran el comportamiento de la máquina, la primera expone la saturación del material conforme se aplica un campo magnético, y la segunda evidencia la magnitud de la corriente del generador. Los resultados obtenidos en estos ensayos permiten calcular la reactancia sincrónica no saturada.

2.3.1.3.1 Prueba de Circuito Abierto [39]

En la prueba de circuito abierto se hace girar al generador a velocidad nominal, con los bornes del estator abiertos y sin carga. Se toman valores simultáneamente de voltaje entre líneas del estator, corriente de campo y velocidad o frecuencia del motor. Las medidas deben ser tomadas considerando el procedimiento siguiente:

a) Una medida debe ser tomada sin excitar el generador, esto permite conocer el voltaje remanente del mismo.
b) Se toman seis medidas por debajo del 60% del voltaje nominal.
c) Se toman por lo menos 10 medidas cuando la máquina está girando del 60% al 110% de la velocidad nominal. Estos puntos deben incrementarse por lo mínimo cada 5%, Esta región es de suma importancia ya que es aquí donde se encuentra el codo de saturación de la máquina.
d) Por arriba del 110% se deben registrar al menos dos valores, entre ellos debe constar uno al 120% o hasta donde el fabricante haya recomendado el máximo valor de corriente de campo.

Es recomendable registrar los valores de voltaje de las tres fases con la finalidad de verificar que se encuentren equilibradas las fases. En máquinas de rotor cilíndrico es necesario consultar el voltaje o excitación máxima para realizar esta prueba, ya que hacerle girar al generador a voltajes superiores al 105% del voltaje nominal podría ocasionar calentamiento excesivo o chispas por el elevado nivel de voltaje en la estructura de soporte del núcleo. El fabricante puede recomendar la ejecución de esta prueba con un transformador en la línea para evitar sobrevoltajes.

En la Figura 2.27 y 2.28 se presentan el esquema de conexión para ejecutar la prueba de circuito abierto y su respectiva ejecución.

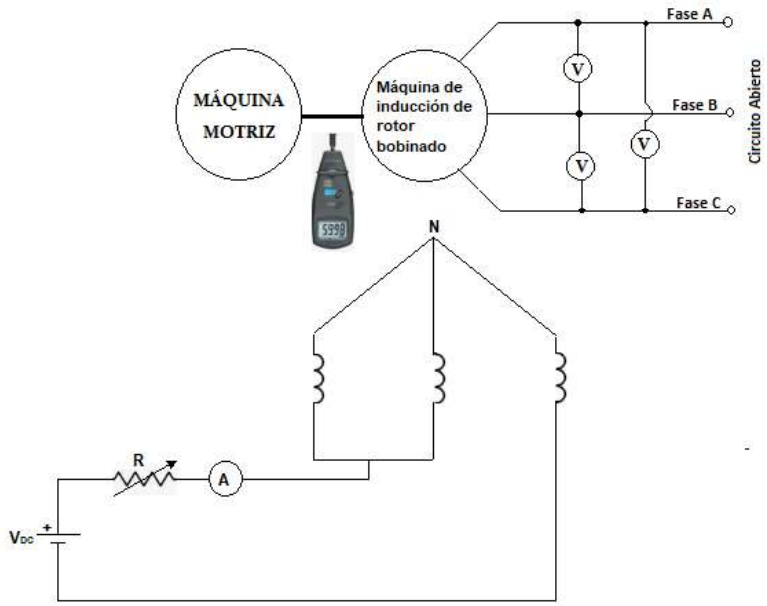


Figura 2.27 Esquema de conexión para la prueba de circuito abierto

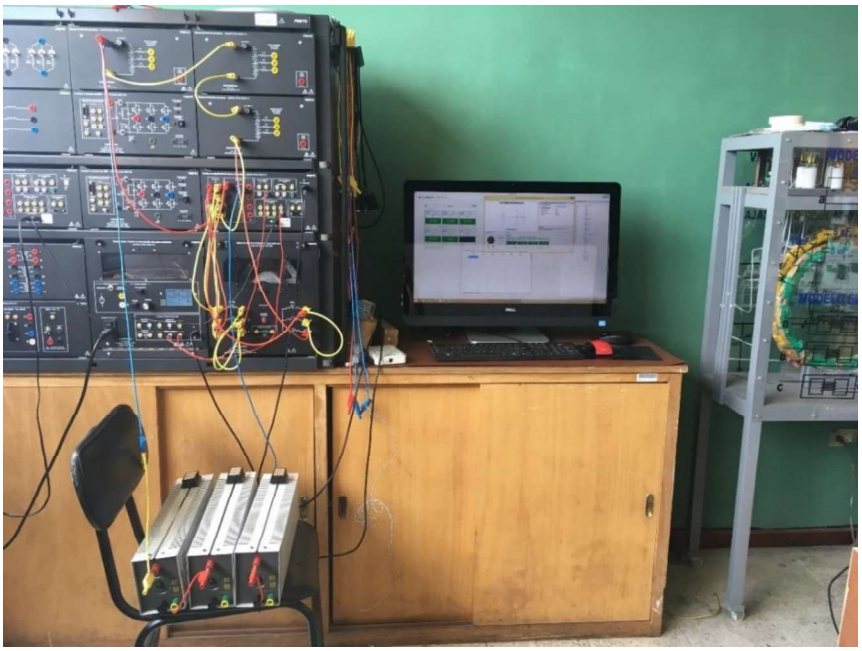


Figura 2.28 Prueba de circuito abierto

2.3.1.3.2 Prueba de Cortocircuito [39]

La curva de cortocircuito es obtenida haciéndole girar a la máquina a velocidad nominal, cortocircuitando el estator y registrando valores de las corrientes de campo y armadura. Las lecturas deben ser tomadas cuando la corriente del estator sea del 25%, 50%, 75%, 100% y 125% del valor nominal.

Las medidas deben ser tomadas de forma decreciente, es decir, empezando con el valor máximo de corriente de armadura permitido y disminuir hasta llegar al valor mínimo.

En las Figuras 2.29 y 2.30 se presentan el esquema de conexión para la prueba y su respectiva ejecución.

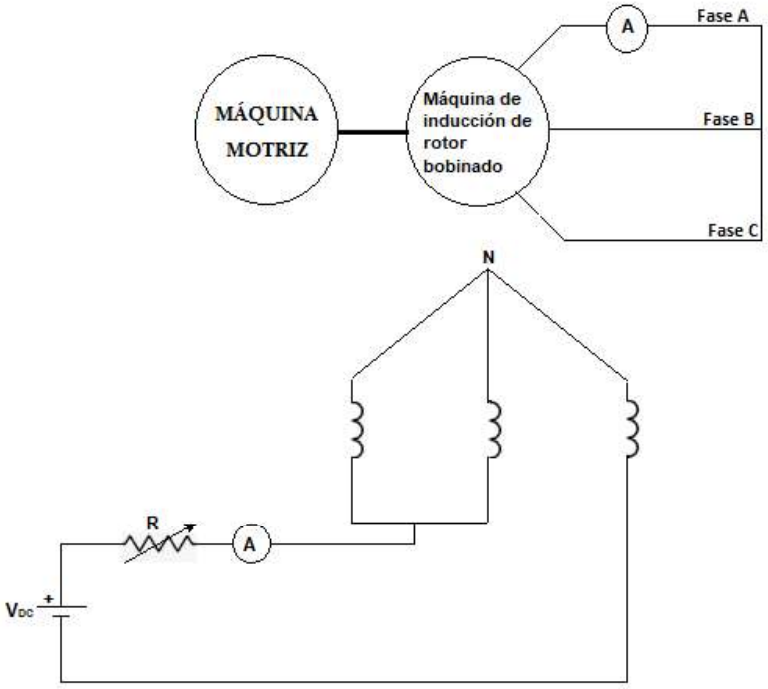


Figura 2.29 Esquema de conexión para la ejecución de la prueba de cortocircuito

Figura 2.30 Prueba de cortocircuito de la máquina DFIG

Las curvas características de las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto permiten determinar las reactancias sincrónicas saturada y no saturada presentadas en la Figura 2.31.

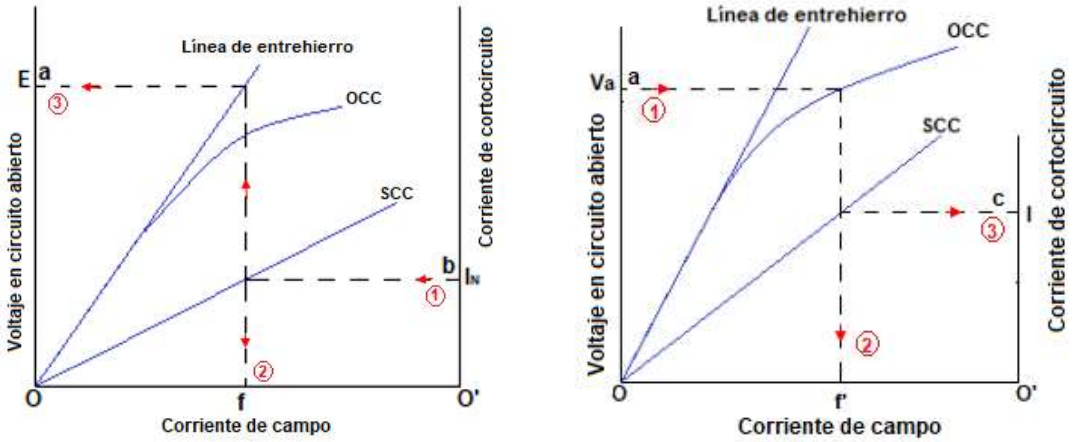


Figura 2.31 Curvas características de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito para determinar las reactancias sincrónicas no saturada y saturada

De estas curvas se puede obtener la reactancia sincrónica no saturada, relacionando el voltaje de entrehierro para la corriente de excitación de cortocircuito y la corriente de cortocircuito nominal, como se indica en la Ecuación 2.22.

$$X_{d(ns)} = \frac{\overline{Oa}}{\overline{O'b}} = \frac{E_{entrehierro}}{I_N}$$

Ecuación 2.22 Cálculo de la reactancia sincrónica no saturada

Donde:

$X_{d(ns)}$: reactancia de eje directo no saturada, en Ω

E: voltaje de fase de la línea de entrehierro, en V

I_N: corriente nominal de cortocircuito para una corriente de campo, en A

Con lo que respecta a la reactancia sincrónica saturada, se relaciona el voltaje nominal de circuito abierto con la corriente de cortocircuito para una corriente de excitación. En la Ecuación 2.23 se detalla el cálculo de esta reactancia.

$$X_{d(s)} = \frac{\overline{Oa}}{\overline{O'c}} = \frac{V_a}{I_{SC}}$$

Ecuación 2.23 Cálculo de la reactancia sincrónica saturada

Donde:

$X_{d(s)}$: reactancia de eje directo saturada, en Ω

V_a: voltaje de fase nominal de la prueba de circuito abierto, en V

I_N: corriente de cortocircuito para una corriente de campo, en A

La Ecuación 2.24 describe otra manera de calcular la reactancia sincrónica directamente, en p.u.

$$X_{d(ns)} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}}$$

Ecuación 2.24 Cálculo de la reactancia sincrónica no saturada en p.u.

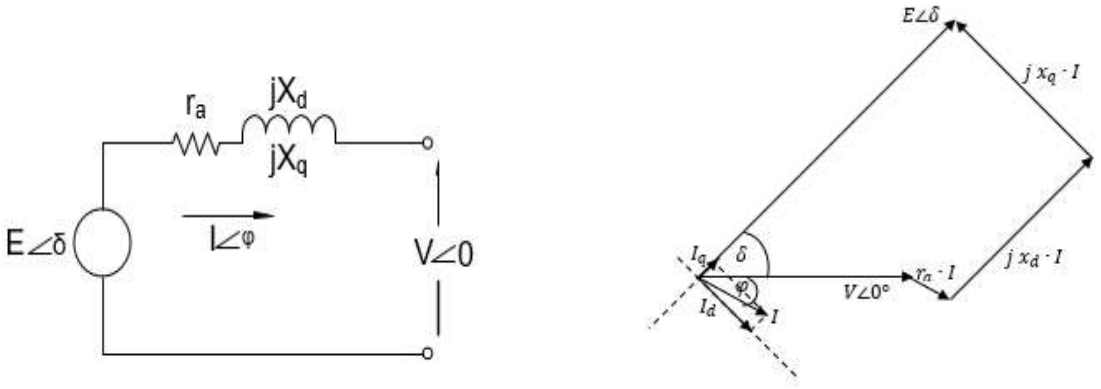
$X_{d(ns)}$: reactancia de eje directo no saturada, en p.u.

I_{FSI}: corriente de campo correspondiente a la corriente de armadura nominal en la curva de cortocircuito, en A

I_{FG}: corriente de campo correspondiente al voltaje nominal en la línea de entrehierro, en A

2.3.1.4 Reactancia de Eje de Cuadratura

Este parámetro es posible determinarlo mediante la prueba de deslizamiento, al llevarla a cabo se evidencia que el deslizamiento de la máquina es muy pequeño por lo que no es posible obtener valores exactos. Se calcula la reactancia de cuadratura a partir de la resolución del circuito y del diagrama fasorial de la Figura 2.32.



a) b)

Figura 2.32 a) Diagrama unifilar de voltajes en una máquina y **b)** Diagrama fasorial para el cálculo de X_q a partir de parámetros y datos de pruebas de laboratorio

Las expresiones para determinar las potencias activa y reactiva en los terminales del generador se presentan en las ecuaciones 2.25 y 2.26, respectivamente.

$$S = V \cdot I^*$$

$$I = I_d + I_q$$

$$I_q = \frac{V\ \operatorname{sen}\delta}{x_q}\angle\delta$$

$$I_d = \frac{E - V\ \cos\delta}{x_d}\angle(\delta - 90)$$

$$S_t = V\angle 0\ \cdot \left[\frac{E - V\ \cos\delta}{x_d}\angle(\delta - 90)\ +\ \frac{V\ \operatorname{sen}\delta}{x_q}\angle\delta\ \right]^*$$

$$S_t = V\angle 0\ \cdot \left[j\frac{E - V\ \cos\delta}{x_d}(\cos\delta - j\operatorname{sen}\delta)\ +\ \frac{V\ \operatorname{sen}\delta}{x_q}(\cos\delta - j\operatorname{sen}\delta)\right]$$

$$P_t = \frac{E \cdot V - V^2\cos\delta}{x_d}\ \operatorname{sen}\delta + \frac{V^2}{x_q}\operatorname{sen}\delta \cdot \cos\delta$$

$$P_t = \frac{E \cdot V}{x_d}\operatorname{sen}\delta + \left(-\frac{V^2}{x_d} + \frac{V^2}{x_q}\right)\frac{\operatorname{sen}2\delta}{2}$$

$$P_t = \frac{E \cdot V}{x_d}\operatorname{sen}\delta + \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\operatorname{sen}2\delta$$

Ecuación 2.25 Potencia activa en los terminales de la máquina

$$Q_t = \frac{E \cdot V - V^2\cos\delta}{x_d}\ \cos\delta - \frac{V^2}{x_q}\operatorname{sen}^2\delta$$

$$Q_t = \frac{E \cdot V}{x_d}\cos\delta + \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\cos 2\delta - \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d}\right)$$

Ecuación 2.26 Potencia reactiva en los terminales de la máquina

Las potencias activa y reactiva, calculadas en el entrehierro de la máquina, se presentan en las ecuaciones 2.27 y 2.28, respectivamente:

$$S_i = E\angle\delta \cdot (I_d + I_q)^*$$

$$S_i = E\angle\delta\ \cdot \left[\frac{E - V\ \cos\delta}{x_d}\angle(\delta - 90)\ +\ \frac{V\ \operatorname{sen}\delta}{x_q}\angle\delta\ \right]^*$$

$$S_i = \frac{E \cdot V \cdot \operatorname{sen}\delta}{x_q} + j\frac{E^2 - E \cdot V \cdot \cos\delta}{x_d}$$

$$P_i = \frac{E \cdot V}{x_q} \operatorname{sen} \delta$$

Ecuación 2.27 Potencia activa interna de la máquina

$$Q_i = \frac{E^2}{x_d} - \frac{E \cdot V}{x_d} \cos \delta$$

Ecuación 2.28 Potencia reactiva interna de la máquina

Al conectarse una carga resistiva $(Q_c = 0)$ en los terminales del circuito, se verá afectada únicamente la potencia activa, por las pérdidas ocasionadas en la resistencia de armadura al circular la corriente que va a alimentar la carga, considerando esto se tiene que las potencias activa y reactiva en los terminales del circuito están dadas por las Ecuaciones 2.29 y 2.30.

$$P_e = P_t + I^2 \cdot r_a$$

Ecuación 2.29 Potencia activa en los terminales de la máquina considerando una carga resistiva

$$Q_t = Q_c = 0$$

Ecuación 2.30 Potencia reactiva en los terminales de la máquina considerando una carga resistiva

Desarrollando la Ecuación 2.30 se obtiene una expresión para calcular la reactancia del eje de cuadratura.

$$\frac{E \cdot V}{x_d} \cos \delta + \frac{V^2}{2x_q} \cos 2\delta - \frac{V^2}{2x_d} \cos 2\delta - \frac{V^2}{2x_q} - \frac{V^2}{2x_d} = 0$$

$$\frac{E \cdot V}{x_d} \cos \delta - \frac{V^2}{2x_d} (\cos 2\delta + 1) + \frac{V^2}{2x_q} (\cos 2\delta - 1) = 0$$

$$\frac{V^2}{x_q} = \frac{\frac{V^2}{x_d} (\cos 2\delta + 1) - \frac{2 \cdot E \cdot V}{x_d} \cos \delta}{(\cos 2\delta - 1)}$$

$$\frac{1}{x_q} = \frac{V(1 + \cos 2\delta) - 2 \cdot E \cdot \cos \delta}{V \cdot x_d \cdot (\cos 2\delta - 1)}$$

$$x_q = \frac{V \cdot x_d \cdot (\cos 2\delta - 1)}{V(1 + \cos 2\delta) - 2 \cdot E \cdot \cos \delta}$$

Ecuación 2.31 Cálculo de la reactancia de cuadratura

Desarrollando la Ecuación 2.29 se obtiene una expresión para calcular el ángulo delta.

$$\frac{E \cdot V}{x_q} \operatorname{sen} \delta = \frac{E \cdot V}{x_d} \operatorname{sen} \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \operatorname{sen} 2\delta + I^2 \cdot r_a$$

$$E \cdot V \cdot \operatorname{sen}\delta\left(\frac{1}{x_q}-\frac{1}{x_d}\right)-\frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{x_q}-\frac{1}{x_d}\right)\operatorname{sen}2\delta - I^2 \cdot r_a = 0$$

$$\left(\frac{1}{x_q}-\frac{1}{x_d}\right)\left(E \cdot V \cdot \operatorname{sen}\delta - \frac{V^2}{2}\cdot \operatorname{sen}2\delta\right) - I^2 \cdot r_a = 0$$

Como x_q ya es encontrada de la Ecuación 2.31, se remplaza su valor en

$$\frac{1}{x_d}\left(\frac{V(1+\cos 2\delta) - 2 \cdot E \cdot \cos\delta}{V(\cos 2\delta - 1)} - 1\right)\left(E \cdot V \cdot \operatorname{sen}\delta - \frac{V^2}{2}\cdot \operatorname{sen}2\delta\right) - I^2 \cdot r_a = 0$$

Ecuación 2.32 Cálculo del ángulo delta a partir de la reactancia de cuadratura

2.3.1.5 Reactancias Sincrónicas de Eje Directo Subtransitoria y Transitoria

La norma IEEE Std. 115 describe el procedimiento para calcular las reactancias sincrónicas subtransitoria y transitoria a partir del oscilograma de corriente, obtenido de la prueba de cortocircuito trifásico súbito detallado en 2.2.4.4. En la Figura 2.33 se observan cuatro componentes, la curva B representa la componente alterna total disminuida de la componente estable. La línea C es la extensión de la curva B hasta llegar al cruce por cero. La curva A resulta de la diferencia entre la curva B y la línea C. La línea D es la extensión de la curva A hasta llegar al cruce por cero.

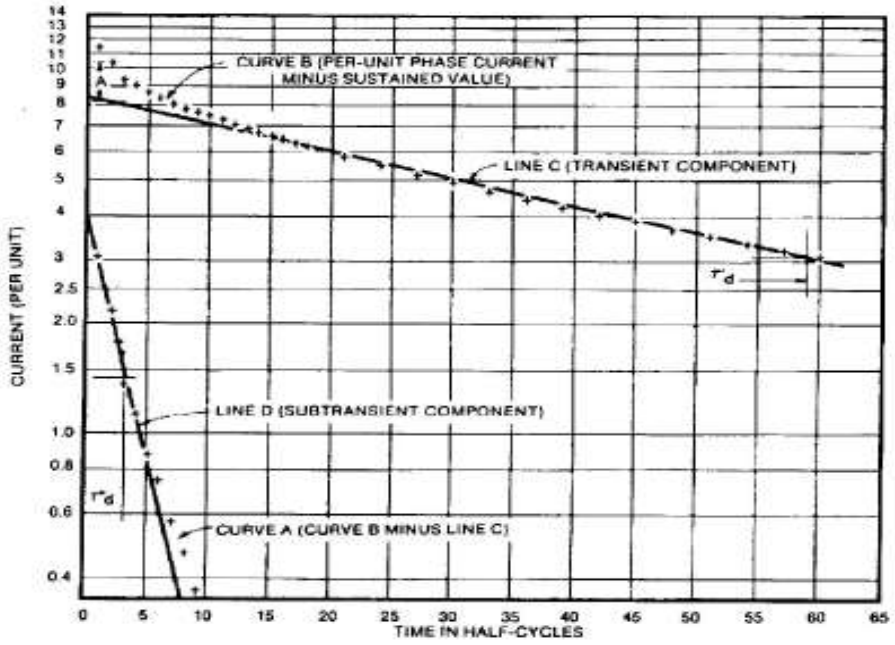


Figura 2.33 Análisis de la corriente de cortocircuito trifásico súbito [39]

La línea C es la componente transitoria inicial, mientras que la línea D proporciona el valor de la componente subtransitoria inicial. La suma de las componentes estable y transitoria inicial proporcionan el valor correspondiente a I'. La suma de la componente estable, la

componente transitoria inicial y la componente subtransitoria inicial proporcionan el valor correspondiente a I'' [39].

Para prevenir la integridad mecánica y eléctrica de la máquina, la prueba no debe repetirse en muchas ocasiones. Se realiza una prueba a un 50% del voltaje nominal, para conocer si los conductores y la máquina soportan esta falla. Una vez comprobado, se ejecuta la prueba.

En la Figura 2.34 se muestra la instrumentación para la ejecución de la prueba de cortocircuito trifásico súbito.

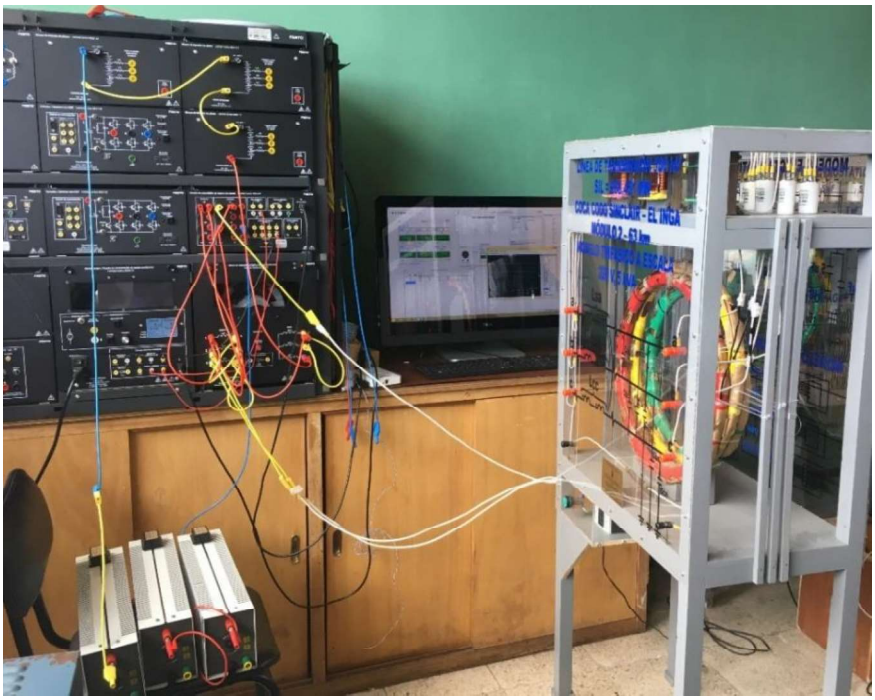


Figura 2.34 Prueba de cortocircuito trifásico súbito

2.3.1.6 Constantes de Tiempo de Cortocircuito de Eje Directo [39]

Para determinar las constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo se utiliza la Figura 2.33. El tiempo transitorio de cortocircuito t'_d es aquel que se demora la componente transitoria inicial (línea C) en decrecer a 0,368 veces.

La constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito t''_d es aquel que se demora la componente subtransitoria inicial (línea D) en decrecer a 0,368 veces. Los tiempos están expresados en segundos.

2.3.1.7 Constantes de Tiempo de Circuito Abierto de Eje Directo

Las constantes de tiempo de circuito abierto subtransitorio t''_{do} y transitorio t'_{do} se determinan mediante la prueba de recuperación de voltaje. Se registran oscilogramas del voltaje, una vez despejado el cortocircuito trifásico súbito.

Se realiza una gráfica similar a la Figura 2.33 para el análisis del voltaje de recuperación. La curva B es el resultado de la diferencia entre la envolvente de la curva de recuperación de voltaje y la componente estacionaria. La línea C es la prolongación de la curva B hasta el cruce por cero. La curva A proviene de la diferencia entre la curva B y la línea C. La línea D es la prolongación de la curva A hasta el cruce por cero.

Al graficar estas cuatro componentes, el tiempo t''_{do} es el tiempo, en segundos, que tarda en decrecer la línea D a 0,368 veces. La componente t'_{do} es el tiempo, en segundos, que tarda en decrecer la componente inicial transitoria a 0,368 veces.

2.3.1.8 Prueba de Cortocircuito Bifásico Súbito

La reactancia subtrasitoria de eje de cuadratura se obtiene de la prueba de cortocircuito bifásico súbito. Se realiza con la máquina girando a velocidad y voltaje nominales, y se cortocircuitan dos fases súbitamente. El análisis de la corriente de falla obtenida y las precauciones a considerar son las mismas que las del cortocircuito trifásico súbito. El esquema de conexión y su correspondiente ejecución se presentan en las Figuras 2.35 y 2.36, respectivamente.

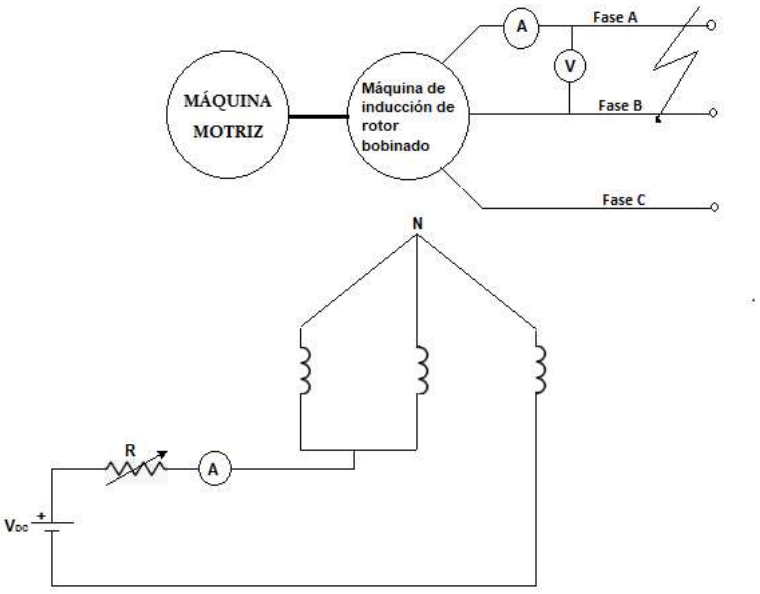


Figura 2.35 Esquema de la prueba de cortocircuito súbito bifásico

Figura 2.36 Prueba de cortocircuito bifásico súbito

Con la prueba de cortocircuito trifásico súbito se obtiene la reactancia subtransitoria de eje directo, asignada como X''_{d3}.

De la prueba de cortocircuito bifásico súbito se consideran el voltaje previo a la falla E y la corriente subtransitoria inicial I'' necesarios para calcular la reactancia X_{LL} presentada en la Ecuación 2.33.

$$X_{LL} = \frac{\sqrt{3}\,E}{I''}$$

Ecuación 2.33 Cálculo de la reactancia de cortocircuito bifásico súbito monofásico [39]

La reactancia subtransitoria de eje de cuadratura es obtenida con la Ecuación 2.34.

$$X''_{q} = \frac{(X_{LL} - X''_{d3})^2}{X''_{d3}}$$

Ecuación 2.34 Cálculo de X''_q [39]

2.3.1.9 Reactancia de Secuencia Negativa

Para encontrar el valor de la reactancia de secuencia negativa se realiza la prueba de cortocircuito bifásico sostenido, que consiste en hacer girar a la máquina a velocidad nominal, cortocircuitando dos fases. Se toma valores de voltaje, corriente de armadura y potencia conforme se incrementa la corriente de campo. Al superar la corriente nominal de armadura, el rotor puede sobrecalentarse, por ello se realiza rápidamente la prueba y una vez registrados los valores se desconecta la corriente de campo. Los equipos de medición

se ubican como se indican en la Figura 2.37. Si la máquina es muy robusta o la escala de los equipos es pequeña se usan transformadores de voltaje y corriente, si se sobrecalienta el rotor se detiene la prueba inmediatamente [39]. En la Figura 2.38 se presenta la realización de la prueba.

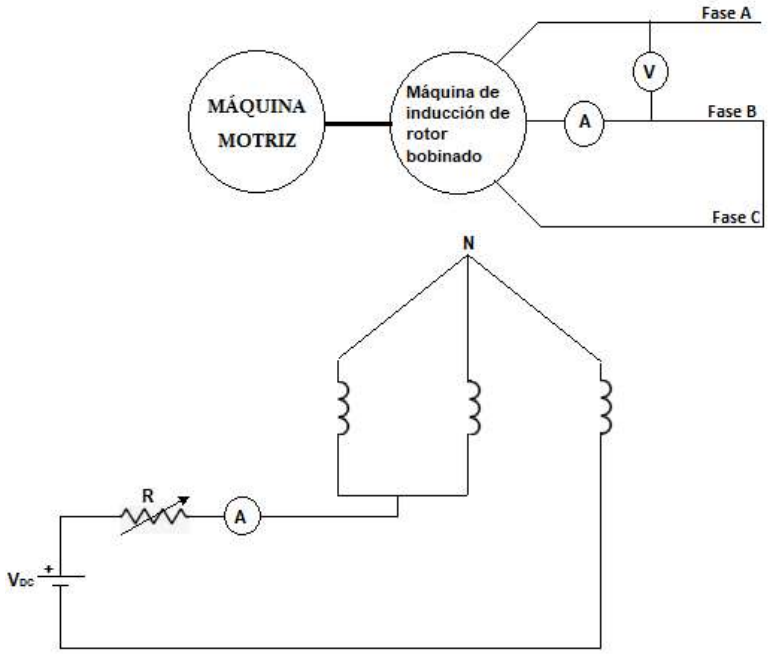


Figura 2.37 Diagrama de conexión para la determinación de la reactancia negativa

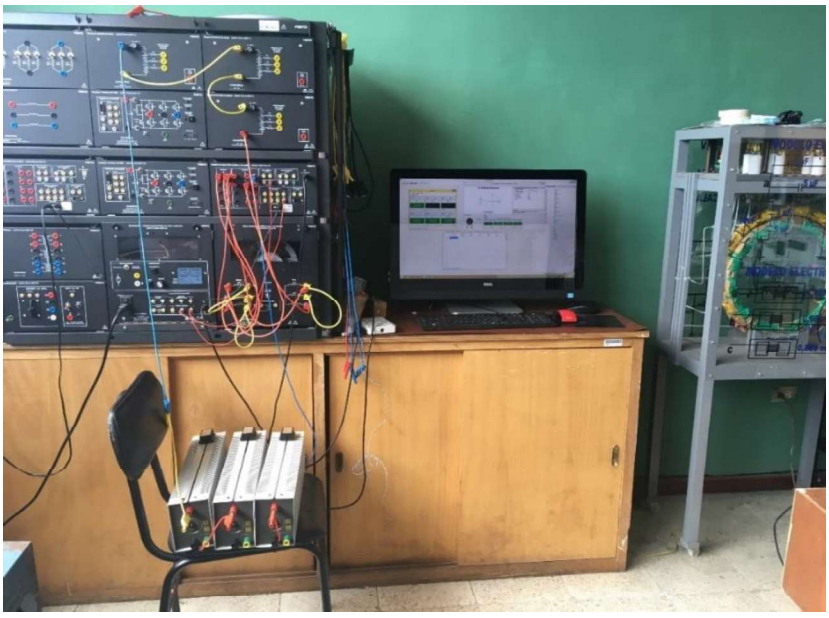


Figura 2.38 Prueba de cortocircuito bifásico sostenido

La impedancia de secuencia negativa en p.u se calcula usando la Ecuación 2.35.

$$Z_{2(L-L)} = \frac{E}{I}$$

Ecuación 2.35 Cálculo de la impedancia de secuencia negativa [39]

Donde:

E: voltaje línea–línea, en p.u.

I: corriente de línea, en p.u.

La reactancia de secuencia negativa en p.u. se calcula usando la Ecuación 2.36.

$$X_{2\,(L-L)} = \frac{P_{v-a}}{\sqrt{3} \cdot E \cdot I} \cdot Z_{2(L-L)}$$

Ecuación 2.36 Cálculo de la reactancia de secuencia negativa [39]

Donde,

P_{v-a}: potencia monofásica, en p.u.

La corrección de la reactancia de secuencia negativa se obtiene aplicando la Ecuación 2.37. El valor de X''_d es el encontrado en la prueba de cortocircuito trifásico súbito.

$$X_2 = \frac{X_{2(L-L)}^2 + (X''_d)^2}{2X''_d}$$

Ecuación 2.37 Corrección de la reactancia de secuencia negativa [39]

2.3.1.10 Reactancia de Secuencia Cero

Para conocer el valor de la reactancia de secuencia cero se ejecuta la prueba de circuito en paralelo. Consiste en cortocircuitar el campo y conectar las tres fases del estator en paralelo, a una fuente monofásica de voltaje alterno variable entre los terminales de línea y neutro como se observa en la Figura 2.39. Se obtienen los mismos resultados bloqueando el rotor, pero existe el riesgo que el calentamiento de la máquina sea excesivo. Es importante indicar una de las dos condiciones con que se realiza la prueba. Se aumenta el voltaje hasta que la corriente sea tres veces la corriente nominal y se toman valores de voltaje, corriente y potencia, posteriormente se aplica la Ecuación 2.38 para obtener la reactancia de secuencia cero [39].

$$Z_0 = \frac{3E}{I}$$

$$X_0 = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{P}{IE}\right)^2}$$

Ecuación 2.38 Cálculo de la reactancia de secuencia cero [39]

Donde:

E: voltaje de fase, en p.u.

I: corriente total de línea, en p.u.

P: potencia monofásica, en p.u.

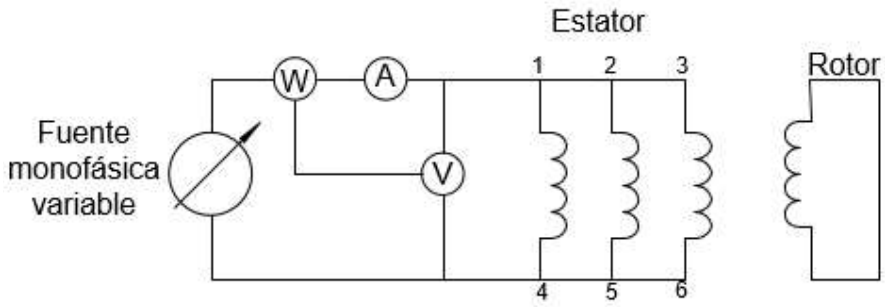


Figura 2.39 Circuito para determinar la reactancia de secuencia cero

2.3.1.11 Coeficiente de Amortiguamiento

Para determinar la constante de amortiguamiento se realizan las pruebas de rechazo de carga y pérdida de fuerza electromotriz.

2.3.1.11.1 Prueba de Rechazo de Carga

La prueba de rechazo de carga consiste en conectar carga puramente resistiva en los bornes de la máquina, haciéndola girar a velocidad nominal. Se registra el valor de potencia previa a la desconexión. Cuando se desconecta la carga, la frecuencia aumenta hasta que los dispositivos de control vuelvan a la máquina a una frecuencia cercana a la nominal.

De la prueba se obtiene una curva como la que se presenta en la Figura 2.40.

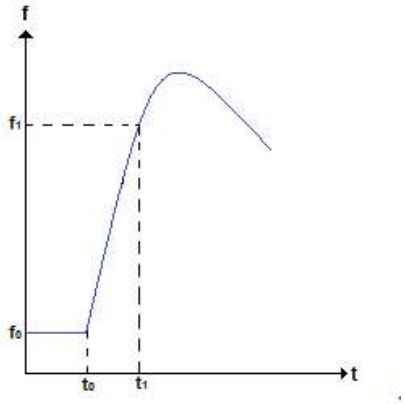


Figura 2.40 Frecuencia de la máquina ante un rechazo de carga

Se trabaja en la parte lineal de la curva. La constante de inercia se determina a partir de la ecuación de oscilación, sin considerar el amortiguamiento, y de la prueba de rechazo de carga.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2 \cdot H}(P_m - P_e)$$

Ecuación 2.39 Ecuación de oscilación

$$\frac{d(2\pi \cdot f)}{dt} = \frac{2\pi \cdot f_o}{2 \cdot H}(P_m - P_e)$$

$$H = \frac{f_o}{2 \cdot \frac{df}{dt}}(P_m - P_e)$$

Aproximando la derivada de la frecuencia a su variación, en el tiempo donde la respuesta es lineal, resulta la Ecuación 2.40.

$$\frac{df}{dt} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t}$$

$$H = \frac{\Delta t \cdot f_o}{2 \cdot \Delta f}(P_m - P_e)$$

Ecuación 2.40 Cálculo de la constante de inercia

Donde:

H: constante de inercia, en s

P_m: potencia mecánica de la máquina previo a la desconexión de la carga, en p.u.

P_e: potencia eléctrica de la máquina previo a la desconexión de la carga, en p.u.

Δf: variación de la frecuencia durante la prueba, en Hz

f_o: frecuencia sincrónica de la máquina, en Hz

Δt: variación de tiempo durante la prueba, en s

2.3.1.11.2 Pérdida de Fuerza Electromotriz

La pérdida de fuerza electromotriz consiste en hacer girar a la máquina a velocidad y frecuencia nominales. Al desconectar la alimentación, la máquina se frena paulatinamente. Se toma el tiempo desde la desconexión hasta que su velocidad llega al 5% del valor nominal, como se muestra en la Figura 2.41.

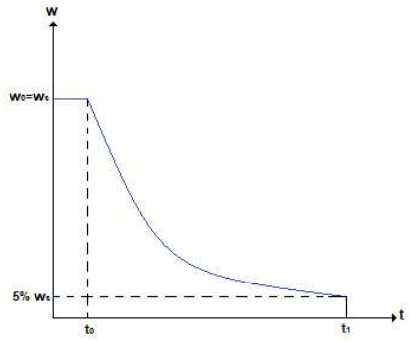


Figura 2.41 Velocidad angular de la máquina frente a la prueba de pérdida de fuerza electromotriz

El coeficiente de amortiguamiento se determina de la ecuación de oscilación a partir de la prueba de pérdida de fuerza electromotriz.

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} + D\omega = (P_m - P_e)$$

Ecuación 2.41 Ecuación de oscilación considerando el amortiguamiento

Como el generador opera en vacío y su fuerza mecánica se pierde, la Ecuación 2.41 resulta.

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} + D\omega = 0$$

Resolviendo la ecuación diferencial de primer orden se tiene la velocidad angular de la Ecuación 2.42 y la constante de tiempo de la Ecuación 2.43.

$$\int \frac{d\omega}{\omega} = \int \frac{\omega_s}{2H} \cdot D \cdot dt$$

$$\ln(\omega) \Big|_{\omega_0}^{\omega_1} = -\frac{\omega_s}{2H} \cdot D \cdot t \Big|_0^t$$

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot e^{-\frac{\omega_s}{2H} \cdot D \cdot t}$$

Ecuación 2.42 Desarrollo de la ecuación de oscilación para la prueba de pérdida de fem

$$\tau = \frac{2 \cdot H}{\omega_s \cdot D}$$

Ecuación 2.43 Constante de tiempo τ

Cuando ω_1 es el 5% de ω_0 y se reemplaza en la Ecuación 2.42, resulta que $\Delta t = 3 \cdot \tau$, se tiene el coeficiente de amortiguamiento de la Ecuación 2.44.

$$D = \frac{6 \cdot H}{\Delta t}$$

Ecuación 2.44 Cálculo del coeficiente de amortiguamiento

Donde:

D: coeficiente de amortiguamiento, en $\frac{\text{p.u.W}}{\text{p.u.}\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$

H: constante de inercia, en s

ω_s: velocidad angular sincrónica de la máquina, igual a 1 p.u.

ω_1: velocidad angular de la máquina al tiempo t_1

ω_0: velocidad angular inicial de la máquina al tiempo t_0

Δt: tiempo que tarda la velocidad angular en decrecer desde t_0 a t_1

2.3.2 Pruebas con la DFIG Funcionando como Motor de Inducción

2.3.2.1 Prueba en Vacío

La prueba en vacío se realiza haciendo girar al motor a velocidad y voltaje nominales y sin carga en sus terminales. Se registran valores de voltaje, corriente y potencia. En la Figura 2.42 se presenta el esquema a implementar en esta prueba [40].

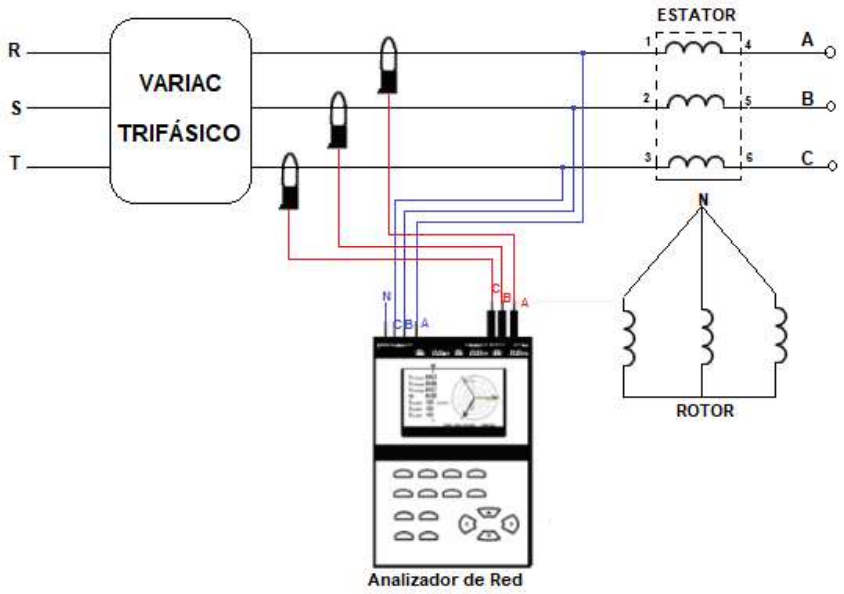


Figura 2.42 Esquema de conexión para la prueba de vacío

Al hacer girar a la máquina en circuito abierto, su velocidad es similar a la de sincronismo ($s = 0$), con lo que la corriente que circula por el parámetro $\frac{R'_2}{s}$ es despreciable. En la Figura 2.43 se presenta el circuito equivalente.

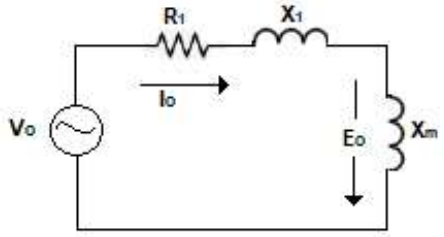


Figura 2.43 Circuito equivalente de la prueba de circuito abierto

Como la corriente necesaria para producir un campo magnético es grande en el motor de inducción, X_M es pequeña en comparación a R_1 y el factor de potencia también es pequeño. La ecuación resultante del circuito equivalente se presenta en la Ecuación 2.45.

$$\mathrm{E_o} = \mathrm{V_o} - \mathrm{I_o}(R_1 + jX_1)$$

Ecuación 2.45 Voltaje interno en la prueba de circuito abierto de la DFIG

El cálculo de la reactancia de magnetización se detalla en la Ecuación 2.46.

$$\mathrm{X_m} = \frac{\mathrm{E_o}}{\mathrm{I_o}} - \mathrm{R_1}$$

Ecuación 2.46 Cálculo de la reactancia de magnetización

2.3.2.2 Prueba de Rotor Bloqueado

Para la prueba de rotor bloqueado se sostiene el eje del rotor evitando que gire libremente, se incrementa la corriente en pequeños pasos hasta llegar a la corriente nominal. Se registran valores de voltaje, corriente y potencia. Es importante considerar que al ser una máquina de inducción con rotor bobinado, la impedancia varía dependiendo de la posición del rotor con respecto al estator, por ello, la impedancia calculada es un valor promedio de su impedancia [40]. En la Figura 2.44 se presenta la instrumentación requerida para la prueba de rotor bloqueado.

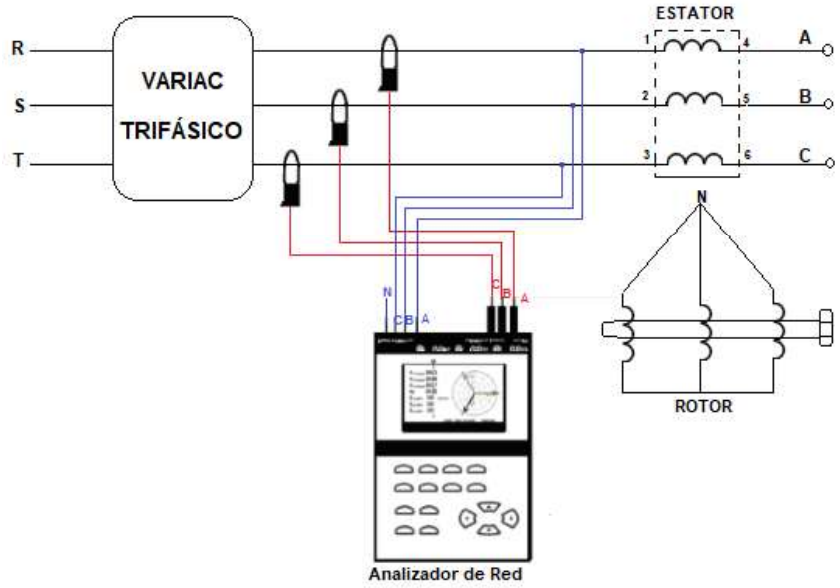


Figura 2.44 Esquema de conexión para la prueba de rotor bloqueado

Una vez obtenidos los valores, se calcula las reactancias X_1 y X_2 con las Ecuaciones 2.47, 2.48 y 2.49.

$$R_{rb} = \frac{P_{rb}}{3.I_{rb}^2}$$

Ecuación 2.47 Resistencia de rotor bloqueado

$$Z_{rb} = \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} \cdot I_{rb}}$$

Ecuación 2.48 Impedancia de rotor bloqueado

$$X_{rb} = \sqrt{Z_{rb}^2 - R_{rb}^2} = X_1 + X_2$$

Ecuación 2.49 Reactancia de rotor boqueado

La relación entre las reactancias X_1 y X_2 dependen de la clase del rotor y se presenta en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Relaciones de X_1 y X_2, dependiendo de la clase del motor

Motores Diseño	**A**	**B**	**C**	**D**	**Rotor Devanado**
Relación $\frac{X_1}{X_2}$	1	2/3	3/7	1	1

2.3.2.3 Resistencia del Rotor

Para determinar la resistencia del rotor se ejecuta la prueba de deslizamiento reducido. Se realiza con la máquina desacoplada o acoplada a una carga reducida, a un voltaje que proporcione el deslizamiento a plena carga. Se registran valores de corriente, velocidad, voltaje y potencia. Se aplican las ecuaciones de magnitud y ángulo del voltaje del rotor, corriente de magnetización, corriente de las pérdidas en el núcleo, corriente de carga en el rotor e impedancia del rotor, detalladas en la Ecuación 2.50, para determinar la resistencia R_2 [40].

$$V_2 = \sqrt{[V_1 - I_1(X_1 \operatorname{sen}\theta_1 \pm R_1 \cos\theta_1)]^2 + [I_1(X_1 \cos\theta_1 \mp R_1 \operatorname{sen}\theta_1)]^2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\frac{I_1(X_1 \cos\theta_1 \mp R_1 \operatorname{sen}\theta_1)}{V_1 - I_1(X_1 \operatorname{sen}\theta_1 \pm R_1 \cos\theta_1)}$$

$$I_{fe} = \frac{\frac{P}{m}}{V_2}$$

$$I_e = \frac{V_2}{X_m}$$

$$I_2 = \sqrt{(I_1 \cos\theta_1 + I_e \operatorname{sen}\theta_2 \mp I_{fe} \cos\theta_2)^2 + (I_1 \operatorname{sen}\theta_1 - I_e \cos\theta_2 \pm I_{fe} \operatorname{sen}\theta_2)^2}$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{(Z_2)^2 - (X_2)^2}$$

Ecuación 2.50 Cálculo de la resistencia del rotor en función del deslizamiento

Donde:

V_1: voltaje de la prueba de voltaje reducido, en V

I_1: corriente de la prueba de voltaje reducido, en A

P: potencia de la prueba de voltaje reducido, en W

I_{fe}: corriente de las pérdidas en el núcleo, en A

I_e: corriente de magnetización, en A

m: número de fases

I_2: corriente del rotor referida al estator, en A

V_2: voltaje del rotor referido al estator, en V

Conocida la velocidad medida se calcula el deslizamiento correspondiente a la prueba de voltaje reducido en p.u., al multiplicarlo por la Ecuación 2.50 se tiene el valor de R_2.

2.3.3 Obtención de Parámetros de la Máquina a partir de los Datos de Catálogo

A partir de los datos proporcionados por el fabricante se desarrolla ecuaciones no lineales con varias incógnitas que serán resueltos por medio del método de Newton-Raphson y la función fsolve de Matlab, con la finalidad de encontrar una aproximación más exacta a la solución de dichas ecuaciones. Esta metodología no pudo llevarse a cabo por la falta de datos proporcionados por el fabricante como la corriente de arranque, torque de arranque, que dificulta el desarrollo del sistema de ecuaciones. De igual manera, se consultó fuentes bibliográficas con la finalidad de encontrar datos que se podrían aproximar a la máquina en estudio, no encontrándose la información requerida.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes

3.1.1 Valores Bases

De las mediciones realizadas se calcula la potencia aparente de la PMSM con la Ecuación 3.1, que se considera como su base y la impedancia base con la Ecuación 2.21.

$$S = \sqrt{3} * V_L * I$$

Ecuación 3.1 Cálculo de la potencia aparente de la máquina PMSM

$$S = \sqrt{3} * 60{,}047 * 3 = 312.013 \text{ VA} \approx 312 \text{ VA}$$

$$Z_B = \frac{(0{,}060047)^2}{3{,}12 \times 10^{-4}} = 11{,}557\ \Omega$$

3.1.2 Resistencia de Armadura

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos del método voltímetro-amperímetro, llevados a cabo con la fuente de alimentación DC existente en el módulo.

Tabla 3.1 Resultados medidos con el método del voltímetro-amperímetro

	V [V]	I [A]	P [W]	R_{dc} [Ω]
UV	3,35	1,164	3,901	2,878
VW	3,352	1,168	3,915	2,870
UW	3,34	1,168	3,902	2,860
			Promedio	2,869

Al tener la configuración en estrella se divide para dos la resistencia obtenida en la prueba.

$$R_{l-l} = 2{,}869\ [\Omega]$$

$$R_{p/fase} = \frac{2{,}869}{2} = 1{,}435\ [\Omega] = 0{,}1242 \text{ p.u.}$$

3.1.3 Flujo Magnético

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados de voltaje y frecuencia medidos en la prueba de circuito abierto y a partir de estos valores se grafica la recta presentada en la Figura 3.1.

Tabla 3.2 Datos obtenidos de la prueba de circuito abierto

Velocidad [r.p.m.]	Voltaje UV	Voltaje VW	Voltaje WA	Vprom (fase)	Frecuencia [Hz]	Flujo [Vs]
214	2,198	2,166	2,193	1,262	10,84	0,02669
406	4,103	4,112	4,117	2,373	20,28	0,02631
630	6,322	6,308	6,315	3,646	31,19	0,02605
812	8,363	8,361	8,37	4,829	41,24	0,02677
1014	10,34	10,33	10,33	5,966	50,94	0,05618
1208	12,3	12,29	12,29	7,098	60,57	0,02645
1404	14,25	14,25	14,24	8,225	70,2	0,02637
1618	16,58	16,57	16,38	9,532	80,75	0,02652
1802	18,45	18,44	18,44	10,648	90,86	0,02660
2016	20,52	20,5	20,48	11,836	101	0,02643
2204	22,41	22,38	22,37	12,925	110,3	0,02640
2400	24,39	24,36	24,36	14,070	120,1	0,02639
2630	26,73	26,7	26,7	15,421	131,6	0,02640
2796	28,55	28,52	28,53	16,474	140,6	0,02652
3004	30,52	30,51	30,49	17,613	150,3	0,02639
3212	32,63	32,61	32,6	18,829	160,7	0,02639
3404	34,58	34,54	34,53	19,947	170,3	0,02638
3600	36,55	36,53	36,51	21,091	180	0,02637
3826	38,87	38,82	38,8	22,419	191,5	0,02638
4012	40,81	40,8	40,78	23,554	201,2	0,02643
4214	42,76	42,73	42,71	24,672	210,8	0,02636
4404	44,72	44,69	44,67	25,804	220,5	0,02638
4598	46,74	46,72	46,68	26,970	230,5	0,02640
4734	47,96	47,93	47,91	27,674	236,7	0,02632
5014	50,4	50,3	50,4	29,079	250,9	0,02611
5208	52,28	52,18	52,27	30,163	260,4	0,02607
5390	53,99	53,92	53,99	31,158	269,2	0,02602
5632	56,56	56,42	56,5	32,616	282,1	0,02607
5816	58,39	58,31	58,39	33,696	291,3	0,02608
6000	60,08	60,04	60,02	34,668	300	0,02601
					Promedio	0,02734

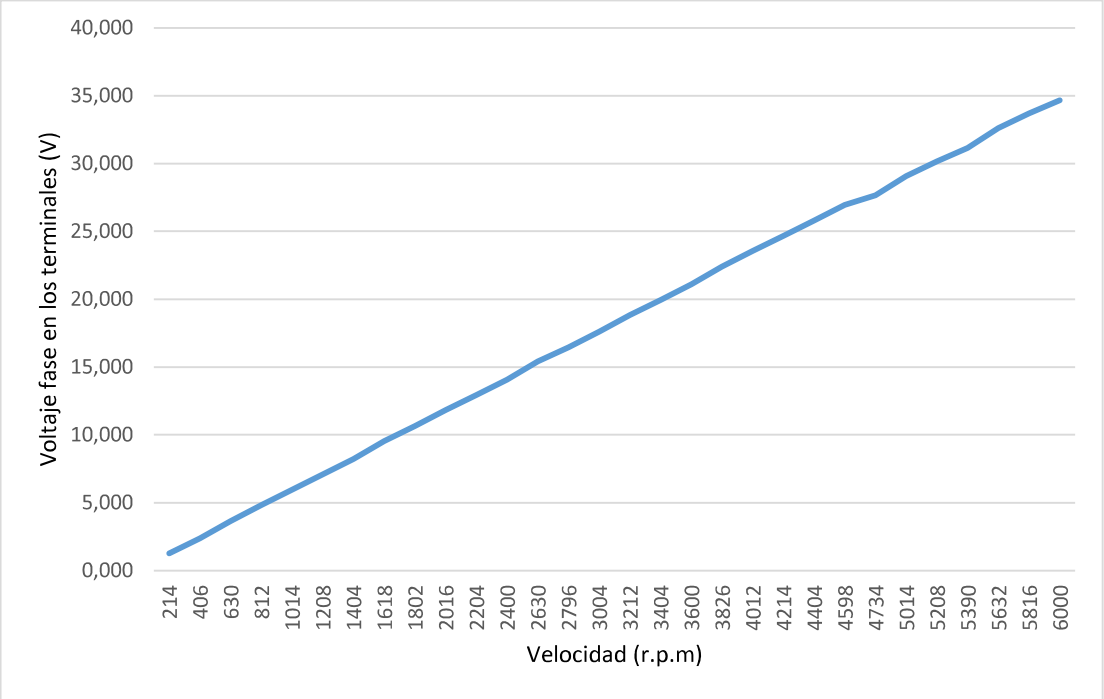


Figura 3.1 Grafica Voltaje vs Velocidad de la prueba de circuito abierto

Aplicando la Ecuación 2.1 resulta que el flujo magnético es:

$$\varphi = 0{,}05589 \text{ Vs}$$

De la Tabla 3.2 se determina que la frecuencia nominal de la máquina es 300 Hz.

3.1.4 Número de Polos

Las mediciones de velocidad mecánica y frecuencia angular obtenidas de la prueba de circuito abierto se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores de velocidad mecánica y frecuencia angular

Velocidad mecánica [rad/s]	Frecuencia angular eléctrica [rad/s]	Número de polos
22,410	68,110	6,079
42,516	127,423	5,994
65,973	195,973	5,941
85,032	259,119	6,095
106,186	320,065	6,028
126,501	380,573	6,017
147,027	441,080	6,000
169,437	507,367	5,989
188,705	570,890	6,051
211,115	634,602	6,012

230,802	693,035	6,005
251,327	754,611	6,005
275,413	826,867	6,005
292,796	883,416	6,034
314,578	944,363	6,004
336,360	1009,708	6,004
356,466	1070,026	6,004
376,991	1130,973	6,000
400,658	1203,230	6,006
420,136	1264,177	6,018
441,289	1324,495	6,003
461,186	1385,442	6,008
481,501	1448,274	6,016
495,743	1487,230	6,000
525,065	1576,451	6,005
545,380	1636,141	6,000
564,439	1691,433	5,993
589,782	1772,487	6,011
609,050	1830,292	6,010
628,319	1884,956	6,000
	Promedio	6,011

El número estimado de polos es 6. Se comprueba mediante la Ecuación 1.1.

$$\mathrm{n} = \frac{120 \cdot 300}{6} = 6000\ \mathrm{r.p.m.}$$

3.1.5 Reactancias en Ejes Directo y de Cuadratura

3.1.5.1 Prueba con Carga

La prueba se realiza con un banco de cargas resistivas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas. Se midieron los valores de corriente, velocidad y voltaje mostrados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Recopilación de datos de la prueba con carga

Velocidad [r.p.m.]	V1	V2	V3	I1	I2	I3	Iprom	Frecuencia [Hz]
5934	57,84	57,81	57,63	0,35	0,356	0,356	0,354	296,7
5772	55,39	55,33	55,19	0,684	0,695	0,691	0,69	289,7
5518	51,68	51,64	51,52	0,968	0,979	0,972	0,973	276,1

De la Figura 3.1 se puede estimar los valores de voltaje interno correspondientes a las velocidades medidas en esta prueba y se determina la reactancia sincrónica con la Ecuación 2.3. Los resultados se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados obtenidos de la prueba con carga

Velocidad [r.p.m.]	E (fase)	Vprom	ΔV	Rs	Xs (fase)	Ls [H]	X_S [Ω]
5934	34,287	33,348	2,6521	1,435	2,2304	0,0011964	2,255
5772	33,728	31,929	2,6068		2,1763	0,0011956	2,254
5518	32,311	29,799	2,5813		2,1457	0,0012369	2,331
				Promedio	2,1841	0,0012096	2,280

$$X_s = 2{,}280\ \Omega = 0{,}197\ \text{p.u.}$$

3.1.5.2 Medidor RLC

Para esta prueba se emplean dos medidores RLC, uno existente en el Laboratorio de Alta Frecuencia y otro perteneciente al Ingeniero Patricio Chico. En la Tabla 3.6 se presentan sus respectivas mediciones.

Tabla 3.6 Valores medidos con el medidor RLC del Laboratorio de Alta Frecuencia

Equipo RLC (Lab. Alta Frecuencia)					
PMSM					
60 Hz	L-L		Fase		
	Rs [Ω]	L [mH]	Rs [ohm]	L [mH]	X_S [Ω]
U-V	2,775	3,569	1,3875	1,7845	3,364
V-W	2,709	3,4635	1,3545	1,73175	3,264
U-W	2,657	3,382	1,3285	1,691	3,187
Promedio	2,714	3,472	1,357	1,736	3,272
300 Hz	L-L		Fase		
	Rs [Ω]	L [mH]	Rs [ohm]	L [mH]	X_S [Ω]
U-V	2,927	3,5922	1,4635	1,7961	3,386
V-W	2,852	3,4412	1,426	1,7206	3,243
U-W	2,792	3,3556	1,396	1,6778	3,163
Promedio	2,857	3,463	1,4285	1,7315	3,264

$$X_s = 3{,}264\ \Omega = 0{,}2824\ \text{p.u.}$$

Tabla 3.7 Valores medidos con el medidor RLC del Ing. Patricio Chico

Medidor de Inductancia (Ing. Chico)			
60 Hz	L-L	Fase	
	L [mH]	L [mH]	X_S [Ω]
U-V	3,518	1,759	3,3156
V-W	3,369	1,6845	3,1752
U-W	3,283	1,6415	3,0942
Promedio	3,390	1,695	3,1950

$$X_s = 3{,}195\ \Omega = 0{,}2765\ \text{p.u.}$$

3.1.5.3 Voltaje de Paso Aplicado a los Bornes

En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de voltaje de paso para las inductancias de eje directo y de cuadratura, respectivamente.

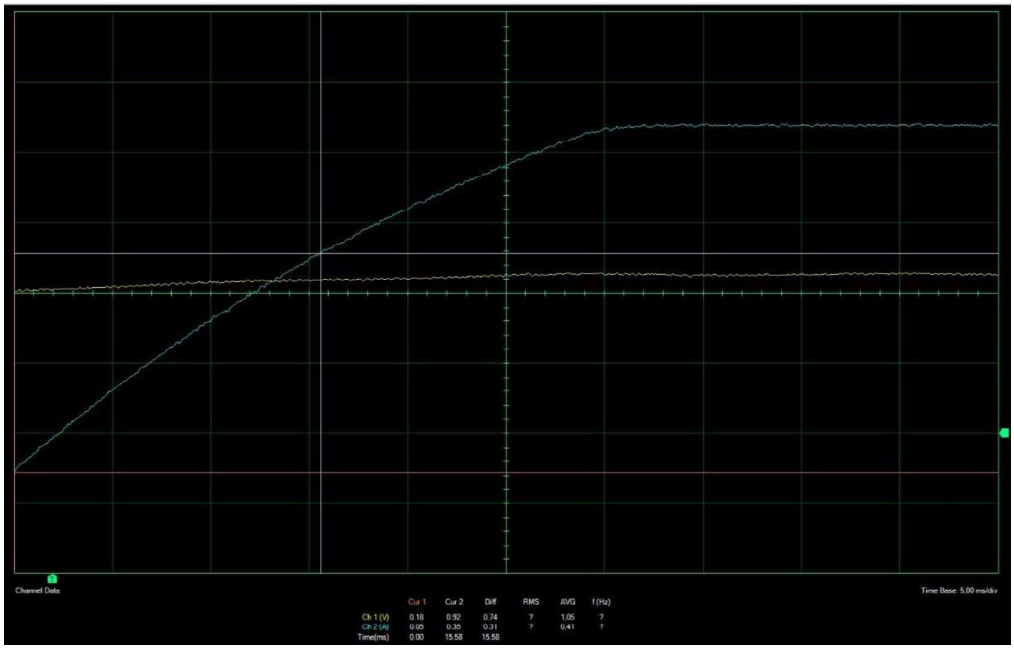


Figura 3.2 Respuesta de la corriente y voltaje de paso para la determinación de la inductancia en el eje directo

Escala vertical: Para voltaje: 5V/div

Para corriente: 0,1 A/div

Escala horizontal: 5 ms/div

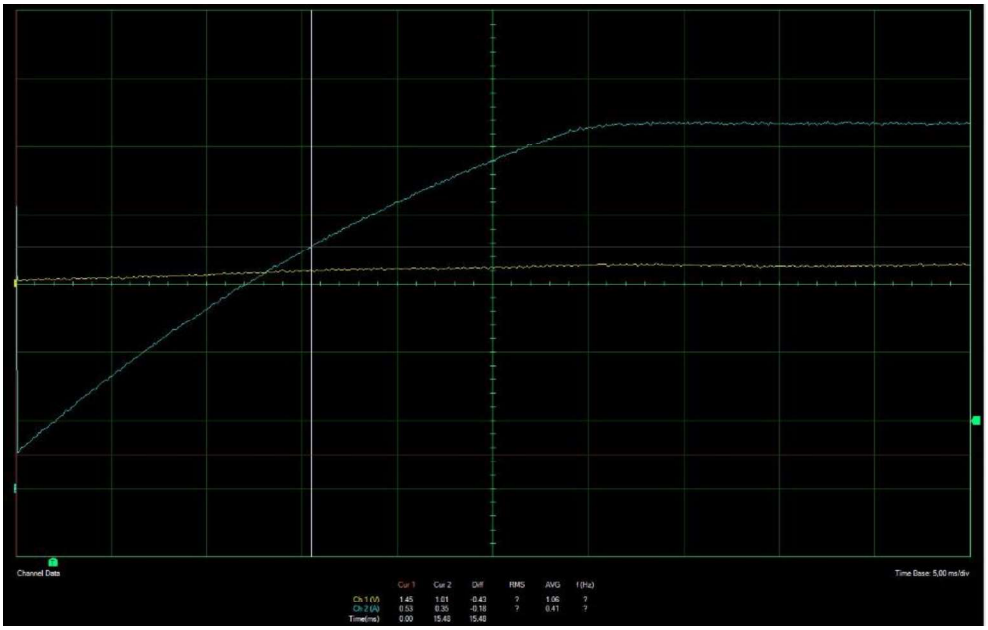


Figura 3.3 Respuesta de la corriente y voltaje de paso para la determinación de la inductancia en el eje en cuadratura

Escala vertical: Para voltaje: 5V/div

Para corriente: 0,1 A/div

Escala horizontal: 5 ms/div

La prueba se realiza con una fuente de alimentación DC existente en el Laboratorio de Electrónica de Potencia con el número de serie 00154-00131, se la presenta en la Figura 3.4.

Figura 3.4 Fuente de alimentación DC utilizada para la prueba de voltaje de paso

En la Tabla 3.8 se muestra un resumen de los datos obtenidos de la curva de corriente y se aplica la Ecuación 2.9 para la obtención de las inductancias de cada eje.

Tabla 3.8 Obtención de las inductancias de eje directo y de cuadratura a partir de la respuesta de voltaje de paso

$I_{total}[A]$	63,2% I	cte. Tiempo		Inductancias		Reactancias	
0,5	0,316	τ_q	0,001548	**Lq**	0,00148092	$\mathbf{X_q}$	2,7915
0,51	0,32232	τ_d	0,001558	**Ld**	0,00149049	$\mathbf{X_d}$	2,8095

$$X_d = 2{,}8095\ \Omega = 0{,}2431\ \text{p.u.}$$

$$X_q = 2{,}7915\ \Omega = 0{,}2415\ \text{p.u.}$$

3.1.5.4 Cortocircuito Trifásico Súbito

Los oscilogramas de corriente y voltaje resultantes de la prueba se presentan en las Figuras 3.5 y 3.6, respectivamente.

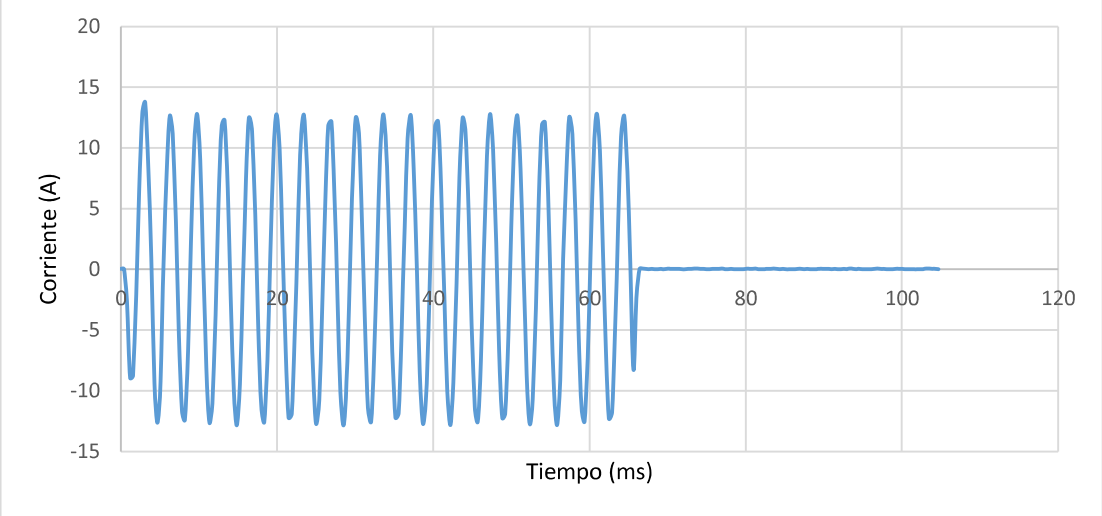


Figura 3.5 Corriente en una fase del generador aplicando un cortocircuito en los bornes del generador

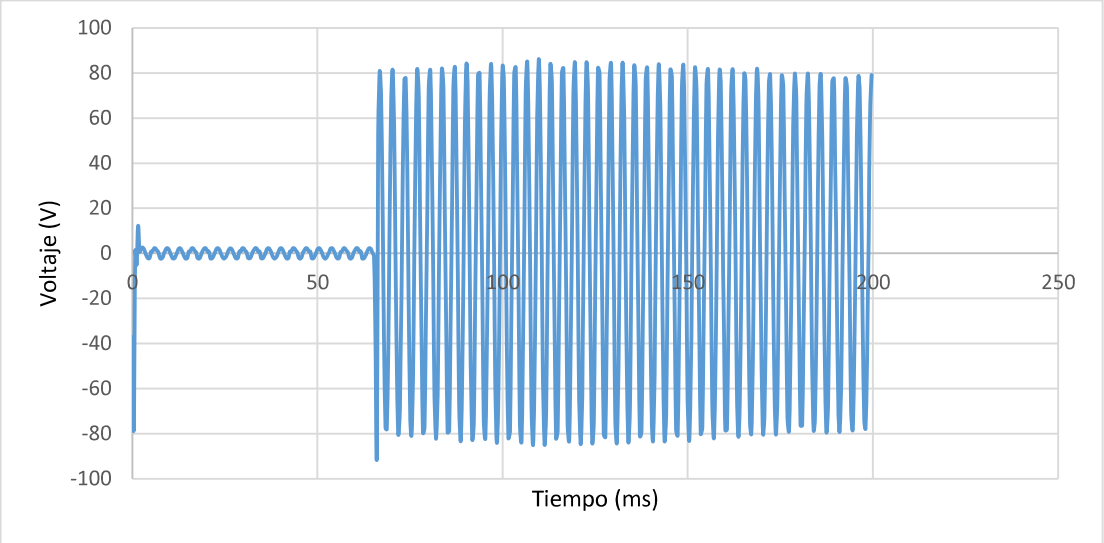


Figura 3.6 Voltaje de una fase del generador aplicando un cortocircuito en los bornes del generador

De las gráficas de corriente y voltaje se determinan los datos necesarios para aplicar la Ecuación 2.12 y obtener la reactancia sincrónica.

$$E = \frac{79.9}{\sqrt{2}} = 56{,}5\ V$$

$$I = \frac{11.4}{\sqrt{2}} = 7{,}88\ A$$

$$X_d = \frac{56{,}5}{7{,}88} = 7{,}172\ \Omega$$

A partir de este valor se obtiene la inductancia por fase.

$$L_{d_{L-L}} = \frac{7{,}172}{2 \cdot \pi \cdot 300} = 0{,}0038051\ H$$

$$L_{d_{p/fase}} = \frac{0{,}0038051}{2} = 0{,}0019025\ H = 3{,}5861\ \Omega = 0{,}31031\ p.u.$$

3.1.6 Parámetros Mecánicos

3.1.6.1 Constantes de Rozamiento Viscoso y de Fricción Seca

En la Tabla 3.9 se presentan las mediciones de corriente de armadura, potencia y velocidad para diferentes valores de voltaje. Se aplica la Ecuación 2.16 para determinar el torque.

Tabla 3.9 Datos necesarios para determinar el torque

V_a [V]	I_a [A]	ω_m [r.p.m.]	P [W]	$\omega_m \left[\frac{rad}{s}\right]$	T [N.m]
0,16	0,065	0	0	0,00	0
2,755	0,511	155	2,453	16,23	0,1511
4,018	0,558	271	3,756	28,38	0,1324
6,375	0,606	483	6,367	50,58	0,1259
8,579	0,637	687	8,933	71,94	0,1242
10,13	0,658	826	10,77	86,50	0,1245
12,35	0,697	1022	13,78	107,02	0,1288
14,56	0,719	1225	16,54	128,28	0,1289
16	0,745	1358	18,84	142,21	0,1325
17,51	0,763	1490	21,05	156,03	0,1349
19,35	0,778	1659	23,83	173,73	0,1372
20,35	0,785	1750	25,28	183,26	0,1379
22,61	0,794	1958	27,83	205,04	0,1357
23,5	0,792	2044	29,17	214,05	0,1363
24,93	0,814	2172	31,5	227,45	0,1385
25,71	0,82	2245	32,82	235,10	0,1396
28,12	0,832	2455	35,99	257,09	0,1393
29,45	0,854	2570	38,45	269,13	0,1429
30,3	0,855	2650	39,62	277,51	0,1428
31,74	0,86	2788	41,39	291,96	0,1418
32,67	0,867	2869	43,12	300,44	0,1435
34,04	0,876	2998	44,98	313,95	0,1433
35,45	0,885	3131	47,41	327,88	0,1446
37,84	0,904	3341	51,24	349,87	0,1465
39,86	0,918	3515	54,52	368,09	0,1481
40,92	0,918	3611	55,93	378,14	0,1479
44,52	0,928	3945	60,9	413,12	0,1474
46,43	0,935	4116	63,68	431,03	0,1477
47,23	0,939	4188	65	438,57	0,1482
48,79	0,94	4330	66,44	453,44	0,1465
49,49	0,945	4409	67,4	461,71	0,1460
50,57	0,956	4498	69,31	471,03	0,1471
51,24	0,955	4558	69,79	477,31	0,1462
52,8	0,971	4689	72,97	491,03	0,1486
53,75	0,98	4773	74,62	499,83	0,1493
55,86	0,991	4966	77,74	520,04	0,1495
57,4	1,009	5094	82,28	533,44	0,1542
58,76	1,008	5217	82,47	546,32	0,1510
59,9	1,029	5315	84,66	556,59	0,1521
60,62	1,036	5380	85,72	563,39	0,1521

62,67	1,044	5558	88,74	582,03	0,1525
65,33	1,086	5814	97,03	608,84	0,1594
67,06	1,103	5965	99,5	624,65	0,1593
67,57	1,114	6002	102	628,53	0,1623

A partir de los datos tabulados en la tabla anterior se grafica la curva de torque vs velocidad presentada en la Figura 3.7.

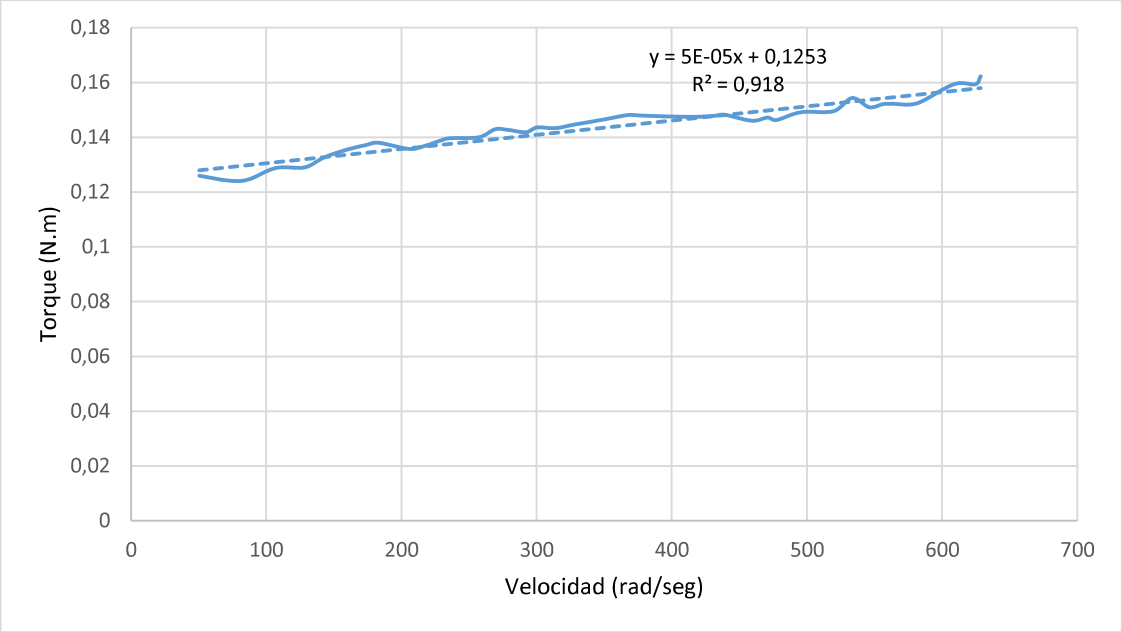


Figura 3.7 Gráfica de torque vs velocidad obtenida de los datos medidos

Con la ayuda de una regresión lineal en Excel se determina una ecuación que facilita aproximar la relación entre el torque y la velocidad. El error residual es de 1,67% lo cual está dentro del rango tolerable y se observa que el valor del estatismo es cercano a 1.

Los valores obtenidos experimentalmente son:

$$B = 5 \times 10^{-5}\ \mathrm{N.m.s}$$

$$T_f = 0{,}1253\ \mathrm{N.m}$$

3.1.6.2 Constante de Torque

De los datos medidos en el punto anterior se determina la constante de torque con la Ecuación 2.17. Los valores se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Cálculo de la constante de torque

$\mathbf{I_a}$ [A]	T [Nm]	$\mathbf{k_T}$ $\left[\frac{\mathbf{Nm}}{\mathbf{A}}\right]$
0,065	0	0,000
0,511	0,1511	0,296
0,558	0,1324	0,237
0,606	0,1259	0,208
0,637	0,1242	0,195
0,658	0,1245	0,189
0,697	0,1288	0,185
0,719	0,1289	0,179
0,745	0,1325	0,178
0,763	0,1349	0,177
0,778	0,1372	0,176
0,785	0,1379	0,176
0,794	0,1357	0,171
0,792	0,1363	0,172
0,814	0,1385	0,170
0,82	0,1396	0,170
0,832	0,1400	0,168
0,854	0,1429	0,167
0,855	0,1428	0,167
0,86	0,1418	0,165
0,867	0,1435	0,166
0,876	0,1433	0,164
0,885	0,1446	0,163
0,904	0,1465	0,162
0,918	0,1481	0,161
0,918	0,1479	0,161
0,928	0,1474	0,159
0,935	0,1477	0,158
0,939	0,1482	0,158
0,94	0,1465	0,156
0,945	0,1460	0,154
0,956	0,1471	0,154
0,955	0,1462	0,153
0,971	0,1486	0,153
0,98	0,1493	0,152
0,991	0,1495	0,151
1,009	0,1542	0,153
1,008	0,1510	0,150
1,029	0,1521	0,148
1,036	0,1521	0,147

1,044	0,1525	0,146
1,086	0,1594	0,147
1,103	0,1593	0,144
1,114	0,1623	0,146
Promedio		0,165

$$k_T = 0.165 \left[\frac{Nm}{A}\right]$$

3.1.6.3 Momento de Inercia

La curva de frecuencia durante la pérdida de fuerza electromotriz se obtiene de las lecturas del codificador óptico visualizadas mediante la aplicación en LabView. En la Figura 3.8 se presenta la gráfica obtenida.

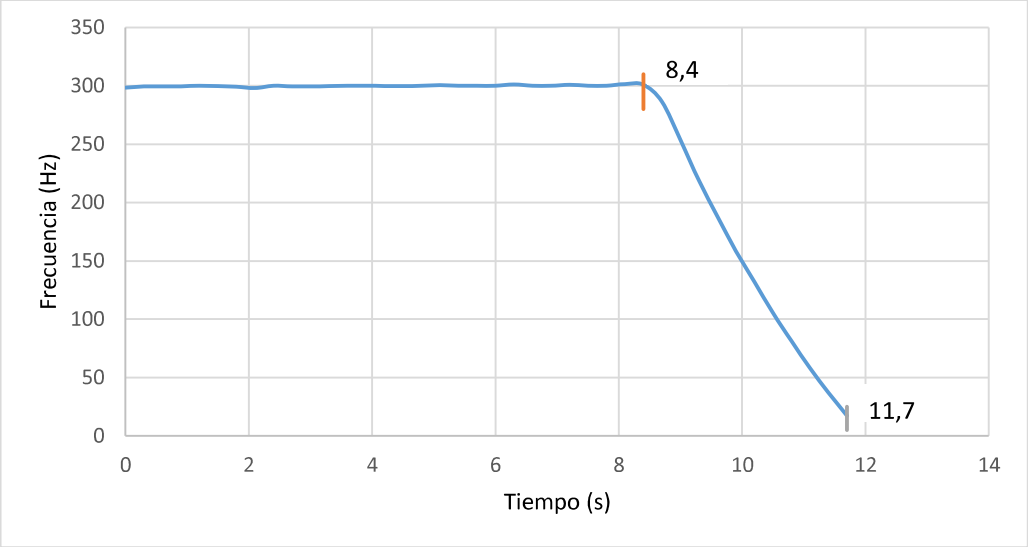


Figura 3.8 Pérdida de fuerza electromotriz en el motor de imanes permanentes

$$t_{off} = 3{,}3 \text{ seg}$$

$$\omega_o = 628{,}319 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

Los valores de t_{off}, ω_o, B y T_f previamente determinados son reemplazados en la Ecuación 2.19 para obtener el momento de inercia de la máquina.

$$J = \frac{5 \times 10^{-5} \cdot 3{,}3}{\ln\left(\frac{628{,}319 + \frac{0{,}1253}{5 \times 10^{-5}}}{\frac{0{,}1253}{5 \times 10^{-5}}}\right)}$$

$$J = 0{,}00073752\ \text{kg} \cdot m^2$$

3.1.6.4 Coeficiente de Amortiguamiento

El coeficiente de amortiguamiento se determina a partir de las pruebas de rechazo de carga y de pérdida de fuerza electromotriz. En la Figura 3.9 se presenta el oscilograma obtenido de la prueba de rechazo de carga.

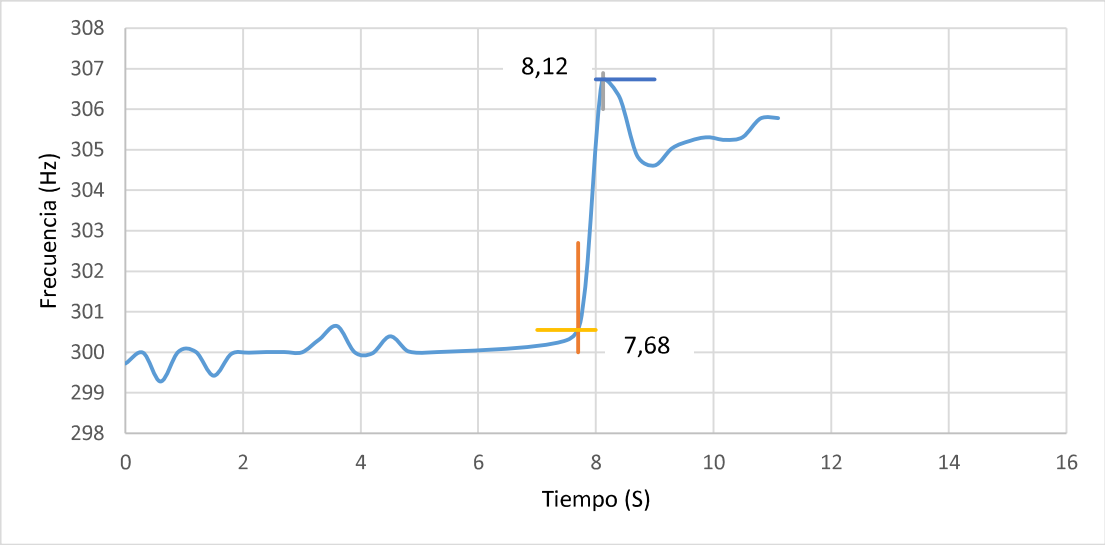


Figura 3.9 Gráfica obtenida a partir de la prueba de rechazo de carga

En la Tabla 3.11 se muestran los resultados de la prueba de rechazo de carga, los cuales se emplean en la Ecuación 2.40 para calcular la constante de inercia.

Tabla 3.11 Resultados de la prueba de rechazo de carga

P [W]	38,64
S [VA]	312
P [p.u.]	0,1239
f_S [Hz]	300
t0 [s]	7,68
t1 [s]	8,12
f0	300,55
f1	306,74
Δt [s]	0,44
Δf [Hz]	6,19

$$H = \frac{0{,}44 \cdot 300}{2 \cdot 6{,}19} \cdot 0{,}1239 = 1{,}32\ s$$

En la Figura 3.8 se observa que la curva cae hasta el 5% de la ω_s, se desarrollan las Ecuaciones 2.43 y 2.44 con los datos obtenidos para obtener el coeficiente de amortiguamiento.

$$0{,}05 \cdot \omega_0 = \omega_0 \cdot e^{-\frac{\omega_s}{2H} \cdot D \cdot t}$$

$$\ln 0{,}05 = \ln e^{-\frac{\omega_s}{2H} \cdot D \cdot t}$$

$$\tau = \frac{\Delta t}{3}$$

$$D = \frac{6 \cdot H}{\Delta t}$$

$$D = \frac{6 \cdot 1{,}32}{3{,}3} = 2{,}397\ \frac{p.u.W}{p.u.\frac{rad}{s}}$$

3.2 Resultados de la Máquina de Inducción de Rotor Bobinado

3.2.1 Resistencia de Armadura

Se lleva a cabo el procedimiento descrito en la sección 2.2.1 y se obtienen los datos mostrados en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Valores de resistencia de armadura

V_{dc} [V]	I_{dc} [A]	R_{dc} [Ω]
21,63	1,299	16,651
21,75	1,297	16,769
21,82	1,297	16,823
Promedio		16,677

El cortocircuitar un lado del devanado del estator da lugar a una conexión estrella, por lo que se divide para dos el valor de la resistencia obtenida en la prueba.

$$R_{1-2} = \frac{16.677}{2}\ [\Omega] = 8{,}374\ [\Omega] = 0{,}0929\ p.u.$$

3.2.2 DFIG Funcionando como Máquina Sincrónica

3.2.2.1 Reactancia de Eje Directo Saturada y No Saturada

Con los valores de corriente de campo, corriente y voltaje de armadura medidos en las pruebas de cortocircuito y circuito abierto se dibujan las diferentes curvas características para determinar las reactancias de eje directo no saturada y saturada como se muestran en las Figuras 3.10 y 3.11, respectivamente.

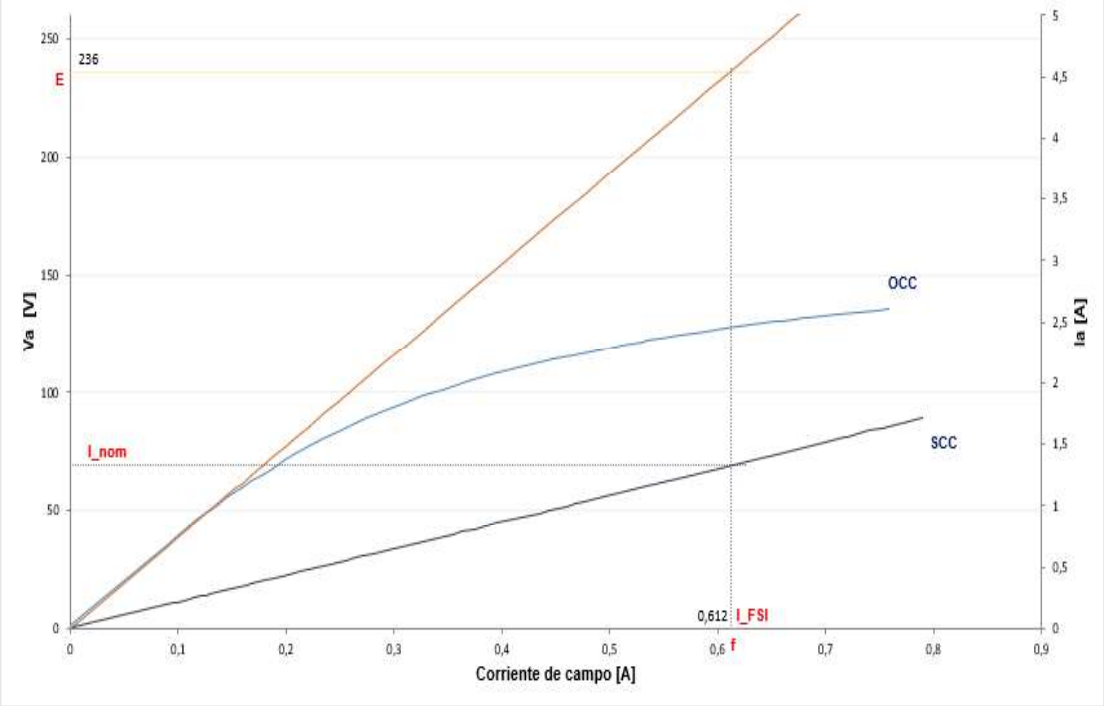


Figura 3.10 Curva característica para determinar la reactancia de eje directo no saturada

Se calcula la reactancia de eje directo no saturada con la Ecuación 2.22.

$$X_{d(ns)} = \frac{236}{1{,}33} = 177{,}444\ \Omega$$

$$X_{d(ns)} = 1{,}969\ \text{p.u.}$$

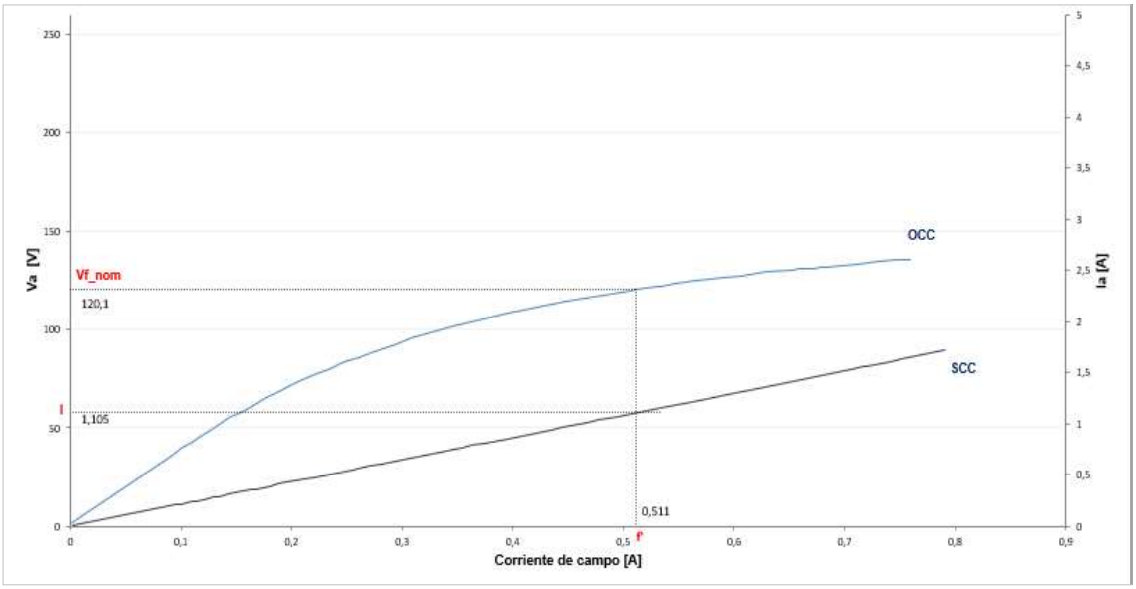


Figura 3.11 Curva característica para determinar la reactancia de eje directo saturada

La reactancia de eje directo saturada se determina con la Ecuación 2.23.

$$X_{d(s)} = \frac{120,1}{1,105} = 108,688\ \Omega$$

$$X_{d(s)} = 1,206\ \text{p.u.}$$

En la Figura 3.12 se determinan los valores de corriente de campo correspondientes al voltaje nominal de armadura proyectado en la línea de entrehierro I_{FG} y a la corriente de armadura nominal proyectado en la recta de cortocircuito I_{FSI}. Son remplazados en la Ecuación 2.24.

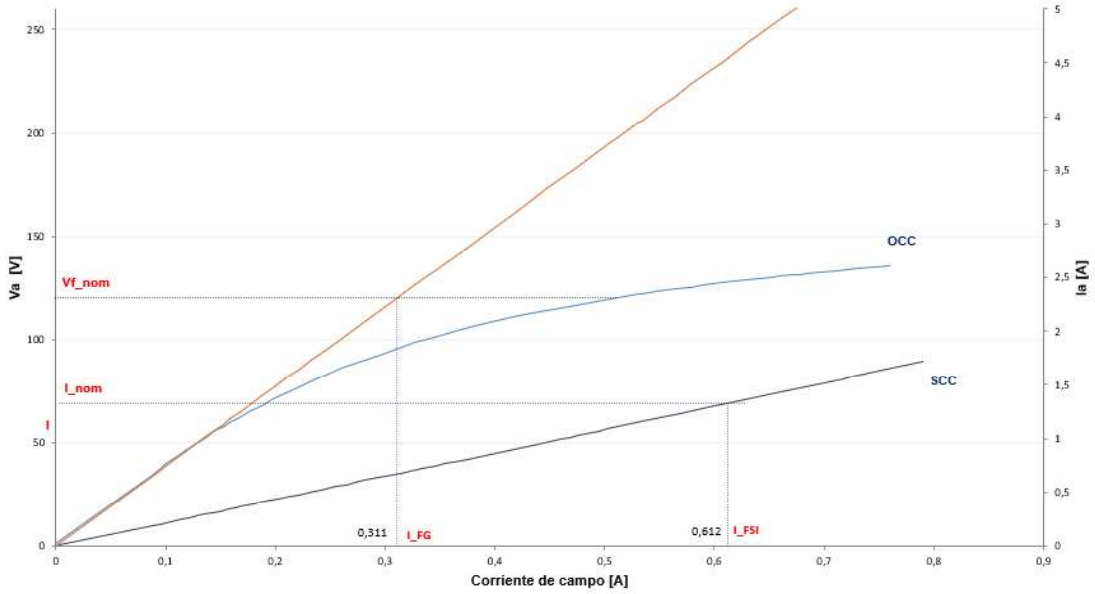


Figura 3.12 Curvas de circuito abierto, cortocircuito y línea de entrehierro

$$X_{d(ns)} = \frac{0{,}612}{0{,}311} = 1{,}968\ \Omega$$

3.2.2.2 Reactancia de Eje de Cuadratura

La prueba de carga se realiza con el banco de cargas resistivas del módulo de generación eólica. Se presentan los resultados medidos de voltaje y corriente en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Resultados medidos de la prueba con carga

	Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vprom [V]	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	Iprom [A]	Vprom [p.u.]	Iprom [p.u.]
Vacío	115,5	116,2	116	115,900	0,007	0,007	0,006	0,007	0,9650	0,0050
1 paso de carga	114,1	114,5	114,4	114,333	0,091	0,093	0,091	0,092	0,9520	0,0689
2 paso de carga	101,6	100,4	102,4	101,467	0,562	0,558	0,47	0,530	0,8449	0,3985
3 paso de carga	98,72	99,08	99,01	98,937	0,575	0,579	0,577	0,577	0,8238	0,4338

$\mathrm{V_{vacío}} = \mathrm{E} = 115{,}9\ \mathrm{V} = 0{,}965$ p.u.

$V = 98{,}937\ V = 0{,}8238$ p.u.

$I = 0{,}577\ A = 0{,}4338$ p.u.

De pruebas antes realizadas se tiene:

$x_d = 108{,}688\ \Omega = 1{,}206$ p.u.

$r_a = 8{,}066\ \Omega = 0{,}0895$ p.u.

De acuerdo con las Ecuaciones 2.31 y 2.32 se obtiene el ángulo delta y la reactancia de eje de cuadratura, respectivamente:

$$\delta = 26{,}5023°$$

$$x_q = 0{,}9706 \text{ p.u.}$$

Se observa que la reactancia de eje directo es mayor a la del eje de cuadratura, debido a que el cilindro del rotor no es macizo, más bien es dentado, como se observa en la Figura 3.13.

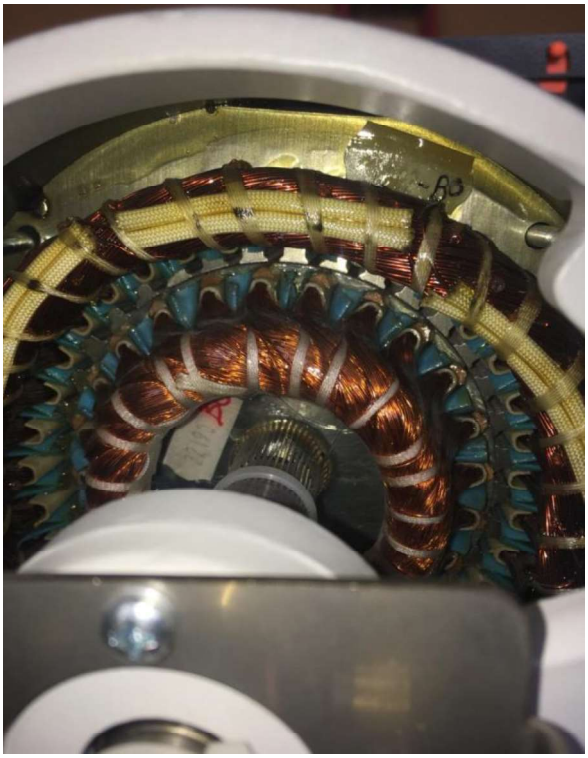


Figura 3.13 Devanado del rotor y estátor de la DFIG

3.2.2.3 Reactancias de Eje Directo Subtransitoria y Transitoria

La forma de onda de la corriente obtenida en la fase C al producirse un cortocircuito trifásico súbito se presenta en la Figura 3.14.

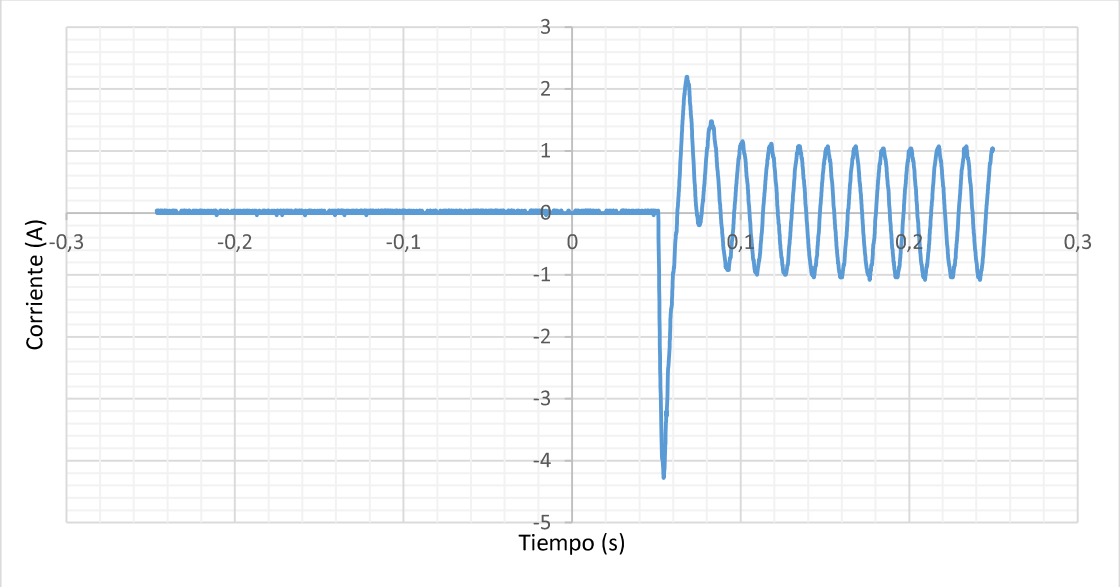


Figura 3.14 Oscilograma de la corriente de línea

El análisis de la corriente de cortocircuito trifásico súbito se presenta en la Figura 3.15 y los resultados obtenidos en la Tabla 3.14.

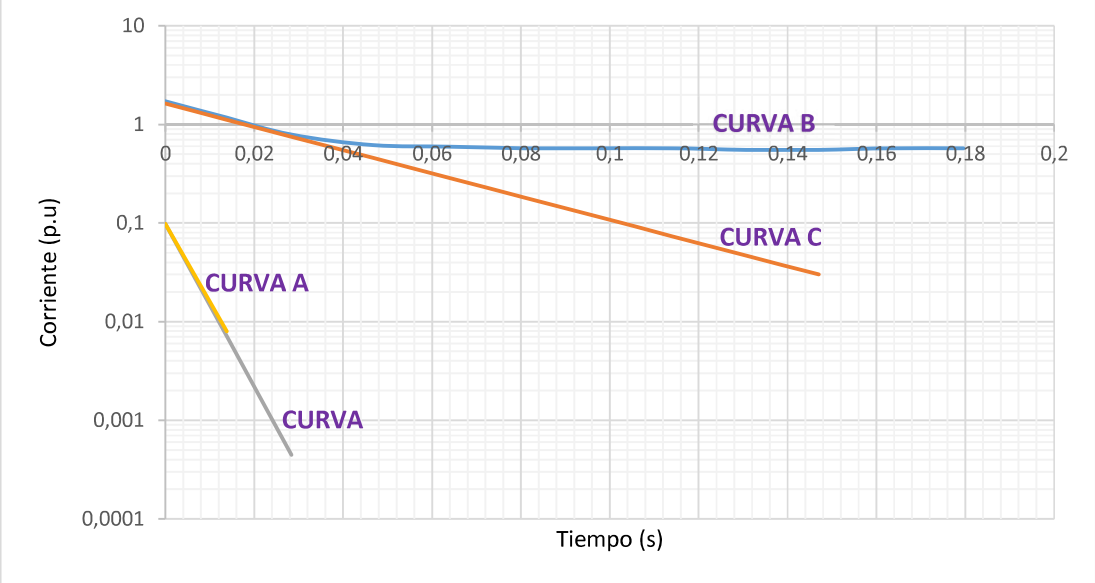


Figura 3.15 Análisis de la corriente de cortocircuito trifásico súbito

Tabla 3.14 Valores obtenidos de los análisis de las corrientes de cortocircuito

MAGNITUD	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio
Voltaje pre falla [V]	206,45	206,67	206,8	206,64
Voltaje pre falla p.u.	0,9925	0,9936	0,9942	0,9935
1) Corriente de estado estable I=E/Xds	0,7354	0,7354	0,7354	0,7354
Corriente en p.u.	0,5529	0,5529	0,5529	0,5529
2) Componente transitoria inicial (curva C al tiempo cero) p.u.	1,3200	1,2300	1,6250	1,3917
3) Corriente transitoria I' (1+2) p.u.	1,8729	1,7829	2,1779	1,9446
4) Componente subtransitoria inicial curva D al tiempo cero) p.u.	0,1900	0,1735	0,0980	0,1538
5) Corriente subtransitoria I'' (3+4) p.u.	2,0629	1,9564	2,2759	2,0984

Los valores de las reactancias de eje directo subtransitoria y transitoria son obtenidos mediante las Ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$X''_d = \frac{E}{I''} = \frac{0{,}9935}{2{,}0984} = 0{,}4734 \text{ p.u.}$$

$$X'_d = \frac{E}{I'} = \frac{0{,}9935}{1{,}9446} = 0{,}5109 \text{ p.u.}$$

3.2.2.4 Constantes de Tiempo de Cortocircuito de Eje Directo

Las constantes de tiempo determinadas del análisis de las corrientes de cortocircuito como se detalla en la sección 2.3.1.6. Los resultados se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Resultados de las constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo

Tiempo	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio
t'd	0,015903	0,016147	0,0368203	0,02296
t''d	0,001801	0,002791	0,0055048	0,00337

3.2.2.5 Constantes de Tiempo de Circuito Abierto de Eje Directo

Las constantes son obtenidas a partir de la prueba de recuperación de voltaje. En la Figura 3.16 se presenta el oscilograma del voltaje.

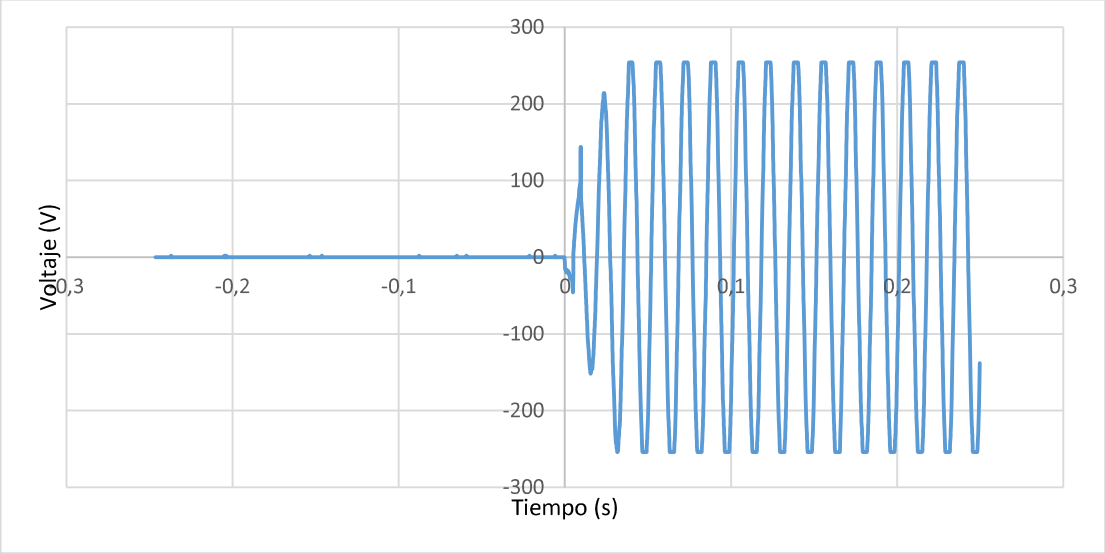


Figura 3.16 Recuperación del voltaje posterior a la falla

El análisis de la curva de recuperación de voltaje se presenta en la Figura 3.17.

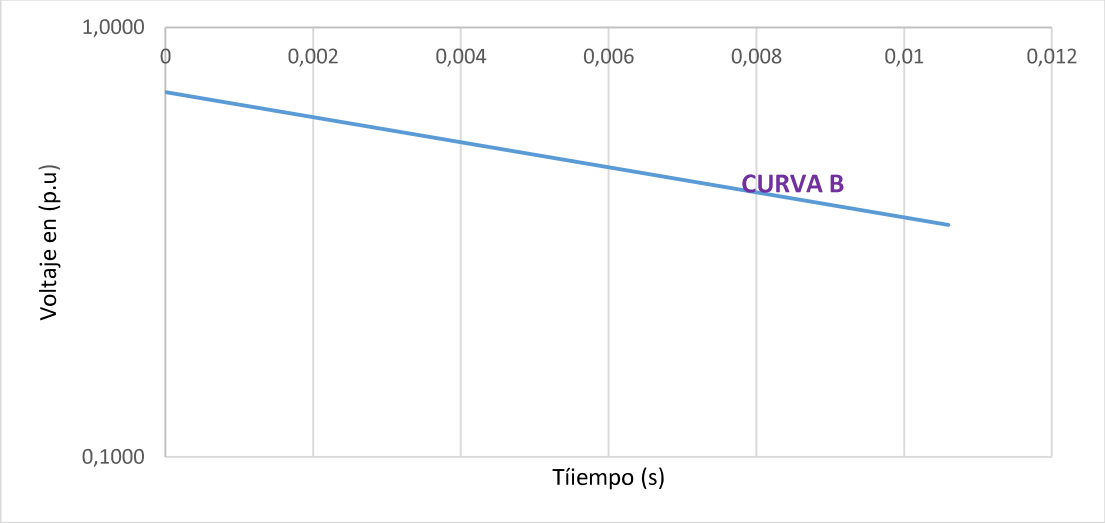


Figura 3.17 Análisis del voltaje de recuperación

En la Figura 3.16 se observa que en la curva obtenida de la recuperación de voltaje la parte transitoria desaparece en un período de tiempo pequeño, que se confirma posteriormente en el análisis de su envolvente. Los resultados de las constantes de tiempo de circuito abierto subtransitoria y transitoria se obtienen de acuerdo con la sección 2.3.1.7.

$$t''_{do} = 0\ s$$

$$t'_{do} = 0{,}01487\ s$$

3.2.2.6 Prueba de Cortocircuito Bifásico Súbito

De la ejecución de la prueba de cortocircuito bifásico súbito entre las fases A y B se obtiene el oscilograma de corriente, mostrado en la Figura 3.18.

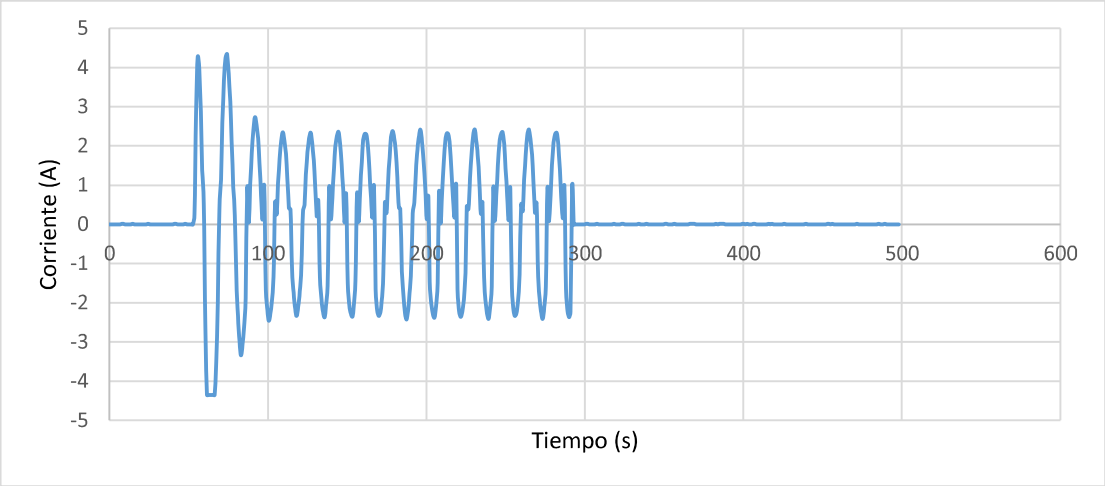


Figura 3.18 Respuesta de la corriente ante un cortocircuito bifásico

El análisis de la corriente se lo realiza de manera similar al presentado en 3.2.2.2. En la Figura 3.19 se presenta las curvas provenientes del análisis de la corriente.

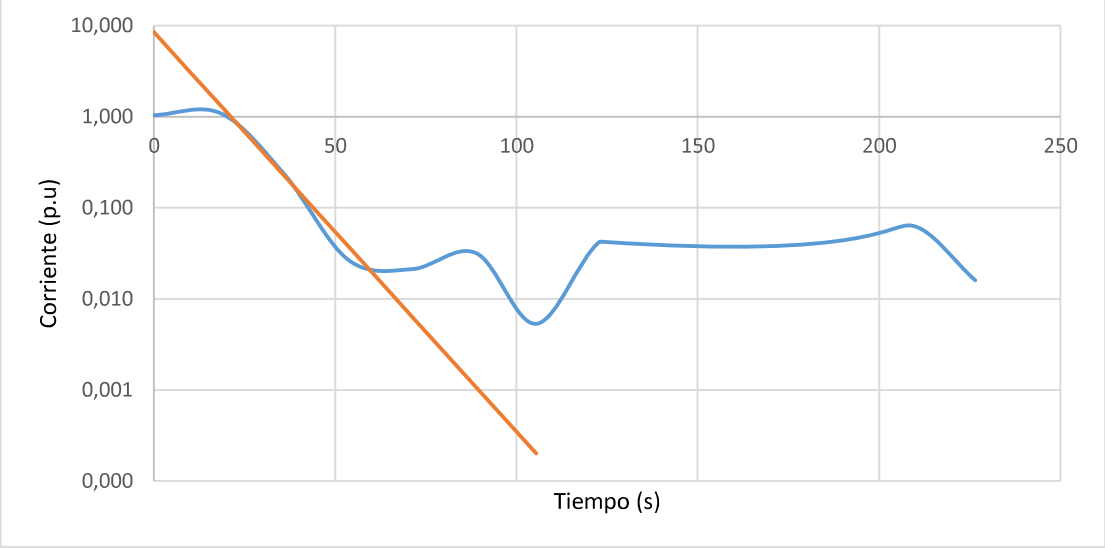


Figura 3.19 Análisis de la corriente en la prueba de cortocircuito bifásico

En la Tabla 3.16 se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 3.16 Resultados obtenidos en la prueba de cortocircuito bifásico

MAGNITUD	Prueba1
Voltaje pre falla [V]	208,3000
Voltaje pre falla p.u.	1,0014
1) Corriente de estado estable I=E/Xds	1,6263
Corriente en p.u.	1,2228
2) Componente transitoria inicial (curva C al tiempo cero) p.u.	8,4803
3) Corriente transitoria I' (1+2) p.u.	9,7031
4) Componente subtransitoria inicial curva D al tiempo cero) p.u.	0,0000
5) Corriente subtransitoria I'' (3+4) p.u.	9,7031

La reactancia X''_{d3} es la obtenida en la prueba de cortocircuito trifásico. Se remplazan los valores encontrados en las Ecuaciones 2.33 y 2.34, respectivamente para obtener la reactancia de eje de cuadratura subtransitoria.

$$X''_{d3} = X''_{d} = 0{,}4734\ \text{p.u}$$

$$X_{LL} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}0014}{9{,}7031} = 0{,}1788\ \text{p.u}$$

$$X''_{q} = \frac{(0{,}1788 - 0{,}4734)^3}{0{,}4734} = 0{,}1834\ \text{p.u}$$

3.2.2.7 Reactancia de Secuencia Negativa

En la Tabla 3.17 se presentan los valores de corriente, voltaje y potencia medidos en la prueba de cortocircuito bifásico sostenido.

Tabla 3.17 Valores obtenidos en la prueba de cortocircuito bifásico sostenido

V [V]	I [A]	I campo	P [W]	V [p.u.]	I [p.u.]	P [p.u.]
11,78	0,266	0,071	2,137	0,057	0,2000	0,00771
11,99	0,277	0,073	2,294	0,058	0,2083	0,00828
12,33	0,286	0,077	2,441	0,059	0,2150	0,00881
12,67	0,296	0,08	2,592	0,061	0,2226	0,00935
13,22	0,314	0,085	2,885	0,064	0,2361	0,01041
13,6	0,328	0,089	3,141	0,065	0,2466	0,01133
14,29	0,348	0,096	3,477	0,069	0,2617	0,01255

	14,83	0,37	0,102	3,836	0,071	0,2782	0,01384
	15,59	0,393	0,109	4,328	0,075	0,2955	0,01562
	16,28	0,416	0,116	4,823	0,078	0,3128	0,01740
	16,65	0,428	0,119	5,088	0,080	0,3218	0,01836
	17,01	0,439	0,123	5,322	0,082	0,3301	0,01920
	17,08	0,444	0,124	5,448	0,082	0,3338	0,01966
	17,58	0,46	0,129	5,802	0,085	0,3459	0,02094
	18,38	0,483	0,136	6,442	0,088	0,3632	0,02325
	19,22	0,514	0,144	7,239	0,092	0,3865	0,02612
	19,43	0,521	0,146	7,362	0,093	0,3917	0,02657
	20,04	0,54	0,152	7,96	0,096	0,4060	0,02872
	21,13	0,555	0,157	8,355	0,102	0,4173	0,03015
	21,47	0,588	0,166	9,338	0,103	0,4421	0,03370
	21,97	0,605	0,171	9,81	0,106	0,4549	0,03540
	22,74	0,628	0,179	10,62	0,109	0,4722	0,03832
	24,03	0,671	0,19	12,03	0,116	0,5045	0,04341
	25,45	0,717	0,204	13,72	0,122	0,5391	0,04951
	27,56	0,787	0,224	16,44	0,133	0,5917	0,05932
	29,99	0,866	0,247	19,86	0,144	0,6511	0,07166
	30,37	0,875	0,25	20,29	0,146	0,6579	0,07322
	36,76	1,081	0,31	30,79	0,177	0,8128	0,11110
	40,65	1,21	0,347	38,41	0,195	0,9098	0,13860
	44,76	1,346	0,386	47,21	0,215	1,0120	0,17035
	50,78	1,543	0,444	61,77	0,244	1,1602	0,22289
	52,5	1,59	0,458	65,86	0,252	1,1955	0,23765
	55,16	1,677	0,484	73,05	0,265	1,2609	0,26360
	55,51	1,686	0,487	73,94	0,267	1,2677	0,26681
	58,47	1,787	0,516	82,65	0,281	1,3436	0,29824
Promedio	25,7506	0,7239		19,3360	0,1238	0,5443	0,0698

El promedio de los valores medidos se utiliza para determinar la reactancia de secuencia negativa, aplicando las Ecuaciones 2.35, 2.36 y 2.37.

$$Z_{2(L-L)} = \frac{0{,}1238}{0{,}5443} = 0{,}2392 \text{ p.u.}$$

$$X_{2\,(L-L)} = \frac{19{,}336}{\sqrt{3} \cdot 0{,}1238 \cdot 0{,}5443} = 0{,}1011 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = \frac{(0{,}1011)^2 + (0{,}4734)^2}{2 \cdot 0{,}4734} = 0{,}2475 \text{ p.u.}$$

3.2.2.8 Reactancia de Secuencia Cero

En la Tabla 3.18 se presentan los valores de corriente, voltaje y potencia medidos de la prueba de circuito en paralelo.

Tabla 3.18 Valores obtenidos de la prueba de circuito en paralelo

	V [V]	I [A]	P [W]	P [p.u]	V [p.u]	I [p.u]
	12,130	3,056	26,910	0,097	0,101	2,298
	12,230	3,082	27,350	0,099	0,102	2,317
	13,510	3,408	33,380	0,120	0,112	2,562
	14,180	3,578	36,760	0,133	0,118	2,690
	14,780	3,732	40,000	0,144	0,123	2,806
	15,350	3,878	43,180	0,156	0,128	2,916
	16,920	4,283	52,630	0,190	0,141	3,220
	17,000	4,308	53,240	0,192	0,142	3,239
	18,120	4,610	60,860	0,220	0,151	3,466
	18,210	4,620	61,160	0,221	0,152	3,474
	18,630	4,743	64,350	0,232	0,155	3,566
	19,780	5,043	72,850	0,263	0,165	3,792
Promedio	15,903	4,028	47,723	0,172	0,132	3,029

Los valores son transformados a p.u. y remplazados en la Ecuación 2.38 obteniendo la reactancia de secuencia cero.

$$Z_0 = \frac{3 \cdot 0{,}132}{3{,}029} = 0{,}1312 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0{,}1312 \sqrt{1 - \left(\frac{0{,}172}{0{,}132 \cdot 3{,}029}\right)^2} = 0{,}1185 \text{ p.u.}$$

3.2.2.9 Coeficiente de Amortiguamiento

La curva de la respuesta de la frecuencia frente a un rechazo de carga medido a través de la aplicación en LabView se presenta en la Figura 3.20.

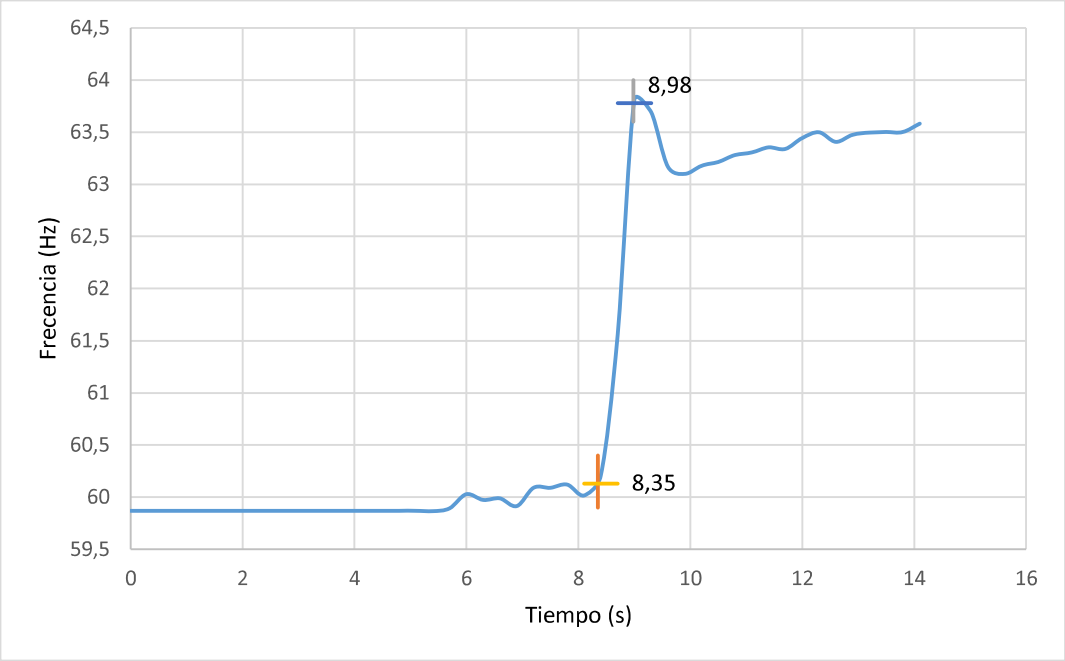


Figura 3.20 Respuesta de la frecuencia ante un rechazo de carga

En la Tabla 3.19 se presentan los resultados de la prueba de rechazo de carga que se utilizan en la Ecuación 2.40 para la obtención de la constante de inercia.

Tabla 3.19 Resultados de la prueba de rechazo de carga

P [W]	75,15
S [VA]	480
P [p.u]	0,1566
f_S [Hz]	60
t0 [s]	8,35
t1 [s]	8,98
f0	60,13
f1	63,78
Δt [s]	0,63
Δf [Hz]	3,65

$$H = \frac{0{,}63 \cdot 0{,}1566}{2 \cdot 3{,}65} \cdot 0{,}1566 = 0{,}811\ s$$

La curva de la variación de la frecuencia al retirarse la alimentación de la máquina se presenta en la Figura 3.21.

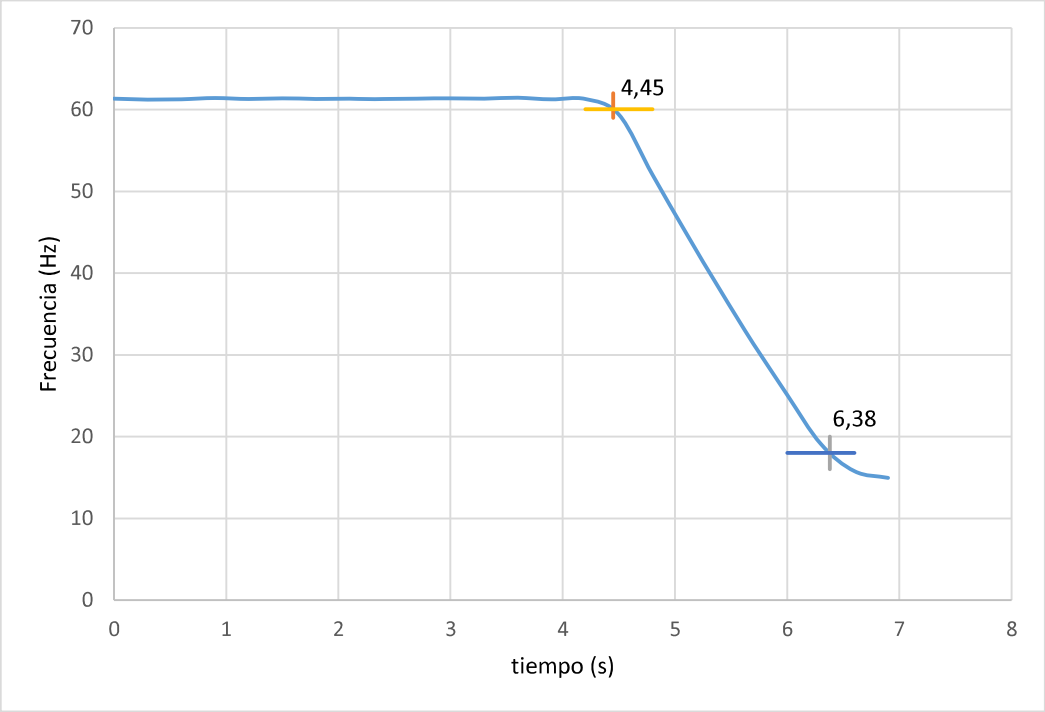


Figura 3.21 Respuesta de la frecuencia ante la pérdida de fem

La curva cae hasta el 30% de la ω_s, desarrollando la Ecuación 2.42 y 2.43 se obtiene el coeficiente de amortiguamiento.

$$0{,}3 \cdot \omega_0 = \omega_0 \cdot e^{-\frac{\omega_s}{2H} D \cdot t}$$

$$\ln 0{,}3 = \ln e^{-\frac{\omega_s}{2H} D \cdot t}$$

$$\tau = \frac{\Delta t}{1{,}20397}$$

$$D = \frac{2{,}40795 \cdot H}{\Delta t}$$

$$D = \frac{2{,}40795 \cdot 0{,}811}{1{,}93} = 1{,}0115 \ \frac{\text{p.u.W}}{\text{p.u.}\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

3.2.3 DFIG Funcionando como Máquina de Inducción

3.2.3.1 Prueba de Rotor Bloqueado

En la Tabla 3.20 se presentan los valores de corriente, voltaje y potencia medidos en la prueba de rotor bloqueado.

Tabla 3.20 Valores medidos en la prueba de rotor bloqueado

	Vrb [V]	Irb [A]	Prb [W]
L1-2	43	1,15	60
L2-3	44	1,17	
L3-1	42,6	1,18	
Promedio	43,2	1,167	

Se obtiene la resistencia de rotor bloqueado aplicando la Ecuación 2.47.

$$\mathrm{R_{rb}} = \frac{60}{3 \cdot 1{,}167^2} = 14{,}6939\ \Omega$$

La impedancia de rotor bloqueado de obtiene de la Ecuación 2.48.

$$\mathrm{Z_{rb}} = \frac{43}{\sqrt{3} \cdot 1{,}167} = 21{,}3785\ \Omega$$

El resultado de la reactancia de rotor bloqueado se calcula mediante la Ecuación 2.49.

$$\mathrm{X_{rb}} = \sqrt{21{,}3785^2 - 14{,}6939^2} = 15{,}528\ \Omega$$

Conociendo que la reactancia de rotor bloqueado es igual a la suma de las reactancias del estator y rotor.

$$\mathrm{X_{rb}} = \mathrm{X_1} + \mathrm{X_2}$$

De la Tabla 2.4 se tiene que la relación de $\mathrm{X_1}$ y $\mathrm{X_2}$ es 1.

$$\mathrm{X_1} = \mathrm{X_2} = \frac{15{,}528}{2} = 7{,}764\ \Omega = 0{,}074\ \mathrm{p.u.}$$

3.2.3.2 Prueba en Vacío

En la Tabla 3.21 se presentan los valores de corriente, voltaje y potencia medidos de la prueba en vacío.

Tabla 3.21 Valores medidos de la prueba en vacío

	Vo [V]	Io [A]	Po [W]
L1-2	208	0,92	80
L2-3	211,5	0,93	
L3-1	209,6	1	
Promedio	209,7	0,95	

Los valores medidos se remplazan en las Ecuaciones 2.45 y 2.46 para determinar el valor de la reactancia de magnetización.

$$E_o = \frac{209,7}{\sqrt{3}} - 7,764 \cdot 0,95 = 113,6944\ V$$

$$X_m = \frac{113,6944}{0,95} - 8,078 = 111,600\ \Omega = 1,069\ \text{p.u.}$$

3.2.3.3 Resistencia del Rotor

Los resultados de corriente, voltaje, potencia y velocidad medidos en la prueba de voltaje reducido se presentan en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22 Valores medidos en la prueba de prueba voltaje reducido.

V [V]	I [A]	ω_s [r.p.m.]	P [W]
35,4	0,55	1319	30

Para determinar la resistencia del rotor, es necesario obtener los valores de la magnitud y ángulo del voltaje del rotor, corriente de magnetización, corriente de las pérdidas en el núcleo, corriente de carga en el rotor e impedancia del rotor, detalladas en la Ecuación 2.50

$$\cos\theta_1 = \frac{8,078}{11,204} = 0,7210$$

$$\text{sen}\,\theta_1 = \frac{7,764}{11,204} = 0,6930$$

$$\mathrm{V_2} = \sqrt{[35,4 - 0,55(7,764 \cdot 0,6930 \pm 8,078 \cdot 0,7210)]^2 + [0,55(7,764 \cdot 0,7210 \mp 8,078 \cdot 0,6930)]^2}$$

$$\mathrm{V_2} = 29,238\ \mathrm{V}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\frac{0,55(7,764 \cdot 0,7210 \mp 8,078 \cdot 0,6930)}{35,4 - 0,55(7,764 \cdot 0,6930 \pm 8,078 \cdot 0,7210)} = 0,000036\ \text{rad}$$

$$\mathrm{I_{fe}} = \frac{\frac{30}{3}}{29,238} = 0,3420\ \mathrm{A}$$

$$\mathrm{I_e} = \frac{29,238}{111,600} = 0,262\ \mathrm{A}$$

$$\mathrm{I_2} = 0,98776\ \mathrm{A}$$

$$\mathrm{Z_2} = \frac{29,238}{0,98776} = 29.5999\ \Omega$$

$$\frac{\mathrm{R_2}}{\mathrm{s}} = \sqrt{(29.5999)^2 - (7,764)^2} = 28.564\ \Omega$$

De la prueba de voltaje reducido se obtiene el deslizamiento en p.u. y se despeja de la relación $\frac{R_2}{s}$, por lo tanto, para obtener la resistencia del rotor.

$$s = \frac{1800 - 1319}{1800} = 0{,}2672 \text{ p.u.}$$

$$R_2 = 28.564 \cdot 0{,}2672 = 7.633\ \Omega = 0{,}0847 \text{ p.u.}$$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de los valores determinados en el presente trabajo de titulación y los recopilados de distintas máquinas similares a las estudiadas, mediante la detección de valores típicos y atípicos por medio de las técnicas de la envolvente elíptica y del factor local existentes en la biblioteca de Python.

Python es un software libre, de entorno amigable con el usuario, ofrece un lenguaje de programación de alto nivel y una cantidad de bibliotecas que permiten al usuario reducir sus líneas de código considerablemente.

4.1 Análisis de la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes

Los datos en p.u. recopilados de distintas máquinas de imanes permanentes se presentan en la Tabla 4.1. Con la finalidad de comprobar la validez de los datos obtenidos con las diferentes pruebas, los resultados se analizan mediante las dos técnicas mencionadas previamente.

Tabla 4.1 Datos de máquinas de imanes permanentes

PMSM								
	No.	**S [VA]**	**V [V]**	**P [W]**	**R [p.u.]**	**Ld [p.u.]**	**Lq [p.u.]**	**J [kg m^2]**
[41]	1	107441	380	100000	0,018688	0,87	0,49	
[42]	2	35000	1,05E03	28000	0,004762	0,00002	0,00002	
[43]	3	24750	343,826	19800	0,035592	0,000398	0,000398	0,008
[44]	4	3429	220	2743	0,290512	0,001417	0,001417	
[32]	5	3000	380	2400	0,047555	0,000962	0,000962	0,0588
[45]	6	2750	370	2200	0,072264	0,000725	0,001027	0,015
[46]	7	1908	380	470	0,031063	0,000132	0,000204	
[47]	8	928,75	400	743	0,030924	0,000544	0,00164	0,001586
[48]	9	500	222,058	400	0,036504	0,000203	0,000203	0,00008
	10	**312**	**60,047**	**260**	**0,1242**	**0,001491**	**0,001481**	**0,00075732**
[49]	11	125	79,31	100	0,148058	0,000179	0,000179	

Los valores de la PMSM analizada corresponden a la décima máquina de la Tabla 4.1.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se presentan los resultados obtenidos del análisis con las técnicas de la envolvente elíptica y del factor local.

De las dos técnicas de análisis se observa que el valor de resistencia e inductancia de eje directo determinadas en este trabajo, se encuentran dentro del rango de valores típicos para este tipo de máquinas. Los parámetros de las máquinas que presentan valores

alejados de los comunes son la primera para la técnica de la envolvente elíptica, y la quinta para la técnica del factor local.

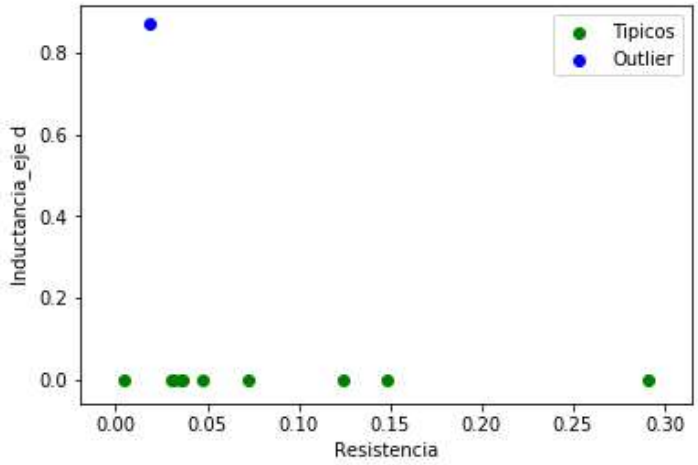


Figura 4.1 Valores atípicos resistencia-inductancia de eje directo empleando la técnica de la envolvente elíptica

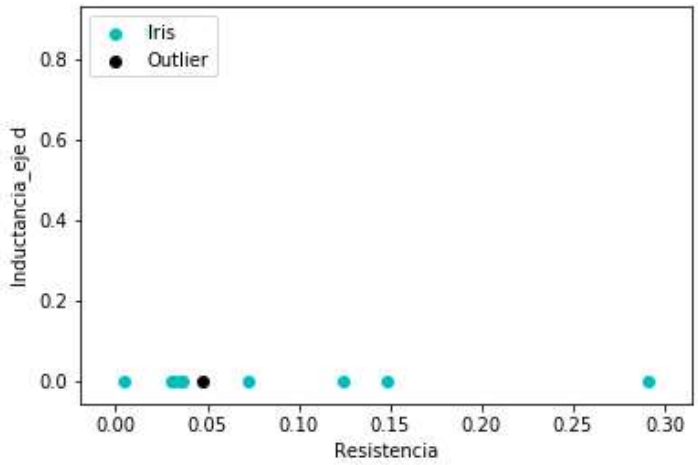


Figura 4.2 Valores atípicos resistencia-inductancia de eje directo empleando la técnica del factor local

El mismo procedimiento se lleva a cabo para los valores de inductancia de eje de cuadratura. Los resultados para las técnicas de la envolvente elíptica y del factor local se presentan en las Figuras 4.3 y 4.4, respectivamente.

De igual manera se observa que el valor de inductancia de eje de cuadratura determinado mediante pruebas se encuentra dentro del conjunto de valores característicos en máquinas de imanes permanentes. Del análisis se obtiene que los valores correspondientes a la

primera máquina para la técnica de la envolvente, y octava máquina para la técnica del factor local se encuentran fuera de los valores típicos.

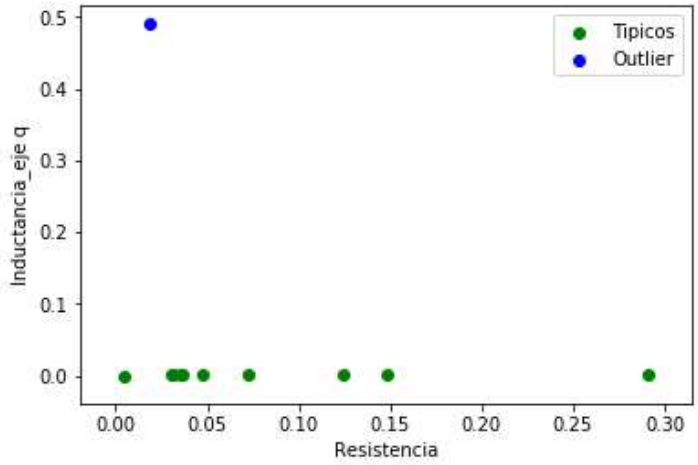


Figura 4.3 Valores atípicos de resistencia – inductancia de eje de cuadratura empleando la técnica de la envolvente elíptica

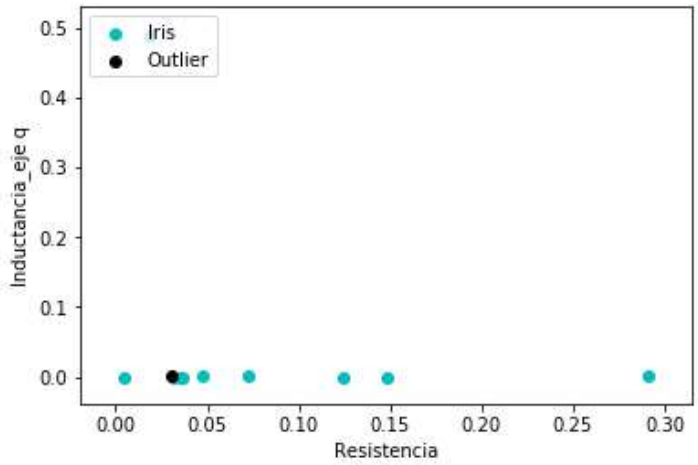


Figura 4.4 Valores atípicos de resistencia – inductancia de eje de cuadratura empleando la técnica del factor local

Los resultados obtenidos del análisis del momento de inercia determinados por las técnicas de la envolvente elíptica y del factor local, se presentan en las Figuras 4.5 y 4.6, respectivamente.

El momento de inercia de la máquina de imanes permanentes existente en el emulador de generación eólica se encuentra dentro de los valores característicos para este tipo de máquinas. De igual manera se observa que la tercera y quinta máquina difieren del conjunto de valores analizados en cada técnica.

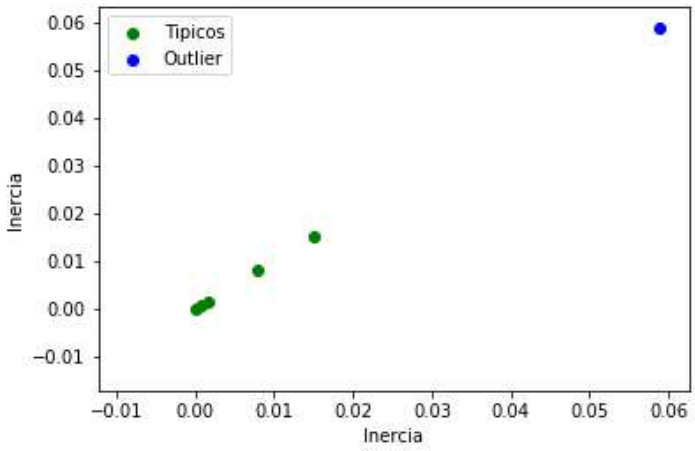


Figura 4.5 Valores atípicos del momento de inercia empleando la técnica de la envolvente elíptica

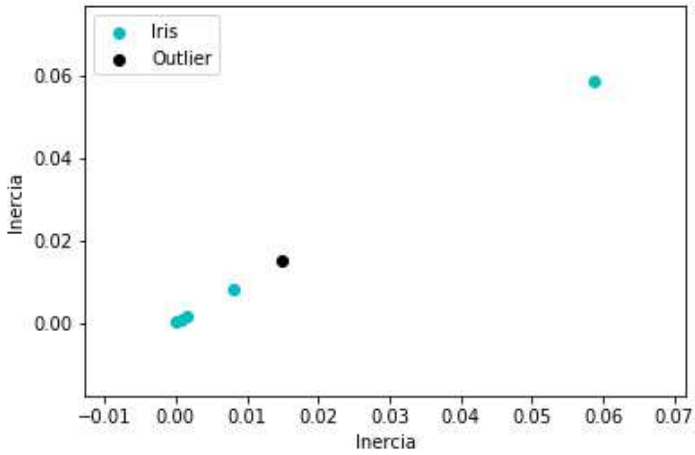


Figura 4.6 Valores atípicos del momento de inercia empleando la técnica del factor local

Los parámetros que se analizaron de la máquina en estudio en este trabajo de titulación se encuentran dentro de valores característicos con relación a los de distintas PMSM. Para el resto de los parámetros, no fue llevado a cabo el análisis al no tener los datos suficientes para realizar la comparación de manera adecuada.

4.2 Análisis de la Máquina de Rotor Devanado Doblemente Alimentada

El análisis de los parámetros obtenidos en la DFIG se realiza con los resultados de su funcionamiento como motor de inducción, debido a que los parámetros encontrados para este tipo de máquinas proporcionan los valores solo como motor.

En la Tabla 4.2 se presenta un conjunto de parámetros de diferentes máquinas de rotor devanado doblemente alimentadas. Los datos son transformados a p.u. para facilitar su análisis.

Tabla 4.2 Datos de las máquinas de rotor devanado doblemente alimentadas

Valores DFIG										
	No.	**P [W]**	**V [V]**	**I [A]**	**S [VA]**	**Rs [p.u.]**	**Xs [p.u.]**	**Rr [p.u.]**	**Xr [p.u.]**	**Xm [p.u.]**
[50]	1	1,50E+06	690	1068,2	2,20E+06	0,008400	0,1670000	0,008300	0,1323	5,419
[50]	2	1,00E+06	575	829,2	1,43E+06	0,0111	0,1487	0,0108	0,1366	4,6978
[50]	3	5,00E+06	950	2578,4	7,35E+06	0,0086	2,2141	8,00E-03	1,9483	9,6044
[51]	4		690		1,00E+08	0,00488	0,09231	0,00549	0,09955	3,9528
[50]	5	6,00E+06	4000	733,9	8,80E+06	0,0101	0,0273	0,0097	0,0257	3,0522
[52]	6	3,00E+03	220	14,7	5601,45	0,07060	1,7336	0,07523	2,9494	2,7880
[53]	7				1,67E+06	0,0070	0,1420	0,0050	0,1300	2,4170
[54]	8				2,00E+06	0,0030	0,1100	0,0030	0,0700	2,5000
[55]	9				2,00E+06	0,0050	0,1390	0,0050	0,1490	3,9530
[56]	10				1,00E+07	0,0070	0,1710	0,0190	0,0400	2,9000
[57]	11	1,27E+06	690		1,81E+06	0,0214	0,2698	0,0219	0,1852	12,1467
	12	**200**	**208**	**1,33**	**480**	**0,0929**	**0,0740**	**0,08467**	**0,0740**	**1,0690**

Los parámetros de la DFIG analizada en este trabajo corresponden a la doceava máquina de la Tabla 4.2.

El análisis de los valores de resistencia y reactancia de armadura mediante las técnicas de la envolvente elíptica y del factor local se presentan en las Figuras 4.7 y 4.8, respectivamente.

En los resultados obtenidos se observa que los valores de resistencia y reactancia de armadura de la máquina bajo estudio en este trabajo de titulación se encuentran dentro del rango de valores comunes para este tipo de máquinas, a pesar de estar separados del conjunto de datos. Las máquinas que presentan valores alejados de los típicos son la tercera y sexta para la técnica de la envolvente elíptica y la tercera y onceava para la técnica del factor local.

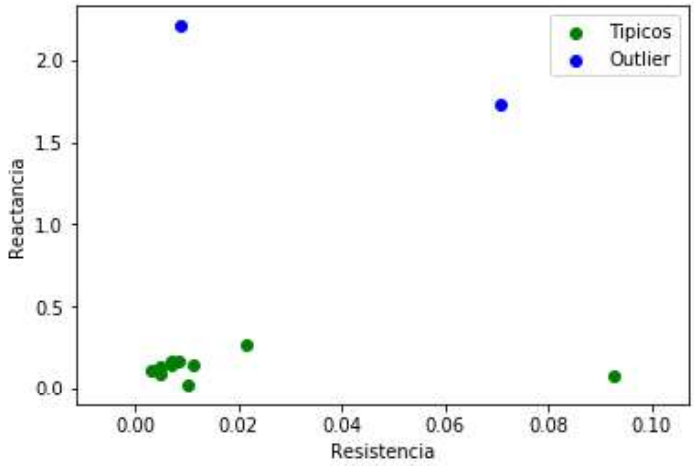


Figura 4.7 Valores atípicos de la resistencia – reactancia empleando la técnica de la envolvente elíptica

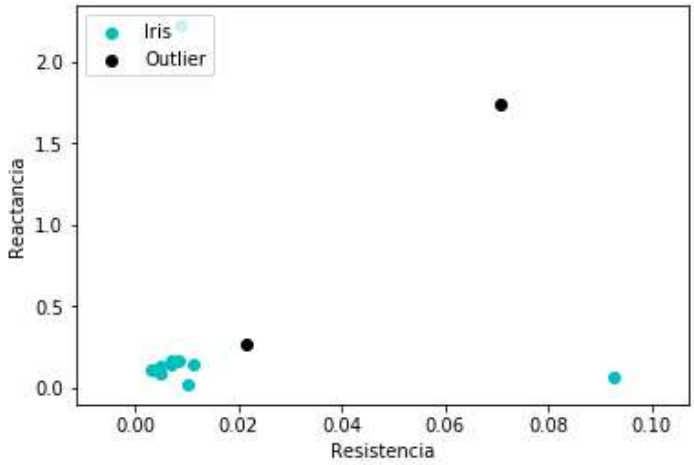


Figura 4.8 Valores atípicos de la resistencia – reactancia empleando la técnica del factor local

Los resultados del análisis de los datos de resistencia y reactancia del rotor se presentan en las Figuras 4.9 y 4.10, respectivamente.

Se observa que los valores determinados de resistencia y reactancia del rotor se encuentran dentro del rango de valores típicos. Se obtuvo un resultado similar al conseguido en el análisis de la resistencia y reactancia de armadura.

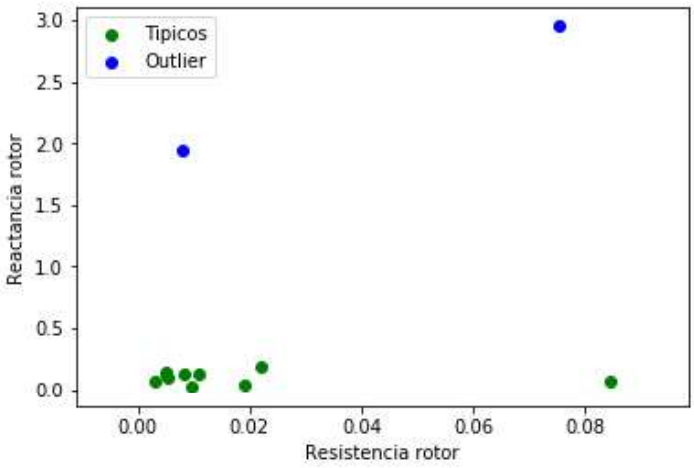


Figura 4.9 Valores atípicos de la resistencia – reactancia del rotor empleando la técnica de la envolvente elíptica

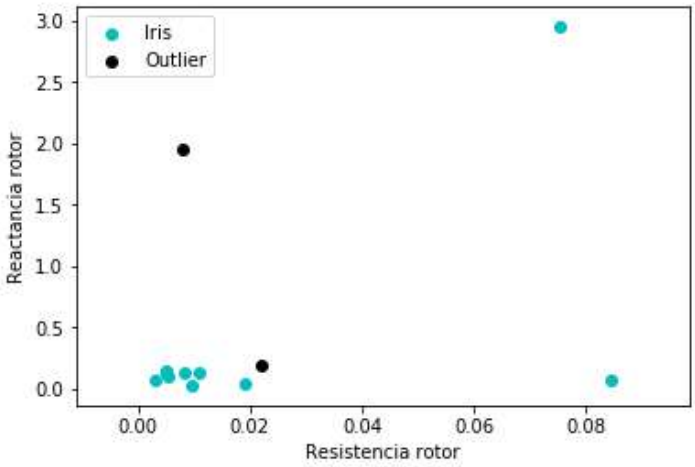


Figura 4.10 Valores atípicos de la resistencia – reactancia del rotor empleando la técnica del factor local

El análisis de la reactancia de magnetización correspondientes a las técnicas propuestas se presenta en la Figura 4.11 y 4.12.

Se observa que el valor de reactancia de magnetización se encuentra dentro de los valores característicos respecto a este tipo de máquinas. Las máquinas que presentan valores alejados de los comunes son la tercera y onceava para la técnica de la envolvente elíptica y la primera y segunda máquina para la técnica del factor local.

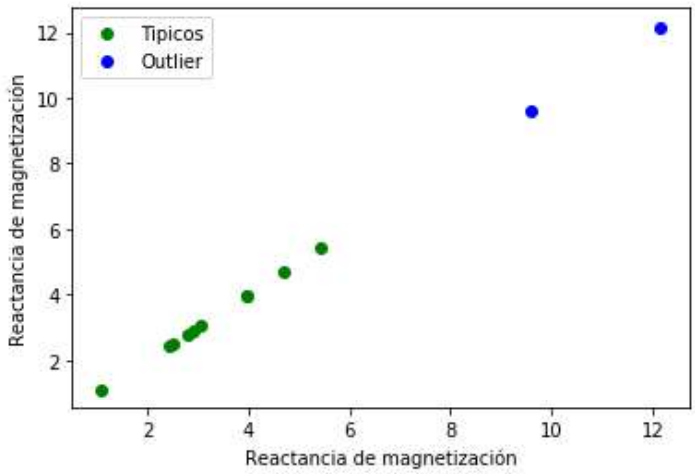


Figura 4.11 Valores atípicos de la reactancia de magnetización empleando la técnica de la envolvente elíptica

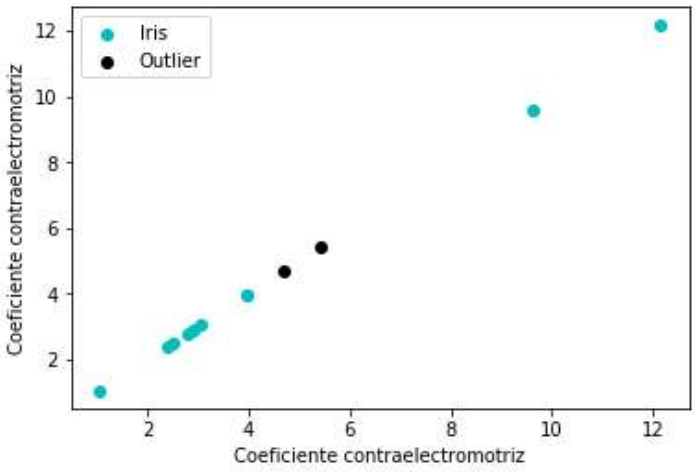


Figura 4.12 Valores atípicos de la reactancia de magnetización empleando la técnica del factor local

Todo el análisis llevado a cabo da como resultado que los parámetros encontrados en este trabajo de titulación para la DFIG funcionando como motor de inducción se encuentran dentro de los valores característicos de este tipo de máquinas. Los parámetros alejados del conjunto de valores comunes no representan que sean erróneos, indican que fueron obtenidos mediante otras metodologías o que sus potencias son demasiado grandes en comparación a las demás máquinas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las pruebas de campo para la medición de los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas PMSM y DFIG, en el emulador de generación eólica, se realizan utilizando la norma IEEE Std. 1812 - 2014 y varias metodologías investigadas para la máquina sincrónica de imanes permanentes, mientras que, para la máquina de rotor devanado doblemente alimentada, funcionando como generador sincrónico o motor de inducción, se utilizan las normas IEEE Std. 115 – 2009 e IEEE Std. 112 – 2017, respectivamente.

- Los parámetros eléctricos de la PMSM se obtienen del funcionamiento de la máquina como generador; en tanto que, los parámetros mecánicos se determinan con la máquina operando como motor.

- La respuesta de la corriente ante un cortocircuito trifásico súbito en una PMSM es diferente al obtenido en una máquina convencional, ya que, al no poseer devanado de campo su respuesta va a carecer de parte transitoria y debido a la ausencia de devanado de amortiguamiento no existe parte subtransitoria, teniendo de este modo solamente parte estable.

- Se emplea un medidor RLC para determinar la inductancia de armadura de la PMSM, además se utilizan otras tres metodologías, las mismas que presentan valores cercanos entre ellos. Estas pequeñas variaciones pueden estar relacionados con la magnetización de los imanes en los ensayos ejecutados.

- De la prueba de voltaje de paso aplicado al estator de la PMSM, se obtienen valores de 2,8095 Ω y 2,7915 Ω; para las reactancias de eje directo y de cuadratura, respectivamente. Se observa que ambas reactancias son aproximadamente iguales debido a que el rotor de la PMSM posee imanes montados en su superficie.

- Los valores obtenidos para el momento de inercia y la constante de inercia en la PMSM son de 0,00073752 kg.m^2 y 1,32 s, respectivamente. Estas magnitudes bajas son representativas de una máquina de imanes superficiales.

- De las diferentes pruebas ejecutadas se obtuvo los valores de $5 \times 10^{-5}\ \mathrm{N.m.s}$, $0{,}1253\ \mathrm{N.m}$ y $2{,}397\ \frac{\mathrm{p.u.W}}{\mathrm{p.u.}\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}}$ para los coeficientes de rozamiento viscoso y seco y del coeficiente de amortiguamiento, respectivamente.

- Las distintas pruebas aplicadas en la DFIG permiten conocer que este tipo de máquinas pueden trabajar como generador sincrónico o como motor de inducción, de las cuales se determinan sus diferentes parámetros.
- Para el funcionamiento de la DFIG como generador sincrónico es necesario cortocircuitar dos bobinas del rotor, este conjunto de bobinas se convierte en el devanado de amortiguamiento, mientras que la restante se convierte en el devanado de campo.
- La DFIG es de rotor devanado, a pesar de esto, la reactancia de eje directo es mayor a la del eje de cuadratura, debido a que el devanado del rotor no está colocado en un cilindro macizo sino en un rotor dentado.
- De las pruebas de cortocircuito trifásico súbito y de recuperación de voltaje ejecutadas en la DFIG, se observa que las constantes de tiempo son 0,02296 s, 0,00337 s, 0 s, 0,01487 s para las constantes de tiempo de cortocircuito transitoria y subtransitoria y de circuito abierto subtransitoria y transitoria, respectivamente. Estas constantes de tiempo son pequeñas debido a que la máquina no es de gran tamaño y también porque la constante de tiempo eléctrico (τ=L/R=0,001207 s) es pequeña para esta máquina.
- El valor de la constante de inercia de la DFIG del emulador de generación eólica medido es 0.811 s, este valor es pequeño en comparación a los de máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas por su menor tamaño.
- De los datos obtenidos de las pruebas de rechazo de carga y pérdida de fuerza electromotriz se obtiene un valor de coeficiente de amortiguamiento de $1{,}0115\ \frac{\text{p.u.W}}{\text{p.u.}\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$.

  Este valor es menor al obtenido con la PMSM ya que a la DFIG le lleva más tiempo detenerse completamente al quitarle su alimentación.
- Para adquirir los datos de frecuencia en las pruebas de rechazo de carga y pérdida de fuerza electromotriz, se emplea un codificador óptico que envía señales a una tarjeta de adquisición de datos, la misma que muestra resultados mediante una aplicación desarrollada en el software LabVIEW. Dentro del programa se realiza un filtro que reduce el ruido proveniente de la fuente que alimenta al codificador óptico y perturbaciones ambientales como la luz.
- El software libre Python es de gran ayuda por sus extensas bibliotecas que permiten realizar el análisis de los parámetros obtenidos en las pruebas realizadas en las

máquinas PMSM y DFIG, mediante técnicas para la obtención de valores atípicos, optimizando el tiempo empleado en este análisis.

- Para la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, se aplican las técnicas de la envolvente elíptica y del factor local, que clasifican entre diferentes datos, los valores alejados de un conjunto típico dado.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la modelación de las máquinas existentes en el Emulador de Generación Eólica utilizando los parámetros encontrados en este trabajo de titulación y simular sus comportamientos bajo diferentes condiciones de operación.
- Se recomienda realizar las pruebas en las máquinas estudiadas dejando enfriar los devanados antes de volver a ejecutarlas, debido a que los imanes pueden magnetizarse o los devanados calentarse, con la probabilidad de proporcionar datos erróneos.
- Se recomienda utilizar la aplicación diseñada para la determinación de la inercia en las prácticas de laboratorio, ya que la luz no limitaría el uso del encoder óptico debido a la implementación de un filtro.
- Se recomienda utilizar algunas herramientas del emulador de generación eólico en mediciones de corriente, voltaje y armónicos en futuros trabajos de titulación y prácticas de Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia.
- Se recomienda continuar con trabajos de titulación encaminados al uso energías renovables, así como también a desarrollar distintos controles para las máquinas PMSM y DFIG.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] L. G. González, E. Figueres, G. Garcerá, and O. Carranza, “Design of a wind energy conversion emulator system,” vol. 38, no. 2, p. 10, 2015.

[2] “Simulador parque eolico, Modelo 46128,” p. 8.

[3] “LabVolt Series by Festo Didactic - Data Acquisition and Control Interface (9063-00),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/2_electronics/50-9063-00_data_acquisition_and_control_interface. [Accessed: 29-Aug-2018].

[4] “LabVolt Series by Festo Didactic - Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply (8960-00),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/6_power_energy/98-8960-00_four_quadrant_dynamometer_power_supply. [Accessed: 29-Aug-2018].

[5] “LabVolt Series by Festo Didactic - Permanent Magnet Synchronous Machine (8245-00),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/50-8245-00_permanent_magnet_synchronous_machine. [Accessed: 29-Aug-2018].

[6] “LabVolt Series by Festo Didactic - Three-Phase Wound-Rotor Induction Machine (8231-B0),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8231-B0_three_phase_wound_rotor_induction_machine. [Accessed: 29-Aug-2018].

[7] “LabVolt Series by Festo Didactic - IGBT Chopper/Inverter (8837-B0),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8837-B0_igbt_chopper_inverter. [Accessed: 29-Aug-2018].

[8] “LabVolt Series by Festo Didactic - Lead-Acid Battery Pack (8802-10),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/50-8802-10_lead_acid_battery_pack. [Accessed: 29-Aug-2018].

[9] “LabVolt Series by Festo Didactic - Power Supply (8823-00),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8823-00_power_supply. [Accessed: 29-Aug-2018].

[10] “LabVolt Series by Festo Didactic - Resistive Load (8311-00),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/50-8311-00_resistive_load. [Accessed: 29-Aug-2018].

[11] “LabVolt Series by Festo Didactic - Rectifier and Filtering Capacitors (8842-A0),” 29-Aug-2018. [Online]. Available: https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8842-A0_rectifier_and_filtering_capacitors. [Accessed: 29-Aug-2018].

[12] R. Habash, “Wind Turbine Generators for Wind Power Plants,” p. 16.

[13] B. Babu, “Comparative study of different types of generators used in wind turbine and reactive power compensation,” p. 5.

[14] J. M. G. Alvarez and J. C. G. Targarona, “Generación Eólica Empleando Distintos Tipos de Generadores considerando su Impacto en el Sistema de Potencia,” *DYNA*, vol. 78, no. 169, pp. 95–104, Sep. 2011.

[15] Aldo Juan Quiñones Baltodano, “Caracterización del Generador de Imanes Permanentes,” Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perù, 2015.

[16] “Curva de Histeresis - Magnetismo - centrobioenergetica.” [Online]. Available: http://centrobioenergetica.squarespace.com/magnetismo/2012/4/15/curva-de-histeresis.html. [Accessed: 09-Oct-2018].

[17] Juha Pyrhönen, “Electrical Drives_Capitulo 9.” Lappeenranta University of Technology.

[18] Aldo Juan Quiñones Baltodano, “Caracterización del Generador de Imanes Permanentes,” Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perù, 2015.

[19] María Auxiliadora Simón Gómez, “Diseño de un Motor de Flujo Axial de Imanes Permanentes,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.

[20] admin, “Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) – Construction and Working Principle,” *Electrical Concepts*, 16-Jun-2018. .
[21] Javier Sola Sanz, “Cálculo y Reducción de Pérdidad en Máquinas de Imanes Permanentes,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Pamplona, 2012.
[22] S. Yamamura, “Saliency torque and V-curve of permanent-magnet-excited synchronous motor,” *Proc. Jpn. Acad. Ser B Phys. Biol. Sci.*, vol. 76, no. 6, pp. 77–81, 2000.
[23] José M. Aragay Iravedra, “Desarrollo de un Sistema de Control por DSP para Regular Generadores Síncronos de Imanes Permanentes,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Madrid, 2015.
[24] Lab-Volt, “Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG).” May-2011.
[25] J. R. López, A. V. Espinoza, and R. C. Dobson, “Análisis del Diseño y Control de un Generador Trifásico Doblemente Alimentado,” p. 136.
[26] Ing. Julio Alvarez, “Motores de inducción.” Dec-2009.
[27] “APUNTES_MAQUINAS_ELECTRICAS-_U_3_v1.1.pdf.” .
[28] C. M. Flores Urgiles and M. S. Ortiz Amoroso, “Revisión de algoritmos para la detección de valores atípicos,” *Kill. Téc.*, vol. 2, no. 1, p. 19, Jun. 2018.
[29] J. A. M. García and I. A. Uribe, “Técnicas para detección de outliers multivariantes,” p. 15.
[30] A. Salcedo, “Electricidad y algo más: Medición de Resistencias,” *Electricidad y algo mas*. [Online]. Available: http://alirafasalcedo.blogspot.com/2015/06/medicion-de-resistencias.html. [Accessed: 30-Nov-2018].
[31] *IEEE Draft Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines*. Place of publication not identified: IEEE, 2013.
[32] Mónica Chinchilla Sánchez, “Control de un Sistema de Generación Eólica de Velocidad Variable con Generador Síncrono Multipolar de Imanes Permanentes acoplado a red.,” Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2001.
[33] Espadas Escalante, J.; Ricalde Castellanos, L.; Ordóñez López, E., “Diseño e implementación de un control de máxima potencia para un sistema de generación de energía eólica con generador síncrono de imán permanente.,” *Ingeniería*, vol. 16, no. núm. 1, p. 120, 2012.
[34] V. Bobek, “PMSM electrical parameters measurement,” p. 16, 2013.
[35] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill/Interamericana de Mexico, 1996.
[36] G. Choi and T. M. Jahns, “Investigation of Key Factors Influencing the Response of Permanent Magnet Synchronous Machines to Three-Phase Symmetrical Short-Circuit Faults,” p. 6.
[37] S. E. A. Perez and V. del R. C. Gualoto, “Diseño y Construcción de un Controlador Electrónico de Velocidad con Freno Regenerativo para una Plataforma Autónoma Móvil Terrestre con Tracción Diferencial,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
[38] “¿Qué es Adquisición de Datos? - National Instruments.” [Online]. Available: https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/. [Accessed: 02-Dec-2018].
[39] IEEE-SA Standards Board and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE guide for test procedures for synchronous machines. Part I, Part II, Part I, Part II,*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
[40] IEEE Power Engineering Society, Electric Machinery Committee, American National Standards Institute, and IEEE-SA Standards Board, *IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators*. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.
[41] W. E. J. Montecinos, “Axial Flux Permanente Magnet Machines - Development of Optimal Design Strategies,” Universidad de Concepción, Chile, 2016.
[42] P. B. Rosenmann, “Diseño de Aerogeneradores con Imanes Permanentes para Aplicaciones en Electrificación Rural,” Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007.

[43] D. A. Cartes and L. Liu, “Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 1, no. 4, pp. 1015–1022, Jul. 2007.
[44] Kye-Lyong Kang, Jang-Mok Kim, Keun-Bae Hwang, and Kyung-Hoon Kim, “Sensorless control of PMSM in high speed range with iterative sliding mode observer,” in *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC ’04.*, Anaheim, CA, USA, 2004, vol. 2, pp. 1111–1116.
[45] A. Piippo, M. Hinkkanen, and J. Luomi, “Adaptation of Motor Parameters in Sensorless PMSM Drives,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 1, pp. 203–212, 2009.
[46] G. Xie, “Design of Parameter Independent, High Performance Sensorless Controllers for Permanent Magnet Synchronous Machines,” Aalborg University, 2015.
[47] Z. M. Al-Hamouz, A. S. Milhem, L. S. Maraaba, and S. Twaha, “Comprehensive Parameters Identification and Dynamic Model Validation of Interior-Mount Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors,” 2019.
[48] K.-Y. Cheng and Y.-Y. Tzou, “Fuzzy Optimization Techniques Applied to the Design of a Digital PMSM Servo Drive,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 4, pp. 1085–1099, Jul. 2004.
[49] S. Moreau, R. Kahoul, and J.-P. Louis, “Parameters estimation of permanent magnet synchronous machine without adding extra-signal as input excitation,” in *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Ajaccio, France, 2004, pp. 371–376 vol. 1.
[50] B. Wu, Y. Lang, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
[51] L. Fan and Z. Miao, “Mitigating SSR Using DFIG-Based Wind Generation,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 349–358, Jul. 2012.
[52] D. Chwa and K.-B. Lee, “Variable Structure Control of the Active and Reactive Powers for a DFIG in Wind Turbines,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2545–2555, Nov. 2010.
[53] M. Mohseni, S. M. Islam, and M. A. S. Masoum, “Impacts of Symmetrical and Asymmetrical Voltage Sags on DFIG-Based Wind Turbines Considering Phase-Angle Jump, Voltage Recovery, and Sag Parameters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 1587–1598, May 2011.
[54] D. Zhi and L. Xu, “Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 110–118, Mar. 2007.
[55] Peng Zhou, Yikang He, and Dan Sun, “Improved Direct Power Control of a DFIG-Based Wind Turbine During Network Unbalance,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 11, pp. 2465–2474, Nov. 2009.
[56] S. Abdeddaim and A. Betka, “Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 49, pp. 234–242, Jul. 2013.
[57] M. Kayikci and J. V. Milanovic, “Assessing Transient Response of DFIG-Based Wind Plants—The Influence of Model Simplifications and Parameters,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 545–554, May 2008.

ORDEN DE EMPASTADO