
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



DIAGNÓSTICO DE FALLAS ELÉCTRICAS EN
AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. JOSÉ DE JESÚS RAMOS RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO JAVIER VILLALOBOS PIÑA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSUÉ AUGUSTO REYES MALANCHE

AGUASCALIENTES, AGS.

DICIEMBRE 2024



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags, **03/diciembre/2024**
Oficio No. DEPI 490/2024

C. JOSÉ DE JESÚS RAMOS RODRÍGUEZ
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos CONSTAR que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título **"Diagnóstico de fallas eléctricas en aerogeneradores de pequeña potencia"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica-
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia-*

PRESIDENTE

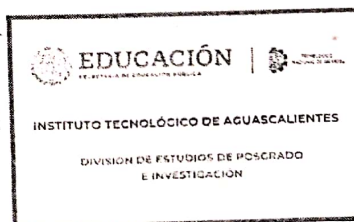
Fro. Javier Villalobos Piña
DR. FRANCISCO JAVIER VILLALOBOS PIÑA

SECRETARIO

José A. Reyes M.
DR. JOSUÉ AUGUSTO REYES MALANCHE

VOCAL

DR. J. RAFAEL MOLINA CONTRERAS



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens. C.P. 20256, Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx www.tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



Escaneado con CamScanner



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **12/diciembre/2024**
Asunto: Constancia de Originalidad

**CONSEJO DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE**

El director de tesis de el/la **C. José de Jesús Ramos Rodríguez**, estudiante de **Maestría en Ciencias de la Ingeniería** con número de control **G22153221**, hace constar que, después de haber realizado la revisión del informe de originalidad generado con la herramienta Turnitin, el trabajo **"DIAGNÓSTICO DE FALLAS ELÉCTRICAS EN AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA"** es original conforme a los criterios establecidos. El porcentaje de similaridad es de **07%** y se adjunta resumen del reporte.

ATENTAMENTE

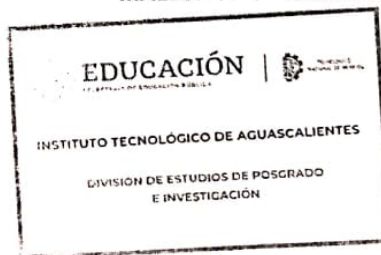
*Excelencia en Educación Tecnológica
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia*

Pro. *José Villalobos Piña*
DR. FRANCISCO JAVIER VILLALOBOS PIÑA
PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO
DPTO. DE ING. ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ccp. Archivo

Vo.Bo.

mard81
DR. MARIO ALBERTO RODRÍGUEZ DÍAZ
COORDINADOR
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 9105002 Ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **10/enero/2025**
Asunto: Autorización de uso de derechos

José de Jesús Ramos Rodríguez, mayor de edad, con domicilio ubicado en Av. Conversión de 1914 Oriente #109, Colonia Francisco Gual Jimeñez, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada DIAGNÓSTICO DE FALLAS ELÉCTRICAS EN AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA, quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrará por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: EL AUTOR Y/O TITULAR, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada DIAGNÓSTICO DE FALLAS ELÉCTRICAS EN AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 9105002 Ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

SEXTA - DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciabiles e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de EL AUTOR Y/O TITULAR, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA - AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica.
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia*

José de Jesús Ramos Rodríguez
AUTOR DE LA TESIS

Vo.Bo.

Dr. Francisco Javier Villalobos Piña
DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 9105002 Ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



Resumen

El presente trabajo se centra en el diagnóstico de fallas eléctricas en el estator de un aerogenerador de baja potencia, el cual consta de un generador síncrono de imanes permanentes(PMSG por sus siglas en ingles), debido a que este tipo de generador es uno de los mas utilizados en la industria de la energía eólica. Dicho generador, es acoplado a un banco de pruebas con un motor de DC el cual tendra la función de simular patrones de viento. En el presente trabajo se estudian y se aplican diferentes herramientas utilizadas para el procesamiento de señales para darles un enfoque específico a la identificación y diagnóstico de fallas electricas de cortocircuito entre vueltas del devanado del estator.

La tesis incluye una revisión al estado del arte de las fallas de las máquinas eléctricas comenzando con todos los tipos de fallas que pueden existir para este tipo de máquinas como lo pueden ser mecanicas y eléctricas, para despues realizar un enfoque específico en las fallas eléctricas, alcanzando información sobre la actualidad de este tipo de fallas, asi como los trabajos realizados con anterioridad.

La tesis tambien cuenta con un modelado matematico de un motor de DC con el propósito de implementar un lazo de control cerrado mediante un control PID, para poder ejecutar y simular patrones de viento reales, y no solo realizar estudios a velocidades constantes, debido a que el proposito de la tesis es diagnosticar fallas eléctricas en un ambiente controlado no muy lejano de la realidad. Se describe el procedimiento y fundamentos de las diferentes tecnicas utilizadas para el análisis de las señales asi como lo es la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en ingles) o como lo pueden ser las ondeletas. En el caso particular de este trabajo se optó por utilizar las ondeletas madres Haar, Daubechies2, Daubechies4 y Coiflet4. Dichas herramientas son utilizadas para el analisis en frecuencia del modulo del fasor de espacio instantáneo de Park(ISP por sus siglas en ingles) el cual nos permite saber si existe algun desbalance en alguna de las señales trifasicas llevandolas a un marco de referencia α y β . Observando la capacidad del ISP para la detección y diagnóstico de fallas.

Dedico este trabajo a mi esposa, mi hijo y a mis padres.

Agradecimientos

Al Dr. Francisco Javier Villalobos Piña por todas la enseñanzas mostradas a lo largo de este camino, por compartir su conocimiento y por haberme asesorado de una manera excelente a lo largo de la maestría. A todos los profesores que siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos sobre los diversos temas necesarios para poder alcanzar este objetivo. Al TecNM por brindar el espacio y las oportunidad de enseñanza con programas de estudio como lo es la Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Al CONACYT por el apoyo economico brindado a lo largo del proyecto. A mis padres por apoyarme a lo largo de este proyecto.

Quiero agradecer tambien a mi esposa, Sandra, gracias por apoyarme siempre no solo durante este proceso si no tambien en todos los aspectos, gracias por ayudarme a no perder de vista el camino.

Lista de Símbolos

Símbolo	Descripción
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
A	Ampere
V_{cd}	Voltaje de corriente directa.
MW	Mega Watts
Hp	Caballos de fuerza
$PMSG$	Generador síncrono de imanes permanentes
$AGSPM$	Generador asíncrono de imanes permanentes
$DFIG$	Generador de inducción doblemente alimentado
IG	Generador de inducción
ISP	Fasor espacial instantáneo de Park
DFT	Transformada Discreta de Fourier
FFT	Transformada Rápida de Fourier
CWT	Transformada continua de ondeleta
DWT	Transformada discreta de ondeleta
$a - b - c$	Marco de referencia $a - b - c$ (trifásico)
$\alpha - \beta$	Marco de referencia alfa-beta
τ	Tau
ω	Velocidad angular

Índice general

Resumen	VII
Dedicatoria	IX
Agradecimientos	XI
Lista de Símbolos	XIII

Índice General

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Introduccion	1
Antecedentes	3
Máquinas Eléctricas	4
Máquina de Corriente Directa	4
Máquina de Inducción	5
Máquina síncrona	5
Máquina síncrona de Imanes Permanentes	6
Aerogeneradores	6
Generador de imanes permanentes	11
Generador de flujo axial	12
Generador de flujo radial	13
Aerogeneradores de baja potencias	13
Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas	15

Fallas eléctricas	16
Fallas eléctricas del Estator	16
Fallas mecánicas	20
Fallas de Rodamientos	21
Fallas de Excentricidad	22
Tipos de Fallas en Aerogeneradores	23
Fallas Eléctricas	23
Fallas Mecánicas	27
Técnicas de diagnóstico de Fallas	27
Modelos basados en procesamiento de señales.	28
Herramientas de Diagnóstico de Fallas Utilizadas con la Técnica MCSA . . .	30
Modulo del Fazor Espacial de Park (ISP).	30
Algoritmo del fazor espacial instantáneo de Park (ISP). . . .	32
Transformada Discreta de Fourier	34
Series continuas de Fourier	34
Transformada discreta de Fourier(DTF).	35
Transformada Rápida de Fourier (FFT)	36
Transformada Discreta de Ondeleta (DWT)	41
Ondeleta Madre de Haar	44
Ondeleta Madre de Daubichies	45
Ondeleta Madre de Coiflet	46
Algoritmo de la DWT Haar.	46
Transformada discreta de ondeleta Daubechies 4.	49
Transformada discreta de ondeleta Coiflet 4.	50
Protocolo de tesis.	51
Objetivo General	51
Objetivos Especificos	51
Hipotesis	52
Justificación	52
1. Metodologia.	53
1.1. Adecuación de banco de pruebas experimentales para generar patrones de viento.	53
1.1.1. Chopper de un cuadrante para el control del motor de CD	54
1.1.2. Etapa de acoplamiento del sistema electrónico de potencia y el sistema de control.	55

1.1.3.	Incorporación de imanes de neodimio al ventilador del motor de CD y diseño del sensor de efecto Hall	56
1.1.4.	Unidad central de procesamiento	58
1.1.5.	Fuentes de alimentación del sistema	58
1.1.6.	Sistema de adquisición de corrientes del estator del PMSG.. . . .	59
1.1.7.	Proceso de identificación del motor de CD	61
1.1.7.1.	Función de transferencia del dominio del tiempo continuo. . .	61
1.1.7.2.	Función de transferencia del dominio del tiempo discreto . .	63
1.1.7.3.	Sintonización de controlador tipo PID para efectuar segui- miento de velocidad	64
1.2.	Rediseño de programa de computadora para el control del sistema de patrones de viento.	67
1.2.1.	Programa de computadora para adquisición de señales de corriente del PMSG.	69
1.3.	Alteración de generador PMSG para inducir fallas eléctricas del estator. . . .	70
2.	Resultados y conclusiones.	72
2.1.	Diagnóstico de fallas eléctricas incipientes del estator del PMSG.	72
2.1.1.	Diagnóstico de falla del estator a velocidad constante caso sano. . . .	73
2.1.2.	Diagnóstico de falla del estator a velocidad constante caso con falla de 2 %.	76
2.1.3.	Diagnóstico de falla del estator a velocidad constante caso con falla de 4.5 %.	79
2.1.4.	Diagnóstico de falla simultánea del estator a velocidad constante caso con falla de 2 % y 4.5 %.	82
2.2.	Diagnóstico de falla del estator a velocidad variable caso sano.	85
2.3.	Diagnóstico de falla del estator a velocidad variable caso falla 2 %.	89
2.4.	Diagnóstico de falla del estator a velocidad variable caso falla 4.5 %.	91
2.5.	Diagnóstico de falla simultánea del estator a velocidad variable caso con falla de 2 % y 4.5 %.	93
2.6.	Conclusiones.	95
	Bibliografía	97

Índice de figuras

1.	Aerogenerador.	8
2.	Componentes del aerogenerador.	9
3.	Clasificación de los generadores.	10
4.	Generador de flujo axial.	12
5.	Generador de flujo radial.	13
6.	Relación entre diámetro de aspas y potencia producida.	14
7.	Porcentaje de fallas en máquinas eléctricas.	17
8.	Tipos de excentricidades.	23
9.	Devanado sano.	24
10.	Devanado con aislamiento degradado.	25
11.	Diferentes tipos de fallas eléctricas	27
12.	Modelo basado en procesamiento de señales.	28
13.	Corrientes trifásicas experimentales del PMSG.	33
14.	Corrientes alfa-beta del estator del PMSG	33
15.	Modulo ISP	34
16.	Arreglo unidimensional de "n" de datos	37
17.	Arreglo bidimensional de lxm datos	38
18.	Diagrama de flujo	39
19.	a)Señal fundamental, b)Primer armónico, c)Segund armónico, d)Señal conta- minada de prueba.	40
20.	Espectro de frecuencias de la señal de prueba del algoritmo de la FFT.	41
21.	Análisis Multiresolución.	44
22.	Ondeleta Haar y la magnitud de su espectro	45
23.	a) Ondeleta Daub2, b) Ondeleta Daub4	45
24.	a) Ondeleta Coif2, b) Ondeleta Coif4	46

1.1. Diagrama de bloques del sistema generador de patrones de viento.	54
1.2. Diagrama de conexiones Chopper comercial de un cuadrante.	54
1.3. Implementación experimental del Copper de un cuadrante	55
1.4. diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento.	56
1.5. Circuito impreso DAC	56
1.6. Diagrama esquemático sensor de velocidad	57
1.7. Detalle de la incorporación de los imanes de neodimio al ventilador.	57
1.8. Circuito impreso del dsPIC30F4011	58
1.9. a)Fuente $\pm 15VCD$, b) Fuente $17V$	59
1.10. Carga del generador	59
1.11. Sistema electrónico para la adquisición de señales de corriente del estator del PMSG.	60
1.12. Sistema electrónico para la adquisición de señales de corriente del estator del PMSG.	60
1.13. Motor CIMGAR de imanes permanentes	61
1.14. Representación para el sistema de control	62
1.15. Curva de reacción de velocidad del motor de CD	62
1.16. Representación para el sistema de control	62
1.17. Representación para el sistema de control	64
1.18. Diagramas de Polos y Ceros	66
1.19. Interfaz principal del programa	67
1.20. Interfaz de carga y descarga de bus	68
1.21. Interfaz control de velocidad	68
1.22. Interfaz de carga y descarga patrones de viento.	69
1.23. Programa del sistema de adquisición de datos	70
1.24. PMSG de 400W y 12V	71
1.25. Esquema de las derivaciones de falla	71
2.1. Corrientes del estator del PMSG caso sano a 200 rpm.	73
2.2. Módulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso sano a 200 rpm.	74
2.3. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso sano a 200 rpm.	75
2.4. Esquema de las derivaciones de falla	76
2.5. Corrientes del estator del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.	76
2.6. Módulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.	77
2.7. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.	78
2.8. Esquema de las derivaciones de falla	79
2.9. Señales trifásicas de Corriente en caso falla del 4.5 %	79

2.10. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso falla 4.5 % a 200 rpm.	80
2.11. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 4.5 % a 200 rpm.	81
2.12. Esquema de las derivaciones de falla	82
2.13. Corrientes del estator del PMSG caso falla simultanea 2 % y 4.5 % a 200 rpm. Señales trifasicas de Corriente en caso falla simultanea	82
2.14. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a 200 rpm.	83
2.15. FFT del Módulo del ISP fallas 2 % y 4.5 % a 200 rpm	84
2.16. Patrón sinusoidal de veclocidad de prueba.	85
2.17. Corrientes trifasicas del estator del PMSG caso sano a velocidad variable. . .	86
2.18. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso sano a velocidad varia- ble.	87
2.19. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso sano a velocidad variable (0-0.05s).	88
2.20. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso sano a velocidad variable (0.26- 0.31s).	89
2.21. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso falla 2 % a velocidad variable.	89
2.22. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 2 % a velocidad variable (0.0- 0.05s)	90
2.23. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 2 % a velocidad variable (0.26-0.31s)	90
2.24. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso fallas 4.5 % a velocidad variable.	91
2.25. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla del 4.5 % a velocidad variable (0.24-0.29s)	92
2.26. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla del 4.5 % a velocidad variable (0.50-0.55s).	92
2.27. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a velocidad variable.	93
2.28. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a velocidad variable.(0.25-0.30s).	94
2.29. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a velocidad variable.(0.52-0.57s).	94

Índice de tablas

1.	Marcas de aerogeneradores.	11
2.	Fallas de internas máquinas eléctricas.	16
3.	Fallas eléctricas de estator.	18
4.	Tipos de ondeletas madre.	42
2.1.	Escenarios de fallas para una velocidad de 200RPM	73
2.2.	Valores rms caso sano a 200 rpm	75
2.3.	Análisis MRA de ISP del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.	78
2.4.	Análisis MRA de ISP del PMSG caso falla 4.5 % a 200 rpm.	81
2.5.	Análisis MRA de ISP del PMSG caso fallas simultaneas 2 % y 4.5 % a 200 rpm.	84
2.6.	Escenarios de fallas patrón senoidal	85
2.7.	Detallado del ancho de las ventanas de Hanning implementadas.	87

Introducción

Durante mucho tiempo la sociedad ha tratado de encontrar una manera para poder facilitar los trabajos que debe realizar día con día. De esta necesidad nace la creación de máquinas y/o herramientas destinadas a realizar los trabajos con una eficacia mayor a la del ser humano. En la actualidad la evolución y la importancia que estas máquinas tienen para el ser humano puede ser observada en la vida cotidiana, como en el ámbito industrial. Una característica que comparten la mayoría de máquinas y/o herramientas es que hoy en día prácticamente todo funciona con electricidad, la cual es brindada a través de redes eléctricas. Según el Semarnat la generación de energía eléctrica puede clasificarse en dos familias: las energías no renovables y las energías renovables.

A raíz de la situación económica, social y ambiental, además del daño que provocan las energías no renovables, como la quema de hidrocarburos la cual contamina no solo el aire, si no también los mantos acuíferos, se ha decidido apuntar hacia modelos de desarrollo sustentables. Existen varias alternativas dentro de las energías renovables. El trabajo de investigación será enfocado en una fuente de energía alternativa, la energía eólica.

En México la capacidad instalada para este tipo de energía ascendió a 8.3GW, siendo esto un equivalente al 9 % de la energía eléctrica generada en el país. Según la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), en el 2018 existían 2,447 aerogeneradores formando parte de 54 parques con una generación total de 4,935 Mega Watts, resultando en un 5.08 % de la producción nacional, es importante mencionar que la industria para este tipo de energía se ha visto respaldada debido a la caída de los precios para desarrollarla ya que dicha tecnología descendió hasta el 70 % durante la última década, dando un aproximado de generación de 1kW tenga un costo aproximado de \$26USD.

Se pueden encontrar diferentes secciones como lo puede ser la minieólica la cual tiene

como frontera que la potencia generada no debe de superar los 100kW. Tambien se les conocen como aerogeneradores domesticos ó de pequeña potencia, algunas de las aplicaciones para este tipo de aerogeneradores son:

- a) Zonas aisladas: Se utilizan en zonas alejadas donde existe un gran coste o dificultad para llevar la energía de la red eléctrica. Aquí estarían no solo las viviendas o cabañas también pudieran ser granjas, torres de telecomunicación, bombeo de agua, etc.
- b) Instalaciones con un alto índice de consumo eléctrico: fábricas, desalinizadoras y otras infraestructuras.
- c) Conexión a la red: Los particulares y empresas que dispongan de un aerogenerador de este tipo pueden consumir la energía que necesitan y vender el sobrante.

Debido al aumento de la capacidad de energía eólica en México, la necesidad de utilizar energías renovables por cuestiones ambientales y si tomamos en cuenta que los aerogeneradores tienen un promedio de vida útil de entre 20 y 25 años, debemos considerar la importancia de su funcionamiento, un aspecto importante para cuidar el correcto funcionamiento de los aerogeneradores es el mantenimiento a dichos equipos. Una correcta aplicación del mantenimiento preventivo y/o predictivo juega un papel fundamental debido a que en la mayoría de casos los aerogeneradores se encuentran en zonas alejadas o de difícil acceso, además de que el funcionamiento de los aerogeneradores se basa en las corrientes del aire el cual puede variar de muchas maneras.

Existen diferentes tipos de fallas que pueden afectar a los generadores de los aerogeneradores de diferentes maneras, por ejemplo podemos encontrar algunos tipos de fallas mecánicas, dentro de las cuales encontramos algunas como lo pueden ser fractura de estator [1], fallas en los baleros [2], las cuales se encuentran dentro de las fallas más comunes.

Ahora debemos aclarar que no solo existen fallas mecánicas, también existen las denominadas fallas eléctricas. Existen varios tipos las cuales tienen su propio conjunto de problemas, estas fallas pueden presentarse por diferentes causas, como lo son cambios mecánicos, térmicos ó tensión eléctrica en base a la mayoría de los casos basados en numerosas pruebas de evaluación. Para la detección de fallas eléctricas se utiliza comúnmente la medición de señales de corriente y del flujo magnético del estator, ya que estas contienen información de las condiciones de salud de los devanados [3]. En su mayoría suelen estudiarse con ayuda de métodos no invasivos como lo son los sensores de flujo magnético. Este tipo de falla puede ocurrir debido a varios tipos de cortocircuito, como por ejemplo: entre espiras de una misma

fase, entre dos o mas bobinas del estator, un cortocircuito entre dos o más bobinas en el devanado del estator, un circuito abierto y un cortocircuito a tierra. [4].

En este trabajo se rediseño un banco de pruebas experimentales el cual permite efectuar el estudio de diagnostico y adquisición de información obtenida de manera experrmintal para las fallas eléctricas de aerogeneradores de pequeñas potencias, para aumentar la confiabilidad del equipo, asi como la reducción de costos evitando mantenimientos correctivos. En este sentido se propone la siguiente pregunta de investigación. ¿Se pueden lograr de manera eficaz el diagnóstico de fallas eléctricas en aerogeneradores de baja potencia obteniendo las corrientes trifásicas y analizándolas con herramientas espacio temporales?

Antecedentes.

El actual crecimiento de la energia eólica en México y la crisis ambiental que se vive en la actualidad, requiere que los aerogeneradores dispongan de una operación altamente confiable, por lo que un correcto monitoreo y diagnóstico de fallas juegan un papel importante para la fidelidad, seguridad y rendimiento de este tipo de generación de energia eléctrica. A continuación se muestra una revisión bibliográfica de trabajos relacionados con la detección de fallas en aerogeneradores de baja potencia.

En [5] se aborda la detección de fallas de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, en los diodos de enclavamiento y en los condensadores del enlace en corriente directa (CD) con ayuda de la transformada de ondeleta discreta(DWT por sus siglas en inglés) para los aerogenerados que funcionan con un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). En esta publicación se inducen fallas en los diodos de enclavamiento, asi como en los interruptores y los capacitores, analizando las corrientes del estator y del rotor para despues con ayuda de la DWT y la ondeleta Haar nivel 2, revisar las bandas de frecuencia donde se localizan las fallas.

En [6] se construye un banco de pruebas experimental diseñado y construido con base en una máquina de cd y un sistema electrónico de potencia que permite al motor imitar la energía mecánica del viento. Las corrientes trifasicas se transforman y se analiza el vector de Park en una máquina síncrona de imanes permanentes(PMSG por sus siglas en inglés) para la detección de fallas eléctricas en el estator, con la ayuda de la transformada rapida de Fourier (FFT por sus siglas en ingles). La falla a detectar son los circuitos abiertos del estator de la PMSG.

En [7] Se implementa una estrategia de diagnóstico de fallas para una máquina de imanes permanentes, se analizan las corrientes trifasicas del estator con ayuda del vector espacial instantáneo de Park (ISP por sus siglas en inglés). Las corrientes se analizan utilizando la FFT, y la DWT con diferentes ondeleta madre como lo son la Haar, Daubechies2, Daubechies3 y Coiflet 5, para la detección de fallas de cortocircuito en el estator, logrando un resultado aceptable a velocidad constante.

Máquinas Eléctricas.

En la actualidad el uso de máquinas electricas es algo común tanto para la vida diaria, asi como, para el ambito industrial. Se considera una máquina eléctrica a aquella máquina capaz de convertir la energía mecánica en eléctrica ó de forma contraria la energía eléctrica en mecánica. A la máquina eléctrica que convierte la energía eléctrica en energía mecánica se le conoce como "motor", por lo tanto a la máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en eléctrica se le llama "generador", cuya conversión de energía se realiza a través de la acción de campos magnéticos [8]. Para comprender un poco mejor el concepto de máquinas eléctricas, a continuación se muestra información sobre algunos tipos de máquinas eléctricas.

Máquina de Corriente Directa.

Como se menciona al principio del tema anterior, existen diferentes tipos de máquinas eléctricas, dependiendo de las necesidades y los diferentes factores para los cuales sea requerida. En general pueden dividirse en dos tipos: de corriente alterna (AC) y de corriente directa (DC) la cual es un tipo de máquina como su nombre lo indica su principal funcionamiento es en base a la energía eléctrica de corriente directa, es decir, es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica, o viceversa, mediante un campo magnético. Este tipo de máquina puede dividirse en dos diferentes tipos:

- 1) Generador eléctrico de DC: Los generadores AC y DC básicamente están contruidos de la misma manera. En cada caso, una bobina gira en un campo magnético y se induce un voltaje de AC en ella. Las máquinas sólo difieren en la forma en que las bobinas están conectadas al circuito externo los generadores AC llevan anillos colectores, en tanto que los generadores CD requieren un conmutador para convertir voltaje de CA en los conductores del rotor a salida de DC [9].
- 2) Motor de DC: El motor de DC, es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica de DC a energía mecánica. Los motores de DC suelen ser utilizados debido

a que poseen la característica principal de que el par ó momento de torsión-velocidad, pueden ser variados dentro de un amplio rango siendo relativamente mas faciles en el momento del control comparado con la complejidad de los motores de AC [9]. Por ejemplo pueden ser utilizadas en algun caso donde se necesite un momento de torisón-velocidad muy definido como lo pudiera sera para un ventilador ó en donde se deba de tener momento de torisón-velocidad extremadamente variable como un automóvil.

Máquina de Inducción.

Se considera máquina de inducción, a una máquina eléctrica que sólo tiene un conjunto continuo de devanados de amortiguamiento. Se les llama así porque el voltaje en el rotor (que produce la corriente y el campo magnético del rotor) se induce en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectados por cables. La característica distintiva de un motor de inducción es que no se necesita de corriente de campo de DC para que la máquina funcione [8].

Al hablar sobre máquinas de inducción existen tanto motores como generadores, sin embargo, estas muestran muchas desventajas al utilizarse como generadores, por lo cual son muy poco utilizados de esta manera, por lo que de manera general suele utilizarse este termino para hacer referencia a un motor de inducción. Los motores de inducción suelen ser los motores mas utilizados dentro de la industria debido a diferentes factores como puede ser su simpleza, resistencia y costo. Su velocidad depende de la frecuencia por lo que no suelen adaptarse con facilidad a un control de velocidad. Los motores de inducción constan de dos componentes principales: un estator estacionario, y un rotor giratorio, donde el rotor está separado del estator por un pequeño entrehierro que va de 0.4 mm a 4 mm, según la potencia del motor [9].

Máquina Síncrona.

Las máquinas síncronas suelen ser muy utilizadas en diferentes ambitos industriales las cuales son utilizadas como un generador ó motor síncrono dependiendiendo de las necesidades del trabajo a realizar. Por ejemplo, el generador síncrono trifásico puede considerarse como una de las fuentes principales de le energía eléctrica debido a que puede convertir energia mecánica en energía eléctrica de hasta 1500MW, mientras que los motores síncronos suelen ser utilizados en la industria pesada, debido a que la capacidad de la mayoría de los motores síncronos oscila entre 150kW (200Hp) y 15 MW (20 000Hp) y giran a velocidades que van de 150 a 1800RPM [9]. Aunque tambien pueden ser utilizados en un ambito completamente

contrario a la industria pesada, como lo pueden ser en sistemas de control. Este tipo de máquina puede definirse en dos tipos: con polos salientes y con polos no salientes.

Máquina Síncrona de Imanes Permanentes .

La máquina síncrona de imanes permanentes tiene en base el mismo funcionamiento que una máquina síncrona convencional, con la principal diferencia de que para este tipo de máquina se toma el devanado del rotor y se sustituye por imanes permanentes. Esto trae algunos beneficios para el sistema ya se evita la generación de rozamientos dentro de la máquina, evitando así una baja en el rendimiento de la máquina además de no generar calor debido a la fricción y ruidos [8]. Al utilizar imanes permanentes en las máquinas estas pueden dar un mejor rendimiento así como un costo más bajo a la hora del mantenimiento.

En la actualidad al contar materiales que tienen una mayor potencia magnética como lo pueden ser los imanes de neodimio las máquinas síncronas tienen una eficacia aún mayor, por lo que suelen ser máquinas utilizadas con mayor frecuencia.

Aerogeneradores.

La energía eólica es la energía que se genera mediante el viento, se reconoce como una energía limpia, debido a que no contamina el medio ambiente y se establece como una de las mejores opciones para sustituir a la energía que se genera mediante combustibles fósiles.

Para poder convertir la energía eólica en energía eléctrica se utiliza un sistema electromecánico conocido como aerogenerador, el cual su principal función consiste en convertir la energía cinética generada por las corrientes de aire en energía eléctrica. En su mayoría los aerogeneradores están contruidos con 3 elices ó palas. Las corrientes de aire hacen girar las palas y el rotor los cuales transmiten energía a través del eje principal al generador eléctrico con ayuda de una caja multiplicadora, siendo la velocidad del generador la más cercana a la velocidad óptima para la generación de electricidad [10].

Existen dos tipos de aerogeneradores dependiendo del lugar donde estos vayan a ser instalados y de las necesidades que se tengan, estos tipos de aerogeneradores son:

- a) Aerogenerador de eje vertical: Este tipo de aerogenerador no cuenta con un sistema de orientación y también puede ser instalado a ras de suelo, sus principales ventajas

son la fácil instalación y el fácil acceso a mantenimiento, mientras que su principal desventaja es la poca cantidad de energía eléctrica generada.

- b) Aerogenerador de eje horizontal: Este tipo de aerogenerador es el más utilizado para todo tipo de potencias, yendo desde, baja, media y alta, debido a que su principal ventaja es un alcance de mayor velocidad de rotación, logrando de esta manera una mejor eficacia y una mejor generación de energía eléctrica.

Al utilizar un aerogenerador hay demasiadas cosas que hay que tomar en cuenta, como por ejemplo, la velocidad del viento, las turbulencias que puedan existir y los cambios bruscos de velocidad debido a las rafagas de aire que suelen existir, ya que, al utilizar un aerogenerador que pueda ser efectivo ante los diferentes patrones de viento nos podrá garantizar una mayor captura de energía eléctrica. Estos factores influyen en diferentes situaciones teniendo así 4 categorías de aerogeneradores dependiendo de si el lugar cuenta con vientos altos, medios, bajos, así como las 4 clases de variaciones de viento las cuales son: a escala global (10000km/hr), macroescala (1000km/hr), mesoescala (100km/hr), microescala (10km/hr), según la norma IEC 61400-1 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [11].

Existen 4 configuraciones principales para los aerogeneradores, las cuales son: con un generador de inducción tipo jaula de ardilla conectado a la red sin conversión de la potencia eléctrica. El segundo tipo consiste en un generador de anillo deslizante (rotor bobinado) donde el rotor de la máquina cuenta con una resistencia conectada a los devanados a través del convertidor. El tercer tipo de configuración consta de un DFIG con dos convertidores que inyectan y ajustan el voltaje en el circuito del rotor para ajustar la frecuencia y el cambio de fase. En este documento se hablará sobre el cuarto tipo de configuración y una de las más utilizadas en la actualidad la cual consta de un generador síncrono de imanes permanente.

Dentro de los aerogeneradores síncronos de imanes permanentes podemos encontrar dos diferentes tipos de generadores, dependiendo de las necesidades se pueden utilizar los multipolo sin caja reductora y en contra parte los que tienen un bajo número de polos y una caja reductora, la primera opción se ha vuelto altamente utilizada en la actualidad debido a sus menores requerimientos de mantenimiento mecánico aunque se requiere de un convertidor de frecuencia como interfaz a la conexión de la red [10].

En la figura 1 podemos observar los componentes externos de un aerogenerador.

- a) Palas: Las palas son las encargadas de recibir la energía cinética del aire y transmitirla al rotor para así comenzar con el proceso de conversión, algunas palas están fabricadas de plástico reforzado con varias capas de láminas de fibra de vidrio, aunque para

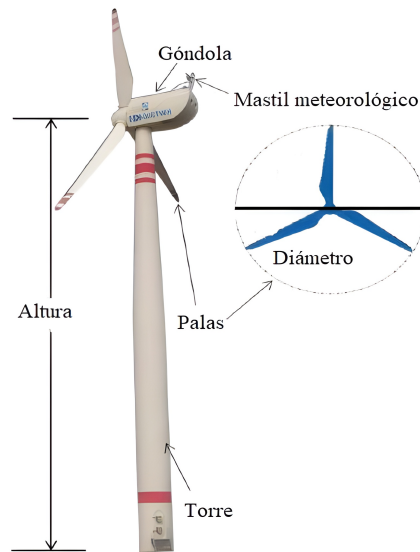


Figura 1. Aerogenerador.

aerogeneradores a pequeñas escalas pueden ser fabricadas con una gran variedad de materiales, como lo podrían ser la madera hasta compuestos de carbono [12].

- b) **Góndola:** La góndola a diferencia de las palas no gira conforme al rotor, pero si debe de girar con respecto a la torre, ya que este movimiento es necesario para que el aerogenerador siga las corrientes del viento, debido a que estas cambian constantemente. A parte de lo mencionado anteriormente la góndola tiene el proposito de albergar la caja multiplicadora, generador eléctrico, enfriadores y calentadores para el aceite de caja multiplicadora, sistema de frenado, motores y engranajes para el sistema de orientación, los sistemas de dirección de viento y medición de velocidad, el transformador para suministro de energía del aerogenerador y otros equipos basados en el diseño del mismo [13].
- c) **Mástil meteorológico:** Está equipado con anemómetros y sensor de dirección de viento en una posición alejada del techo de la góndola.
- d) **Torre:** La torre es una estructura que consiste en tubos de acero de sección circular y de elevación cónica, como se observa en la figura 1 la altura juega un papel vital en un aerogenerador, ya que, mientras mas altura tenga mayor es la energía cinetica que captura con las corrientes de aire, sin embargo mientras mayor sea la altura mayor sera el costo de fabricación asi como una mayor dificultad para la instalación y mantenimiento del equipo [13] .

Todos los componentes del aerogenerador son vitales para poder desempeñar su trabajo de manera eficaz, en la figura 2 podemos observar los componentes internos del aerogenerador, los cuales como se mencionó anteriormente se encuentran dentro de la góndola.

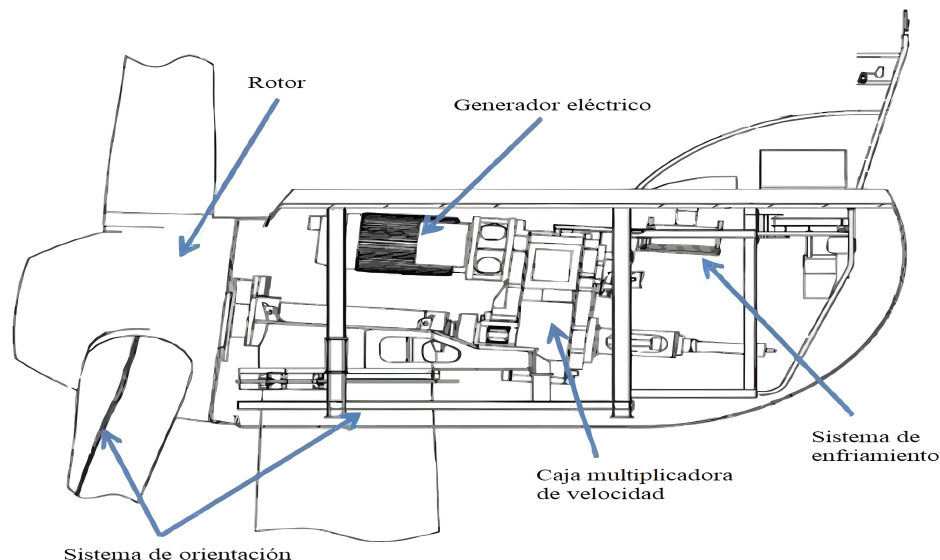


Figura 2. Componentes del aerogenerador.

- a) Rotor: Consta de un sistema de ajuste también conocido como sistema de "pitch" que es el encargado de ajustar el ángulo de las palas según la velocidad del viento. El rotor está compuesto por las palas, buje, eje de rotor y rodamientos. Es el componente principal del aerogenerador ya que es el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica para su posterior transformación a energía eléctrica [16].
- b) Sistema de orientación: También conocido como sistema "yaw" es el encargado de mantener la góndola en dirección perpendicular al viento, es decir, que la góndola gire con respecto a la torre, para que las corrientes de viento sean perpendiculares a las palas, obteniendo así una mayor eficacia.
- c) Generador eléctrico: El generador eléctrico es el componente encargado de transformar la energía mecánica proveniente del rotor a energía eléctrica, como se menciona con anterioridad el generador debe de estar adaptado a las diferentes fluctuaciones eléctricas generadas por los diferentes patrones de viento, para poder capturar energía con mayor eficacia, en la figura 2 podemos observar como el eje del generador se encuentra conectado con la caja multiplicadora.

- d) Caja multiplicadora: La velocidad del rotor debe ser igual a la velocidad del generador, la caja multiplicadora se utiliza en los casos donde la velocidad del rotor es menor a la velocidad del generador, de esta manera la caja multiplicadora aumenta la velocidad otorgada por el rotor para igual a la velocidad de giro del generador [14].
- e) Sistema de enfriamiento: La fricción que se da entre los engranes de el generador y de la caja multiplicadora, genera una gran cantidad de calor para poder disipar este calor existe el sistema de enfriamiento el cual consiste en un ventilador, para poder mantener la temperatura en la caja multiplicadora asi como en el interior de la góndola.

El generador eléctrico es el elemento principal de un aerogenerador, y sobre el cual se realizan los calculos para todos los otros elementos y los sistemas correspondientes (monitoreo y control). Hasta el día de hoy no existen parametros completamente estrictos a la hora de seleccionar un generador eléctrico esto nos permite ampliar nuestras opciones al poder seleccionar generadores de AC ó DC. Existen dos clases principales para los generadores tanto de DC como de AC, (síncronos y asíncronos). Los generadores síncronos son aquellos que su corriente de campo magnético la suministra una fuente de potencia de CA externa, al contrario en los asíncronos la corriente de campo magnético se suministra a sus devanados de campo por medio de inducción magnética [8].

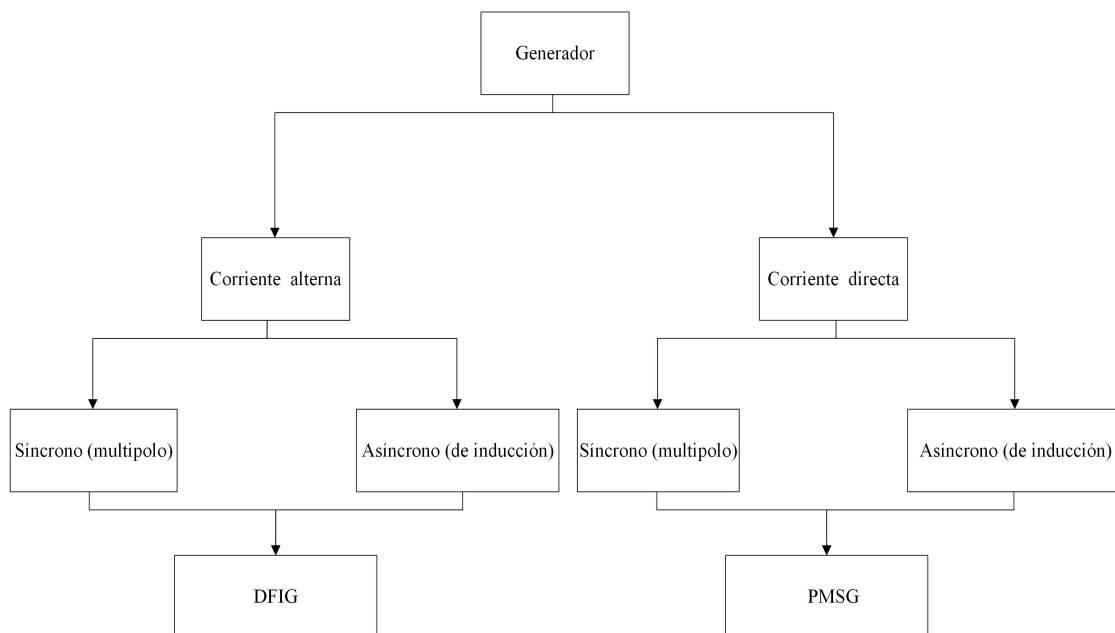


Figura 3. Clasificación de los generadores.

En la figura 3 podemos observar a grandes rasgos la principal clasificación de los generadores mas usados usualmente en el diseño de aerogeneradores, siendo estos los generadores de corriente alterna de rotor devanado (DFIG) y los PMSG.

En la tabla 1 podemos observar los diferentes tipos de marcas de aerogeneradores las cuales fueron las que tuvieron mayor demanda durante el año 2017, en donde podemos observar que marcas como Vestas, Siemens-Gamesa y General Electric fueron las marcas con mayor instalación en aerogeneradores. Estas marcas tienen en común que sus aerogeneradores utilizan el DFIG. Por otro lado, la marca Goldwind en China utilizando aerogeneradores con el PMSG. Además de las marcas mencionadas anteriormente se encuentran algunas otras como lo son Vestas con el IG y el generador anular de Enercon están explotando todas las nuevas tecnologías de convertidores en máquinas de más de 5MW [15].

Frecuencia	Capacidad Total	Tipo de máquina
Vestas	94GW	DFIG, IG
Siemens-Gamesa	84.5GW	DFIG, PMSG
General Electric	52.5GW	DFIG, PMSG
Goldwind	52.5GW	PMSG
Enercon	46.7GW	AGSPM
Nordex	18GW	DFIG

Tabla 1. Marcas de aerogeneradores.

Generador de imanes permanentes.

Los PMSG sustituyen los bobinados del rotor por imanes permanentes. Los generadores síncronos no requieren de una fuente de excitación separada, de tal manera que las pérdidas son cercanas al 30 % del total de pérdidas del generador. Esto ofrece una alta densidad de potencia junto con un tamaño más compacto y mayor eficiencia en todas las velocidades, ofreciendo la mayor productividad durante todo el ciclo de vida.

En los PMSG se produce la inducción mediante imanes los cuales son los encargados de generar el campos magnéticos. Este tipo de generador muestra algunas ventajas sobre algunos otros generadores como lo puede ser la eliminación de pérdidas en el devanado del rotor. En los generadores electricos podemos observar como los imanes giran alrededor del

eje, dependiendo de la disposición de los imanes y la dirección en que se genera el campo magnético, podemos clasificar los generadores en dos tipos [8].

Generador de flujo axial.

En los generadores de flujo axial el campo magnético de los imanes es paralelo al eje del giro, debido a esto se le conoce como generador de "flujo axial", esto se debe a que los imanes se colocan sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro como se puede observar en la figura 4.

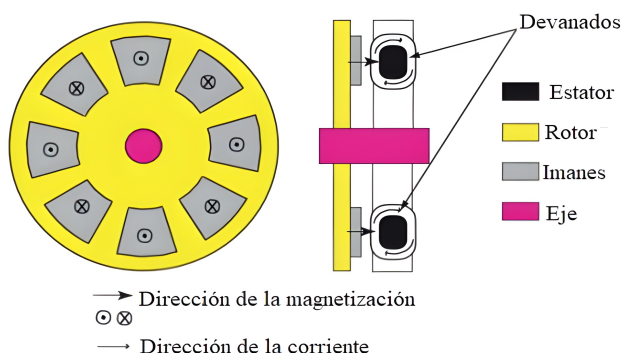


Figura 4. Generador de flujo axial.

Los generadores de flujo axial son usados para dispositivos de generación que tienen una baja velocidad de rotación. Además permiten modificar la frecuencia de la señal de tensión de salida cambiando el número de polos, razón por la cual no se requiere de altas velocidades de rotación para lograr frecuencias elevadas en la señal de tensión. Esta característica lo hace ideal para su uso en aerogeneradores de eje vertical, que no alcanzan velocidades elevadas pero si pueden tener un par de rotación alto [16].

En la figura 4 se puede observar que los imanes se distribuyen de manera simétrica alrededor del disco intercalando sus polos magnéticos norte y sur. Las bobinas se distribuyen simétricamente en el estator según el tipo de generador a construir, AC(monofásico o trifásico) y DC.

Una ventaja de este tipo de generador es que es más compacto que el de flujo radial y posee una densidad de par alta, por lo que es usado comúnmente en casos como ascensores sin engranajes, en sistemas de servo aplicación, micro generación y propulsión [17].

Generador de flujo radial.

En este tipo de generadores, el campo magnético generado por los imanes es perpendicular al eje de giro, por lo cual crea un flujo en el entrehierro en dirección radial, debido a esto se les conoce como "generador de flujo radial". Esto se debe a que los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje [18] como se muestra en la figura 5.

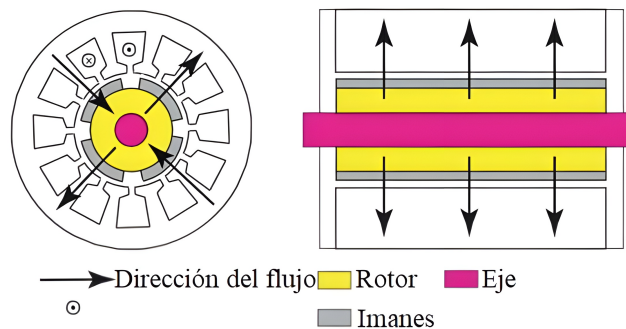


Figura 5. Generador de flujo radial.

Basicamente existen dos categorías dentro de esta categoría, de imanes superficiales y de imanes embutidos, la diferencia entre ellos es que el generador de imanes embutidos tiene imanes dentro de las ranuras del rotor lo cual aumenta el flujo entre el rotor y el estator, este tipo de máquina es la más ampliamente utilizada [19].

Una ventaja de este generador es que se puede obtener potencias más altas a través del aumento de la longitud axial de la máquina. Se aplica en sistemas de propulsión, robótica, tracción y viento [10].

Aerogeneradores de baja potencia.

Los aerogeneradores de baja potencia, como su nombre lo indica realizan el mismo trabajo que un aerogenerador de grande o mediana potencia, el rango de potencia entregado por estos aerogeneradores pueden variar dependiendo de la necesidad pero suele ser hasta una potencia de 100 kW ó según la norma IEC 61400-12.1 se consideran aerogeneradores de baja potencia a aquellos aerogeneradores cuyo rotor barre un área de hasta 200 m^2 , tanto en eje vertical como horizontal [20]. Estos aerogeneradores en la mayoría de los casos suelen ser usados para el ámbito privado debido a que principalmente se utilizan para alimentar

viviendas ó pequeños establecimientos [21].

Existen varias razones para optar por un tipo de energía como la mini eólica, por ejemplo, aunque la energía fotovoltaica sigue siendo un poco mas barata existen nichos como las micro redes aisladas o lugares donde las situaciones ambientales no favorecen a este tipo de energía, así como, lugares que impiden el uso de aerogeneradores de mayor potencia, teniendo todas estas necesidades en cuenta una ventaja de la energía eólica de baja potencia es que demanda menor superficie de instalación lo que en algunas circunstancias la hace una mejor alternativa [19]. El tamaño del aerogenerador esta directamente ligado a la potencia que posee el mismo. Por lo tanto, un generador de baja potencia será considerablemente mas pequeño que uno de alta potencia como se puede observar en la figura 6.

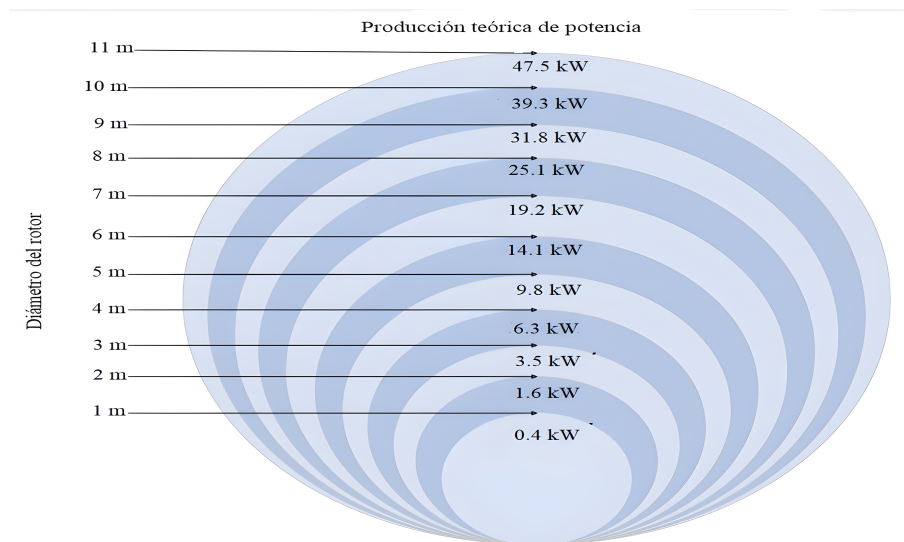


Figura 6. Relación entre diámetro de aspas y potencia producida.

La ruta energética de la unión europea estima que para el año 2050 la energía eléctrica generada por energía eólica se encuentre entre el 31 % y 48 % de la energía total generada. Debido a la crisis financiera que se ha vivido alrededor del mundo en los últimos años han disminuido las instalaciones generadoras de energía de alta potencia por estas razones cada vez se le presta mas atención a los microgeneradores (20 kW de salida) [22].

Como se ha mencionado con anterioridad algunas situaciones como la crisis económica y otros factores que complican la fabricación e instalación de aerogeneradores de gran potencia han provocado tener un énfasis en los aerogeneradores de baja potencia (mini y micro eólica). En [22] se realiza una mejora de diseño para el uso de aerogeneradores de baja potencia,

en este artículo se contemplan los lugares de uso mas comunes para dichos aerogeneradores, los cuales pueden definirse en el uso urbano, domestico, pequeños negocios, y zonas rurales, asi esten conectados o no a una red. Tambien se comenta que el funcionamiento de estos aerogeneradores es de manera deficiente, dicho de otra forma funcionan intrinsecamente mal, algo que el articulo trata de aclarar como un prejuicio. En [22] se comenta que el principal error para estas turbinas en zonas urbanas es que este tipo de terreno induce una velocidad del viento que varía rapidamente, es decir, una intensidad de turbulencias difícil de estimar.

En el ámbito rural o en zonas de suministro eléctrico deficiente, la energía eólica de baja potencia puede representar la única posibilidad de acceder a un suministro eléctrico. Aunque los aerogeneradores no han tenido grandes variaciones en sus diseños, en las últimas tres décadas la irrupción de nuevas tecnologías de materiales en las máquinas eléctricas y el desarrollo de perfiles aerodinámicos específicos, provocaron un salto tecnológico relevante en la eólica de baja potencia, debido a esto es de vital importancia que estos mantengan una buena eficacia, así como un correcto monitoreo y mantenimiento para evitar grandes perdidas economicas [20].

Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas

En la actualidad las máquinas electricas han tomado cada vez mas importancia en la vida diaria, asi como en el ambito industrial esto ha provocado que cada vez se sea mas exigente con la eficacia y el mantenimiento de dichas máquinas eléctricas. El diagnostico de fallas se ha vuelto una herramienta de alta importancia en la actualidad, debido a que de esta manera se logran evitar costos mayores por reparación asi como la prevención de una parada no deseada por fallo total de la máquina.

Hay diferentes factores que influyen sobre el correcto funcionamiento de las máquinas eléctricas como lo pueden ser las diferentes condiciones ambientales en las que se encuentre instalada la máquina ó una mal ejecución operativa al momento de utilizar la máquina. Las fallas en las máquinas rotatorias pueden clasificarse en fallas mecánicas y fallas eléctricas [23].

Entre las fallas mas comunes de máquinas eléctricas se encuentran algunas como apertura o cortocircuito entre devanados, fallas en el rotor tales como rotura de barras o anillos de cortocircuito y excentricidad del entrehierro [24]. Para obtener una vista un poco más clara y general sobre los diferentes tipos de fallas podemos observar la tabla 2. en donde se observan los problemas internos de una máquina eléctrica.

Fallas internas en máquinas eléctricas	
Eléctricas	Provocada por la degradación del aislante debido a las sobrecargas de corriente pueden ser fallas del tipo, corto circuito entre vueltas, entre bobinas, entre fases, fase a tierra, circuito abierto, etc.
Mecánicas	Provocada por el desgaste y sobre esfuerzo al que se puede someter la máquina se pueden encontrar fallas en rodamientos, excentricidad del entre hierro, rotura de barras, desalineamiento de eje, etc

Tabla 2. Fallas de internas máquinas eléctricas.

Fallas Eléctricas.

Estas fallas suceden con menor frecuencia que las fallas mecánicas, pero estas ultimas suelen ser reparaciones más rapidas. Al ser un tipo de fallas que se presentan con menor frecuencia pero que a futuro pueden terminar en una falla catastrofica en las máquinas eléctricas, existen una gran variedad de metodos para poder realizar el monitoreo de estas fallas como lo pueden ser, el monitero de vibraciones, de torque, de ruido, de temperatura, y el metodo mas utilizado el de corriente [25].

Existen diferentes tipos de fallas eléctricas que se pueden presentar en el estator o en el rotor de una máquina eléctrica, por lo que se explicara un poco de ambos tipos posibles de fallas eléctricas.

Fallas eléctricas del Estator.

Las fallas eléctricas del estator son una de las fallas eléctricas más comumente presentes en una máquina eléctrica, por lo que es de vital importarcia tener un énfasis especial en este tipo de fallas. Algunas de las fallas que mas se presentan en las máquinas electricas rotatorias como lo puede ser un motor de inducción por ejemplo, son las conocidas fallas entre vueltas del estator, esto es debido al fuerte flujo de corrientes que circula por las bobinas y al deterioro de aislammiento de las mismas por diversos factores como lo puede ser el sobrecalentamiento, etc [26].

En la figura 7 se muestran el porcentaje con el que se da cada tipo de falla en las máquinas rotatorias. Se observa que las fallas eléctricas del estator suceden en el 21 % de los casos, es decir, es la segunda falla que más se da en una máquina eléctrica este tipo de fallas ocurre debido al deterioro del aislamiento en los embobinados del estator. El deterioro de

dicho aislamiento suele deteriorarse debido a los sobrecalentamientos que se pueden generar en los devanados.

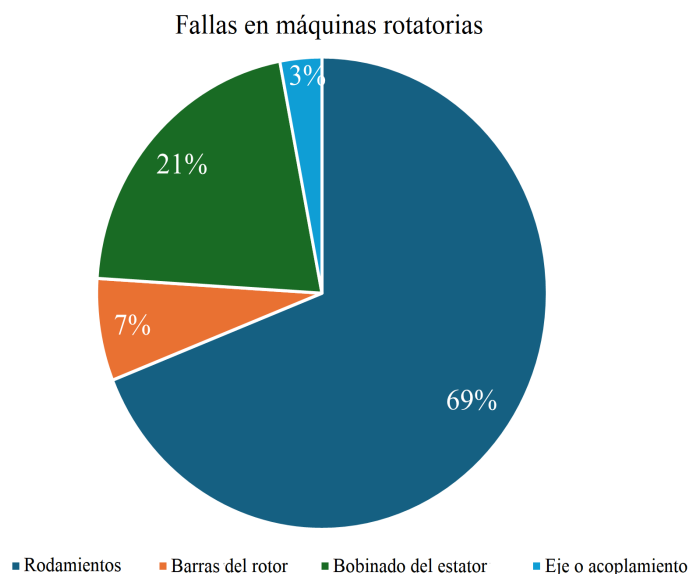


Figura 7. Porcentaje de fallas en máquinas eléctricas.

Se pueden considerar dos clases principales de fallas en los devanados del estator. La primera se conoce como asimetría en los devanados del estator, como puede ser una falla de fase abierta, la segunda son los cortocircuitos de algunas vueltas en un devanado de fase. La primera permite que la máquina funcione con un par reducido, mientras que la segunda puede conducir a una falla catastrófica en un corto tiempo, debido a que se produce un degradado en el aislante del sistema lo que ocasionara un cortocircuito de mayor magnitud. Si una asimetría es pequeña puede detectarse através de la secuencia negativa de corriente del estator, por el contrario una asimetría mas fuerte como lo puede ser una fase abierta, provoca una secuencia negativa de magnitud similar a la positiva por lo que se activaría el sistema de protección. Un cortocircuito puede ser una de las fallas más difíciles de detectar.

Uno de los problemas para la detección de este tipo de fallas es que si existieran fallas pequeñas en las bobinas del devanado del estator no pueden ser identificadas a simple vista, ya que el motor puede seguir funcionando, e incluso si se realizará una prueba de resistencia a tierra, puede no presentar falla, por lo que el motor seguirá trabajando con falla. Si no se detectan, las fallas de espira se propagarán, lo que provocará fallas de fase a tierra o de fase a fase. El flujo de corriente de tierra produce daños irreversibles en el núcleo y la máquina debe retirarse del servicio [27]. Por lo tanto, la detección incipiente de fallas de espira es obligatoria. Uno de los métodos más simples pero más efectivos es el monitoreo continuo de

la secuencia negativo de la corriente del estator.

Este tipo de fallas pueden clasificarse en dos tipos principales de falla las cuales se presentan en la tabla 3.

Tipo de falla	Descripción	Causas
Armadura	Las fallas de armadura generalmente son causadas por el aislamiento del devanado, ocurre frecuentemente en las regiones donde los devanados finales ingresan a las ranuras.	Algunas de las causas son, defecto de fabricación, Alta temperatura de funcionamiento, Sobrecarga de la máquina, Alto voltaje transitorio, Vibración provocada por roce
Falla en los devanados del estator.	Los fallos más comunes detectados en los devanados del estator son localizados al final de la ranura ocasionando daño local al aislamiento, desgaste del aislamiento, contaminación del aislamiento, daños a los conectores, fallas entre espiras.	Se deben a una combinación de varios factores, que se puede clasificar en factores térmicos, eléctricos, mecánicos y ambientales.

Tabla 3. Fallas eléctricas de estator.

Observando la tabla 3 la falla en armadura así como las del devanado del estator generalmente comienzan como un cortocircuito entre espiras de una fase, entre espiras de dos fases o entre espiras de todas las fases. Además, también puede ocasionar cortos circuitos entre los conductores del devanado y el núcleo del estator [28].

Es de suma importancia conocer no solo los tipos de fallas eléctricas que pueden ocasionarse en el estator, también es necesario tener conocimiento sobre lo que pudo haber sido la causa de estas. Existen diversos factores que pueden ocasionar este tipo de falla, pero los más comunes son aquellos que degradan el material aislante de la máquina eléctrica acortando de esta manera su vida útil, esta degradación de material puede darse por diferentes factores como eléctricos, mecánicos o ambientales. A continuación se muestran algunos de las posibles causas para este tipo de falla:

- 1) Transitorios de tensión: Se generan picos de voltaje, que varían en amplitud y frecuencia, pueden erosionar o causar el deterioro del aislamiento de los devanados de la máquina. La causa de estos transitorios puede resultar difícil debido al carácter aleatorio de estas incidencias y al hecho de que los síntomas pueden presentarse en diferentes formas.
- 2) Distorción armónica: Los armónicos son cualquier fuente adicional no deseada de tensiones AC que suministran energía a las bobinas de la máquina. Esta energía adicional no se utiliza, sino que circula en las bobinas y se disipa en forma de calor pudiendo afectar al aislante del conductor,
- 3) Sobrecarga: Genera señales de corrientes superiores a la nominal del generador, causando así desgaste del aislante del conductor. Este suele presentarse debido al aplicamiento de una carga excesiva de trabajo para la máquina
- 4) Ambiental: Existen diversos factores ambientales que pueden generar degradación del aislante, como lo pueden ser, temperaturas extremas en la zona de trabajo, humedad, etc.

Los estudios recientes se centran principalmente en 3 tipos de fallas las cuales son:

- 1) Desequilibrio resistivo: solo aumenta la resistencia de fase mientras que la inductancia de fase es invariable, es una falla común que puede ocurrir en cualquier conexión de alimentación de una máquina eléctrica industrial. La falla puede deberse a una combinación de mano de obra deficiente, ciclos térmicos y vibración, o daños de las superficies de contacto debido a picaduras, corrosión o contaminación. Esta falla puede producir uno o más de los siguientes síntomas: desequilibrio de las tensiones del estator y corrientes, aumento de la pulsación de par, disminución par medio, aumento de pérdidas y calentamiento excesivo. La falla se puede modelar agregando una adicional Resistencia Radd conectada en serie con un devanado monofásico.
- 2) Entre vueltas: Ocurre en la misma fase entre dos vueltas o más vueltas debido a una falla de aislamiento de los devanados del estator. A medida que ocurre se generará una gran corriente de circulación en las vueltas en cortocircuito, lo que podría provocar la desmagnetización del imán, así como otro tipo de fallas de corto circuito.
- 3) Circuito abierto: Generalmente aparece cuando el devanado de fase está desconectado de la fuente de energía y puede ser causada por una falla interna del devanado del estator o una falla mecánica del conector de la terminal de la máquina. Causa grandes ondas de par electromagnéticas y considerables vibraciones mecánicas [29].

La falla de corto circuito entre vueltas es una de las más comunmente estudiadas por lo que hay diferentes métodos utilizados para su diagnóstico, pero ultimamente se ha dedicado mucha atención a los modelos basados en observadores. Su característica principal es que no son invasivos debido a que se utiliza un seguimiento de entrada y salida sin la necesidad de sensores adicionales y que al ser técnicas computacionales no son de gran costo siempre y cuando se tenga un modelo preciso [30].

Con la finalidad de poder reducir este tipo de falla se utilizan otros tipos de modelos para poder comprobar la eficiencia que presenta cada uno para el diagnóstico de fallas, uno de ellos es el basado en circuitos de acoplamiento donde los más utilizados son los basados en la técnica de descomposición en el espacio vectorial o modelo d-q. Estos modelos asumen algunas suposiciones tales como máquinas totalmente simétricas, permeabilidad lineal del hierro, uniformidad del entrehierro o la ausencia del componente de inducción tangencial en el entrehierro. Todas estas suposiciones permiten simplificar el modelo resultante. Por tanto, se calcula rápidamente y tiene suficiente precisión para desarrollar sistemas de control. Sin embargo, en el caso de los defectuosos, estas simplificaciones ya no se pueden aplicar ya que afectan el rendimiento. Por otra parte existen modelos basados en circuitos equivalentes magnéticos se basan en un modelado magnético detallado de la máquina mediante aproximaciones de una red de reluctancias. Así mismo los modelos basados en circuitos funcionan rápido pero no pueden proporcionar un modelado completo como los que están basados en métodos numéricos. Se han propuesto técnicas que pueden tener en cuenta las no linealidades de los materiales magnéticos, así como evitar suposiciones simplificadas sobre la geometría y la disposición de los devanados. Las técnicas numéricas más utilizadas son los métodos de los elementos de contorno y de elementos finitos el cual es el más reportado en la literatura técnica, que puede servir como un enfoque factible en el diagnóstico de fallas [31]

Fallas mecánicas.

Las fallas mecánicas suelen presentar un severo problema dentro de cualquier situación debido a que presentan un gran porcentaje de incidencia como se mostró en la figura 7, además de que refieren un mayor costo y tiempo de reparación. Dentro de las fallas mecánicas encontramos diferentes tipos de fallas como lo pueden ser fallas de rodamientos y excentricidad en el entrehierro.

Fallas de Rodamientos.

Como muchos sistemas electromecánicos el aerogenerador utiliza rodamientos, también conocidos como baleros. Estos baleros están constituidos por un anillo exterior y un anillo interior, entre estos anillos existen un riel donde van colocadas unas esferas, las cuales permiten que el anillo interior gire.

Las fallas de rodamientos tienen el porcentaje más alto de fallas dentro de las máquinas eléctricas [32]. Este tipo de fallas puede ser ocasionado por diversos factores como lo puede ser:

- 1) sobrecarga: La máquina funciona por encima de su velocidad nominal, por consecuencia los rodamientos también, ocasionando un desgaste prematuro y un posible daño.
- 2) Instalación errónea: Generalmente, los rodamientos están dispuestos o guiados en una ranura, con el fin de garantizar una separación uniforme entre los elementos para evitar el contacto mutuo, por lo que una mala colocación puede ocasionar fricción.
- 3) Fatiga del material: Suele ser causado por la carga cíclica. La carga cíclica y continua provoca grietas en la superficie del material. Si el agrietamiento por fatiga se expande progresivamente a una superficie más grande, el rodamiento eventualmente se vuelve no apto para seguir siendo utilizado.
- 4) Mala lubricación: Puede consistir en lubricación escasa la cual suele significar que el rodamiento tiene grasa de baja viscosidad o una pequeña cantidad de lubricante, por otro lado también puede considerarse como mala lubricación cuando esta es excedente debido a que esto ocasiona que el eje patine, lo que posteriormente conduce a su vez a la creación de fisuras. Además, la selección incorrecta del lubricante contribuye a la contaminación del mismo.
- 5) Contaminación ambiental: Puede contaminarse cuando el agua u otras sustancias químicamente activas contaminan el lubricante lo cual provoca corrosión en el rodamiento debido a que se pierden las propiedades del lubricante. La contaminación puede ocurrir debido a una selección incorrecta de la junta del rodamiento.
- 6) Corrientes de eje y/o rodamiento: Los defectos en las superficies debido a las corrientes parásitas se diferencian claramente de cualquier otro daño típico en los rodamientos, lo que hace que sea muy fácil detectarlos visualmente. El tipo y la apariencia de este defecto dependen de las condiciones de funcionamiento de la máquina [33]

Una de las fallas más comunes es cuando el balero presenta desprendimientos de pequeños pedazos lo cual se conoce como descamación ó desconchado [34]. Estos fallos resultan en un funcionamiento brusco de los rodamientos que genera vibraciones detectables y aumento de niveles ruido. Los voltajes del estator y las corrientes también pudieran ser fuentes de fallas en los rodamientos [35]. Por otro lado los defectos relacionados con los rodamientos de balines se pueden clasificar como de la pista del rodamiento exterior e interior, de balines y del tren. Todos estos defectos mecánicos provocan distorsiones en la distribución del flujo dentro de la máquina, dando lugar a nuevos armónicos de corriente en las corrientes del estator [36].

Las fallas en los rodamientos pueden ser detectables a simple vista debido a que se generan vibraciones en la maquina eléctrica así como un aumento considerable de ruido.

Fallas de Excentricidad.

Se genera por fuerzas radiales causadas por el desbalance existente entre el rotor y el estator, dichas fuerzas pueden causar fricción entre ellos y producir una destrucción de la máquina. Existen diferentes tipos de excentricidad las cuales son:

- 1) Estática: En este caso se puede producir por deformaciones del estator o desplazamientos del eje del rotor con respecto al eje del estator [26].
- 2) Dinámica: Este caso ocurre cuando el centro geométrico del rotor no coincide con el centro de rotación del mismo, produciéndose una variación periódica del entrehierro cuando este gira [26].
- 3) Combinada: Como su nombre lo dice está ocurre cuando el centro geométrico del rotor no coincide con el centro de rotación del mismo y tampoco coinciden éstos con el centro geométrico del estator, siendo está la combinación de las excentricidad estática y dinámica [26].

Las causas de estos tipos de excentricidad, son muchas, tales como, la colocación incorrecta de los rodamientos durante el proceso de fabricación, el deterioro de los mismos, torceduras del eje del rotor y funcionamiento a velocidades críticas, entre otros.

Entre los problemas causados por esta falla, se pueden mencionar algunos como la generación de un par pulsante y vibraciones mecánicas que resultan en un deterioro prematuro de la máquina, así como la introducción de armónicos de corrientes producidos por el batido de la velocidad, entre otras [37].

En la imagen 8 podemos observar de una forma simple la excentricidad en el entrehierro.

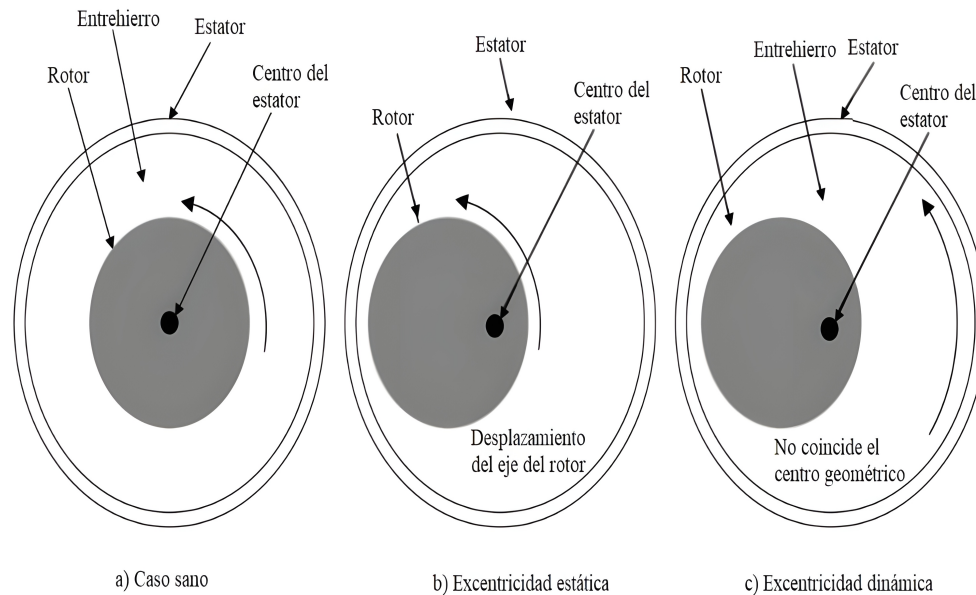


Figura 8. Tipos de excentricidades.

Tipos de Fallas en Aerogeneradores

Los aerogeneradores al ser una máquina electromecánica dependen de diversos factores para que sus componentes tengan un correcto funcionamiento, una parte fundamental para el funcionamiento, así como para una alta eficiencia del sistema es el funcionamiento de la máquina eléctrica encargada de transformar la energía mecánica generada por el aire en energía eléctrica. Como se explicó en temas pasados, existen diferentes tipos de máquinas eléctricas dependiendo de las necesidades. Una de las máquinas eléctricas más utilizadas en el mundo de la energía eólica son los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés), ya que, debido a sus características suelen ser las máquinas eléctricas más eficientes en la generación de energía eléctrica. Tomando esto como base, el siguiente paso es conocer los diferentes tipos de fallas que pueden presentar estas máquinas eléctricas.

Fallas Eléctricas

Estas son las fallas que suelen presentarse con frecuencia dentro de estas máquinas eléctricas, esto puede ser debido a diversos factores como lo pueden ser las altas temperatu-

ras generadas dentro de la máquina después de un tiempo prolongado de uso, contaminación, sobrecargas de voltaje. Todos los posibles factores mencionados con anterioridad suelen degradar el sistema de aislamiento en el devanado del estator del PMSG provocando de esta manera la probabilidad de generar diferentes tipos de fallas incipientes dentro del estator. En la figura 9 se observa un devanado completamente sano.

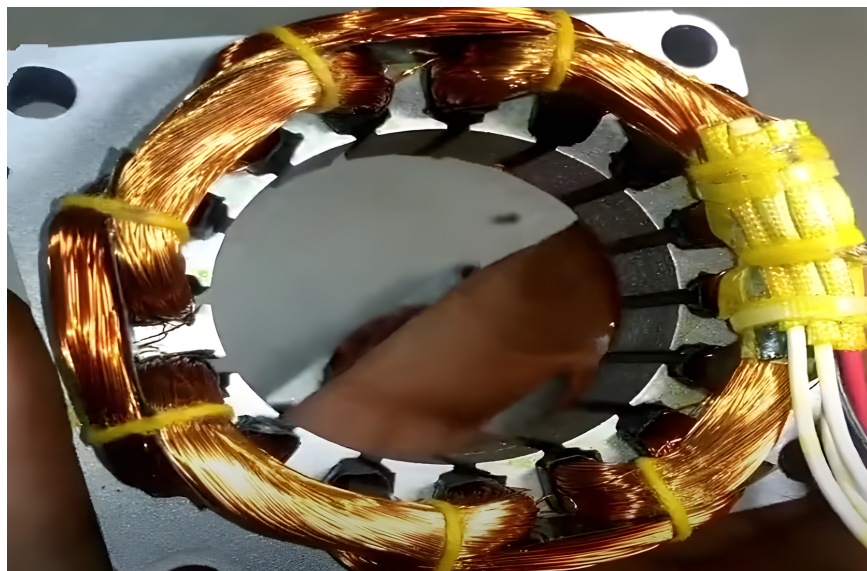


Figura 9. Devanado sano.

Para poder observar una diferencia significativa entre los devanados sanos y los devanados con un aislamiento degradado, en la figura 10 se observa un devanado con tiempo de uso y un aislamiento degradado así como una bobina completamente degradada.

Revisando la bibliografía se puede concluir que las fallas eléctricas pueden presentarse en el rotor o en el estator dependiendo de la máquina, estas fallas pueden clasificarse como fallas entre vueltas del devanado del estator [38], laminaciones en el devanado y marco del estator. El principal motivo para que sucedan las fallas eléctricas suelen ser los problemas en el sistema de aislamiento. Existen varios factores que deterioran el sistema de aislamiento eléctrico como lo puede ser el envejecimiento, humedad, polvo, condiciones ambientales, parámetros operacionales e incluso por prácticas de mantenimiento o limpieza. Algunos de los factores más comunes por los que se presentan fallas eléctricas pueden resumirse en problemas como:

- 1.- Durante el arranque del motor, el aislamiento entre las espiras se afecta por el transitorio producido por el sobrevoltaje.
- 2.- Variaciones en el voltaje producen incremento en la temperatura del embobinado y el deterioro del aislamiento.



Figura 10. Devanado con aislamiento degradado.

- 3.- Problemas de ajuste mecánico en los terminales del devanado.
- 4.- Cortocircuitos y descargas eléctricas
- 5.- Ambientes agresivos tales como contaminación, humedad, químicos y altas temperaturas, que debilitan el aislamiento.

Las fallas eléctricas son unas de las más comúnmente presentadas como se vio en la figura 7, dentro de este tipo de falla, una de las más comunes son en el devanado del estator. En la figura 11 se observan los diferentes escenarios de falla incipiente inducidos en el aerogenerador. Dichos escenarios son los siguientes:

- a) Corto circuito entre espiras de la misma fase: Este tipo falla como su nombre lo indica esta falla se produce entre las espiras de una bobina, provocando así un pequeño cortocircuito, los cuales pueden generar puntos calientes que degradarán el sistema del aislamiento hasta provocar una falla en la bobina, otras bobinas o incluso la máquina eléctrica [39].
- b) Corto circuito entre espiras de bobinas de la misma fase: Al producirse este tipo de cortocircuito se genera un cambio en la fuerza magnetomotriz (FMM) de la fase en la cual se encuentra la falla. Esto altera la inductancia mutua entre fases y los circuitos del estator, por lo que existe una cuarta fase (la del cortocircuito). Esta nueva fase está acoplada magnéticamente con todos los otros circuitos de estator y rotor, este tipo de falla es multiplicativo. En primer lugar, cuando el cortocircuito ocurre, la bobina de

dicha fase queda con menos espiras y por consiguiente menos FMM. En segundo lugar, como la FMM asociada a la corriente en el cortocircuito es opuesta a la FMM de la bobina de la fase se tiene aun menos FMM en la fase en donde se encuentra la falla [39].

- c) Corto circuito entre espiras de bobinas de diferentes fases: Esta falla se presenta cuando las fases entran en contacto generando así un corto circuito, de igual manera que los cortocircuitos de fase a tierra esta falla se conoce como falla asimétrica provoca que aparezcan componentes de corriente de secuencia negativa en los devanados debido al desbalance entre las corrientes de fases, lo que origina la presencia de un campo rotativo adicional que gira en sentido contrario al campo producido por las corrientes de secuencia positiva, originando sobrecalentamiento de las estructuras del rotor, lo cual causa un daño severo [40].
- d) Corto circuito de una fase a tierra: Suele ser la anomalía más común para los generadores síncronos [41]. Este tipo se origina cuando el estator al tener una falla se pueden originar sobrecorrientes que circulan por el neutro de la máquina y cuya magnitud está estrechamente relacionada con el tipo de puesta a tierra y con la posición de la falla a lo largo de los devanados del estator. Una primera falla de fase a tierra en el neutro de un generador (puesto a tierra mediante una impedancia de aterrizaje), no es perjudicial para la máquina; sin embargo, ésta puede conducir a un pico de corriente superior al nominal si una segunda falla a tierra ocurre, lo que implica un daño severo en el núcleo del estátor y pérdidas asociadas a la energía no suministrada por la parada de las máquinas en la central de generación [42].
- e) Circuito abierto: Como su nombre lo indica una falla de circuito abierto es cuando por algún motivo se interrumpe el flujo de la corriente eléctrica en el conductor. Este tipo de fallas puede presentarse por diferentes motivos como lo pueden ser un conductor roto, una conexión anormal, un componente dañado o una falla de cortocircuito en los devanados. Provoca grandes ondulaciones de par electromagnético y una vibración mecánica considerable [43].

En la figura 11 se observa un ejemplo de los tipos de falla mencionados con anterioridad, así como un ejemplo de la falla que se estará analizando en este trabajo de investigación la cual consta de un corto circuito entre espiras de una misma fase, debido a que este tipo de falla suele ser la más común e ir escalando en gravedad si no es diagnosticada en un tiempo adecuado.

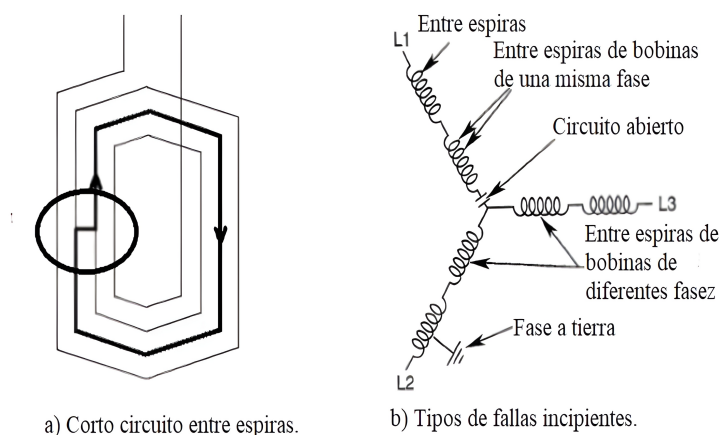


Figura 11. Diferentes tipos de fallas eléctricas

Fallas Mecánicas

Dentro de las fallas que puede presentar una PMSG se encuentran las fallas mecánicas, éste tipo de falla tiene la característica de generar síntomas perceptibles como lo son las vibraciones y señales de tipo acústico. Algunas de las fallas mas comunes son:

- a) Falla en imanes y desmagnetización: Es una de las fallas mas severas, debido a que concluye con un daño severo y paro total de la máquina y suele ser irreversible. La desmagnetización de la máquina puede terminar en una atracción magnética desequilibrada debido a que los imanes no generan la misma atracción en las bobinas esto puede generar mayores vibraciones en el rotor, lo cual puede terminar, en una falla catastrófica.
- b) Atracción magnética desequilibrada: Este error puede ser derivado de la excentricidad o la desmagnetización de los imanes, genera ruido y vibraciones destructivas, además de generar desgaste en los rodamientos [44].

Técnicas de diagnóstico de Fallas

Existen diferentes técnicas para la detección y diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas. La presente sección muestra algunas de ellas, se pueden clasificar en 3 tipos:

- a) Basado en procesamiento de señales: Con los avances de la tecnología digital en los últimos años, es posible tener una capacidad adecuada de procesamiento de datos en plataformas computacionales a relativamente un bajo costo. Se pueden utilizar para

mejorar las características del sistema de diagnóstico en tiempo real además de las funciones normales de protección de la máquina.

- b) Basado en modelos: Se basa en un análisis teórico de la máquina cuyo modelo se utiliza para predecir firmas de fallas. La diferencia entre firmas medidas y simuladas se utiliza como detector de fallas.
- c) Basado en datos: Este tipo de técnica no requiere ningún conocimiento de los parámetros ni del modelo de la máquina debido a que los datos muestreados de la máquina se procesan para extraer un conjunto de características que se agrupan para clasificarlas para después decidir el tipo de técnica que se utilizara para la detección de la falla, la inteligencia artificial y los reconocimiento de patrones son algunas de ellas.

En la figura 12 se muestra un diagrama a bloques sobre como funciona de manera general el modelo basado en procesamiento de señales .

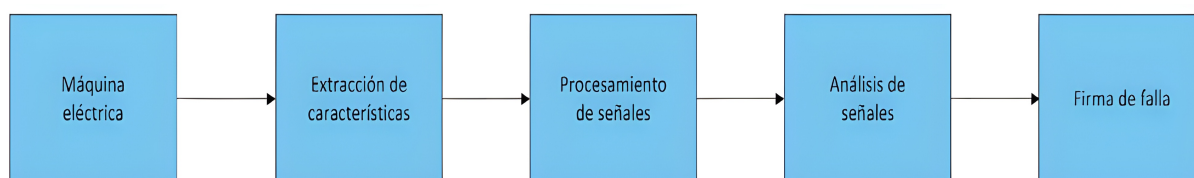


Figura 12. Modelo basado en procesamiento de señales.

Se tratan de técnicas de análisis de señales que comparan el comportamiento de la señal de corriente de sistemas de aerogeneración. Para el presente trabajo de investigación se utilizarán las técnicas basadas en el procesamiento de señales.

Modelos basados en procesamiento de señales.

Una manera eficaz para la detección y diagnóstico de fallas eléctricas puede obtenerse de un monitoreo de condiciones de la máquina ya que han sido explorados para fallas dentro de las máquinas eléctricas [45]. Pueden dividirse en grupos generales los cuales son:

- a) Mediciones de temperatura: Se implementa midiendo la temperatura local de la máquina y los enfoques basados en modelos o parámetros. Una de las técnicas comúnmente utilizadas es la detección infrarroja la cual es de análisis no invasiva, se utiliza como una técnica de monitoreo de condiciones sin contacto con la máquina eléctrica. Una de las ventajas de este tipo de análisis es que no ocupa mucha instrumentación y que suele ser utilizada para la detección de fallas en diversos sectores como el agrícola, aviación, electrónica, etc.

- b) Mediciones químicas: Para este tipo suelen utilizarse dos diferentes métodos de análisis. El primero es el método del gas refrigerante, el cual se puede utilizar para el diagnóstico de fallas en el aislamiento y el devanado del estator. La degradación del aislamiento produce gas monóxido de carbono, que pasa al circuito de aire de refrigeración y se detecta mediante un método de absorción por infrarrojos. El segundo método estudia los residuos del lubricante analizando las partículas e impurezas en el lubricante, se usa generalmente para detectar fallas en rodamientos.
- c) Mediciones de vibraciones: Es uno de los métodos más eficaces para los motores de inducción. Este tipo de análisis es utilizado debido a que durante su uso, los motores generan vibraciones que están directamente relacionadas a problemas con el sistema giratorio, rotor, baleros, así como por el forzamiento en las partes electromagnéticas del motor, es decir, rotor y estator. Una máquina eléctrica en óptimas condiciones genera una señal de vibración débil, por el contrario al ocurrir una falla dentro del motor este genera una señal de vibración grande.
- d) Descarga parcial (PD): Las PD se explican como una pequeña descarga en un vacío lleno de gas o en una superficie dieléctrica de un líquido o un sistema de aislamiento sólido. Este método solo puede ser utilizado para fallas relacionadas con el aislamiento debido a que estas descargas solo se producen por imperfecciones del mismo.
- e) Mediciones eléctricas: Son mediciones más factibles debido a que se encuentran disponibles en el convertidor de potencia y son útiles para el procesamiento de señales. Las señales sin contacto son aún más atractivas porque son intrínsecamente no invasivas, siempre y cuando se puedan evitar la influencia de fuentes externas. La corriente eléctrica del estator suele ser la más utilizada. El análisis de firma de corriente de la máquina (MCSA, por sus siglas en inglés) se usa generalmente para diagnosticar fallas mecánicas y eléctricas, como la barra del rotor rota, falla en el devanado del estator, etc. Las técnicas de análisis de corriente son sugeridas para un rendimiento confiable y para mejorar la eficiencia de las máquinas eléctricas. Esta técnica funciona obteniendo señales de corriente y voltaje del estator de manera no invasiva las cuales se consideran para obtener la firma de falla. La corriente eléctrica se extrae de la máquina para después ser procesada y llevarla a un espectro de análisis para de esta manera poder diagnosticar la falla.

De manera general se puede concluir que aunque existen diferentes técnicas para la detección y diagnóstico de fallas en las máquinas eléctricas, es difícil precisar que algún método sea mejor que otro, si no, más bien en que el método a utilizar para el diagnóstico y

detección de fallas, depende de la necesidad del usuario, así como del costo-beneficio que este dispuesto a pagar.

Normalmente se utiliza el análisis de frecuencia. Este tipo de técnica puede usarse para mejorar la relación señal-ruido y normalizar los datos para aislar la falla de otros fenómenos. Se utilizaron las señales trifásicas que provienen de las corrientes del estator, las cuales, son obtenidas mediante sensores del tipo no invasivo, es decir se utilizara la técnica MCSA.

Herramientas de Diagnóstico de Fallas Utilizadas con la Técnica MCSA

Existen diferentes tipos de herramientas utilizadas para efectuar el diagnóstico de fallas, en la presente investigación se utiliza la técnica MCSA, se adopta el uso de herramientas del tipo tiempo-frecuencia para efectuar su análisis.

Muchos trabajos ya reportados utilizan herramientas de tiempo frecuencia para efectuar el diagnóstico, identificación y detección de fallas mediante la técnica MCSA [25], [6], [15], debido a la naturaleza de las señales adquiridas de los banco de pruebas experimentales, ya sea análisis de vibraciones ó de corriente, estas señales contienen la información necesaria para detectar la falla.

Para este trabajo de investigaciones se utilizan cuatro herramientas, el fasor espacial instantáneo (ISP, por sus siglas en inglés) como herramienta previa al análisis de las señales de corriente, la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y el análisis multi-resolución a través de la transformada discreta ondeleta (DWT, por sus siglas en inglés) como herramientas de análisis de señales.

Modulo del Fasor Espacial de Park (ISP).

Las señales trifásicas obtenidas del generador serán analizadas aplicando el vector de park, también conocido como fasor espacial instantáneo o ISP, es una herramienta que engloba toda la información de las señales trifásicas en un solo vector, lo cual lo hace una herramienta útil para el análisis de máquinas eléctricas [46]. Con base en las corrientes de magnetización de un sistema trifásico balanceado en estado estable, como se muestra en la ecuación (1).

$$i_a = \hat{I} \cos(\omega_t + \phi), \quad i_b = \hat{I} \cos(\omega_t + \phi - 120), \quad i_c = \hat{I} \cos(\omega_t + \phi + 120). \quad (1)$$

Este sistema puede representarse a través del ISP, que para sistemas balanceados puede definirse por medio de la ecuación (2) para las corrientes.

$$\tilde{I}^2 = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c) \quad (2)$$

donde $a = 1 \angle 120^\circ$.

El sistema trifásico independientemente de la perturbación, cumple con el teorema de Fortescue [47], que establece que una señal trifásica puede generarse a partir de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero, como se muestra en la ecuación (3).

$$i_a = i_a^+ + i_a^- + i_a^0, \quad i_b = i_b^+ + i_b^- + i_b^0, \quad i_c = i_c^+ + i_c^- + i_c^0. \quad (3)$$

donde i_a^+ , i_a^- y i_a^0 son:

$$i_a^+ = \frac{1}{3}(i_a + a^2i_b + ai_c), \quad i_a^- = \frac{1}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c), \quad i_a^0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c), \quad (4)$$

Y a través de (4) se describen i_b^+ , i_b^- , i_b^0 , i_c^+ , i_c^- y i_c^0 por las expresiones mostradas en (5).

$$i_b^+ = a^2i_a^+, \quad i_c^+ = ai_a^+, \quad i_b^- = ai_a^-, \quad i_c^- = a^2i_a^-, \quad i_b^0 = i_a^0, \quad i_c^0 = i_a^0. \quad (5)$$

El ISP de corriente también puede expresarse por medio de las secuencia positiva, negativa y cero, como se muestra en la ecuación (6).

$$\tilde{I}^2 = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^- + \tilde{I}^0 \quad (6)$$

Al definir el ISP de corriente de una señal trifásica a través de sus componentes de secuencia positiva, negativa y cero, se encuentra que este se puede expresar sólo en términos de su secuencia positiva y negativa ya que la secuencia homopolar o cero es siempre igual a cero. Entonces el ISP como se muestra en (7).

$$\tilde{I}^2 = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^- \quad (7)$$

Para obtener el módulo del ISP, es necesario elevar al cuadrado la magnitud del ISP, como se muestra en la ecuación (8), al realizarlo, se puede observar su naturaleza oscilatoria.

$$|\tilde{I}|^2 = |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 + 2(\hat{I}^+ \hat{I}^-) \cos(2\omega t + \phi^+ + \phi^-) \quad (8)$$

De estas componentes se puede obtener el valor promedio, el cual se muestra en (9).

$$\langle |\tilde{I}|^2 \rangle = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 \quad (9)$$

Por lo tanto el modulo del ISP oscila entre los valores máximos y mínimos de la ecuación (10).

$$|\tilde{I}|_M^2 = (\hat{I}^+ + \hat{I}^-)^2, \quad |\tilde{I}|_m^2 = (\hat{I}^+ - \hat{I}^-)^2 \quad (10)$$

También se pueden obtener las magnitudes de los componentes de secuencia postiva y negativa en términos de los valores de oscilación del ISP como se muestra en la ecuacion (11)

$$\hat{I}^+ = \frac{(|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m)}{2}, \quad \hat{I}^- = \frac{(|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m)}{2} \quad (11)$$

De esta manera, las componentes de secuencia positiva y negativa se obtienen a partir de los valores extremos del módulo del ISP, por lo que el monitoreo de estas señales permite la estimación de desbalance de corriente IU , como se observa en la ecuación (??).

$$\%IU = 100 \frac{\hat{I}^+}{\hat{I}^-} = 100 \frac{(|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m)}{(|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m)} \quad (12)$$

Una forma simple de determinar el efecto que tiene un desbalance una señal de corriente de una máquina electrica es utilizar el vector de park por facilidad matematica las corrientes se trasladan a un marco de referencia α y β con ayuda de la transformada de concordia que se muestra en la ecuación (13).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{-2\pi}{3}) & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ 1 & -\sin(\frac{-2\pi}{3}) & -\sin(\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Una vez obtenido los marcos de referencia α y β el modulo de la corriente se calcula como se muestra en la ecuación (14).

$$|\tilde{I}|^2 = (i_\alpha)^2 + (i_\beta)^2 \quad (14)$$

Por lo que tomando como base la ecuación (14) podemos obtener el valor del ISP de la siguiente manera:

$$ISP = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (15)$$

El módulo del ISP es sensible a los desbalances de las corrientes del estator, como consecuencia puede ser utilizada para el diagnóstico de fallas, esto se logra analizando el contenido armonico del fasor.

Algoritmo del fasor espacial instantáneo de Park (ISP).

Con base en el modulo de fasor espacial instantáneo de Park visto en la sección anterior, se desarrollo un algoritmo en el software Matlab. Para validar su funcionamiento se

obtuvieron las corrientes trifásicas del PMSG.

En la figura 13 se muestran las corrientes trifásicas experimentales del estator del PMSG para el caso sin falla, una vez capturadas, las corrientes del estator son mapeadas al marco de referencia fijo de concordia también conocido como alfa-beta, en la figura 14 ilustran dichas corrientes.

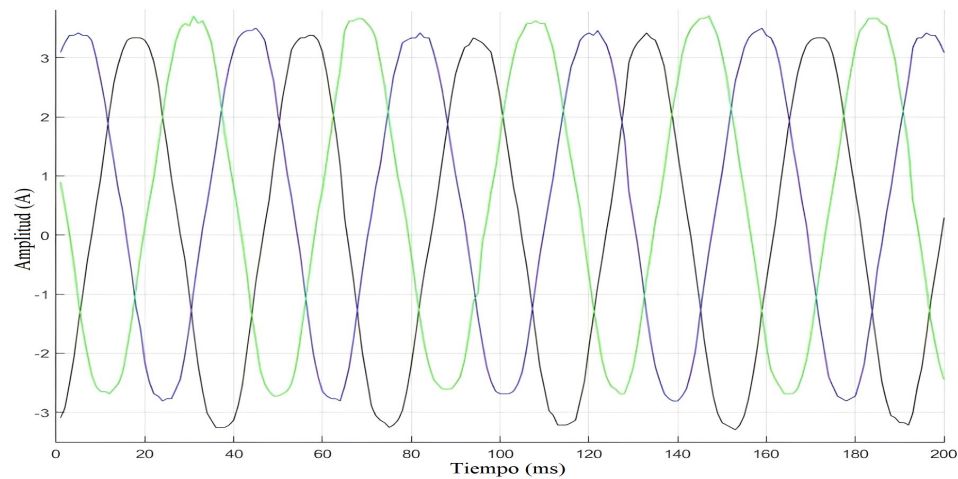


Figura 13. Corrientes trifásicas experimentales del PMSG.

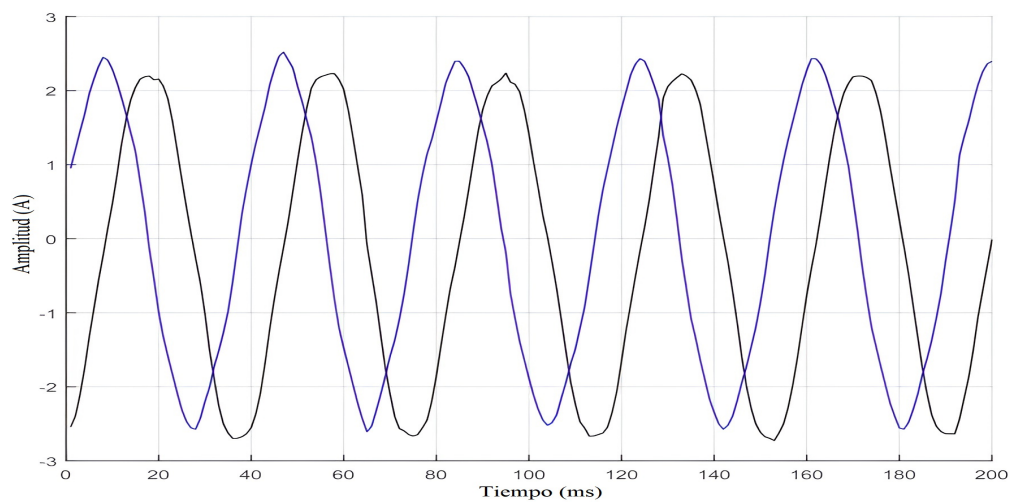


Figura 14. Corrientes alfa-beta del estator del PMSG

Una vez que se tienen las corrientes del estator mapeadas en el marco de referencia de concordia, se obtiene el módulo del fasor espacial instantáneo de Park mostrado en la formula (15). Como se ilustra en la figura 15 se muestra el gráfico resultante del módulo del ISP para el caso sano.

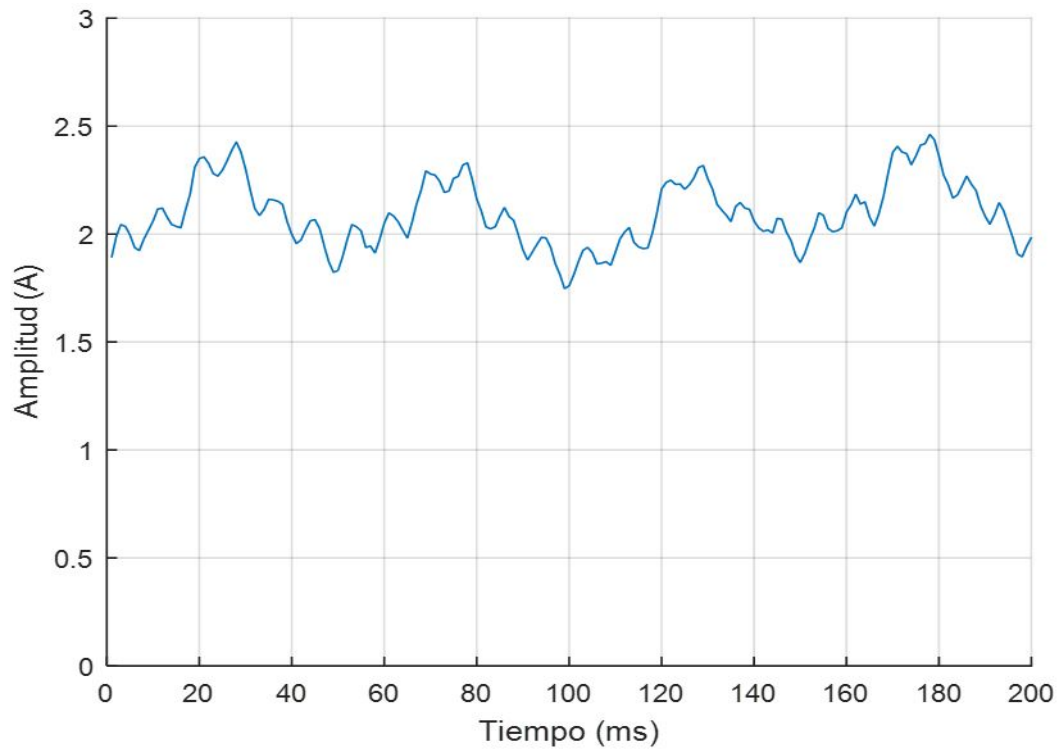


Figura 15. Modulo ISP

El modulo del vector de Park nos sirve para localizar la firma de falla la cual se encuentra principalmente al doble de la frecuencia fundamental de la señal, para poder localizar esta firma en el espectro de frecuencias se realiza mediante la transformada rápida de Fourier(FFT por sus siglas en ingles.) y con ayuda de las ondeletas.

Transformada Discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier es la herramienta más ampliamente utilizada para efectuar el análisis espectral de señales. Por lo que para poder utilizarla es necesario conocer el transfondo detras de la transformada discreta de Fourier, por lo que se mencionaran los conocimientos previos necesarios para poder realizar esta transformada,

Series continuas de Fourier

En esta sección se presenta una herramienta para el análisis en frecuencia en tiempo continuo. La representación matemática basica para las series de Fourier es una sumatoria de senoides ó exponenciales complejas relacionadas armónicamente [48]. La representación

matemática se puede observar en la ecuación (16).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (16)$$

Una vez definida la ecuación, se calcula el valor promedio de la señal el cual se muestra en la ecuación (17)

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (17)$$

Las funciones pares (a_n) son aquellas que satisfacen $f(-t) = f(t)$. En la serie de Fourier, la función par solo contiene términos del coseno, debido a que todas las partes del seno desaparecen debido a su simetría impar. Por otra parte las funciones impares solo contienen términos del seno, debido a que el coseno desaparece por su simetría par. Ambas se muestran en las ecuaciones (18),(19).

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (18)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (19)$$

Transformada discreta de Fourier (DTF).

En la transformada de Fourier en tiempo continuo, la señal puede consistir de un número infinito de componentes de frecuencia, donde el espacio de frecuencia se encuentra entre dos armónicos con una frecuencia $\frac{1}{T}$ en donde T es el período fundamental. Además en el caso de las señales en tiempo continuo se extienden desde $-\infty$ a ∞ . En contraste al tener una señal en tiempo discreto se extienden únicamente en un rango de $(-\pi, \pi)$ o bien de $(0, 2\pi)$. La señal en tiempo discreto con período fundamental N , puede consistir en componentes de frecuencia separadas por $\frac{2\pi}{N}$ radianes o por $f = \frac{1}{N}$ ciclos, es decir, la representación de una serie de Fourier en tiempo discreto puede contener N componentes de frecuencia. Esta es la principal diferencia entre la transformada de Fourier para señales de tiempo continuo y señales en tiempo discreto, aclarado esto podemos observar la ecuación de la DFT en la siguiente ecuación.

$$(Tf)_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{(-j\frac{2\pi kn}{N})} \quad (20)$$

donde:

k = Muestra k -ésima del espectro resultante de Fourier.

n = Muestra n -ésima de la señal de entrada.

N = Total de muestras discretas de la señal (periodo discreto).

Se aplica la identidades de Euler a la ecuación (20) para facilitar el trabajo con numeros complejos, obteniendo la ecuación (21).

$$(Tf)_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) [\cos(\frac{j2\pi kn}{N}) - j \sin(\frac{j2\pi kn}{N})] \quad (21)$$

donde:

$f(n)$ = Secuencia discreta de la señal original muestreada.

Al observar la ecuación (21) se puede notar que la transformada consta de una parte real y una parte imaginaria por lo que puede quedar representada de la siguiente manera.

$$(Tf)_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f_n [Re - Im] \quad (22)$$

Entonces:

$$Re = \cos(\frac{j2\pi kn}{N})$$

$$Im = \sin(\frac{j2\pi kn}{N})$$

Una de las desventajas que tiene la DFT es que aunque nos permite trabajar las señales en tiempo discreto su velocidad de computación es lenta debido a la gran cantidad de operaciones que se tienen que realizar para efectuarlo. Para solucionar este problema se adaptaron algunos algoritmos para poder mejorar su velocidad de computación.

Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Debido a la gran cantidad de datos que se deben analizar la DFT se convierte en un algoritmo lento debido a que se realizan cálculos matemáticos intensivos del orden de n^2 , es decir, operaciones complejas esto ocasiona que algunas veces resulte imposible su cálculo para procesos en tiempo real. En 1965 James W. Cooley y John W. Tukey se dan cuenta de este problema al utilizar la DFT para grandes cantidades de datos, deciden desarrollar un algoritmo que mejora la eficiencia de la DFT. El algoritmo de Cooley-Tukey hace a la

FFT extremadamente útil al reducir el número de calculos a partir de algo del orden de n^2 a $n \log n$, lo que obviamente ofrece una enorme reducción en el tiempo de cálculo [49]. En terminos simples la FFT es un método eficiente para calcular la DFT. En [50] se describe como: Un algoritmo que puede reducir el tiempo necesario para encontrar la transformada discreta de Fourier de varios minutos a menos de un segundo, y puede reducir los costos de varios dolares a varios centavos.

En este trabajo de investigación se utilizó un algoritmo donde el procedimiento se basa en descomponer la DFT de N -puntos en varias DTFs mas chicas sucesivamente. Para explicar de una mejor manera el funcionamiento basico del enfoque utilizado, supongamos que la computación de la DFT de N -puntos donde " N " es un vector dividido en " M " partes de longitud " L ", es decir, puede ser factorizado como un producto de dos enteros como se muestra en la ecuación (23).

$$N = LM \quad (23)$$

Ahora bien se sabe que la secuencia $f(n)$, $0 \leq n \leq N - 1$ son los datos obtenidos del muestreo realizado para la obtención de la DFT, estos estan representados como un arreglo unidimensional como se muestra en la figura 16.

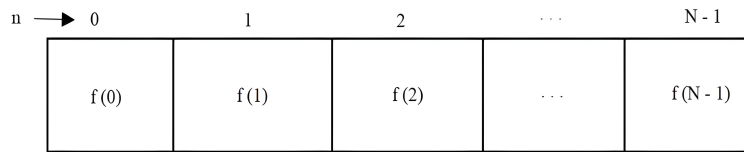


Figura 16. Arreglo unidimensional de " n " de datos

Donde " n " es el cantidad de elementos que componen una muestra y " N " es el número total de datos.

Una vez identificado el arreglo unidimensional de los datos, se procede a realizar un reacomodo de los datos ordenando en forma de un arreglo bidimensional con " L " filas de longitud " M " donde $0 \leq l \leq L - 1$ y $0 \leq m \leq M - 1$ como se muestra en la figura 17 .

Una vez que se obtiene el arreglo bidimensional a partir de un arreglo unidimensional se efectua una DFT a cada fila, es decir se realizan " L " DTF's de " M " puntos cada una como se muestra en la ecuación (24).

$$X[l, q] = \sum_{m=1}^{M-1} f(l, m) W_M^{mq} ; \{l = 0, 1, 2, 3, \dots, L - 1; \quad 0 \leq q \leq M - 1\} \quad (24)$$

Lo que implica realizar LM^2 multiplicaciones complejas y $LM(M-1)$ sumas complejas.

m		0	1	2	...	M - 1
l	0	$f(0,0)$	$f(0,1)$	$f(0,2)$	...	$f(0, M - 1)$
	1	$f(1,0)$	$f(1,1)$	$f(1,2)$	...	$f(1, M - 1)$
	2	$f(2,0)$	$f(2,1)$	$f(2,2)$	...	$f(2, M - 1)$
	.	.	.	.	.	.
	L - 1	$f(L - 1, 0)$	$f(L - 1, 1)$	$f(L - 1, 2)$	...	$f(L - 1, M - 1)$

Figura 17. Arreglo bidemnsional de lxm datos

El siguiente paso es realizar un re-acomodo al arreglo bidimensional conocido como factor de giro para intercambiar las filas con las columnas, de esta manera calcular "M" DFT's de "L" puntos cada una, lo que implica ML^2 multiplicaciones complejas y $ML(L - 1)$ sumas complejas. Es decir, que se han reducido las operaciones de N^2 a $N(M + L + 1)$ multiplicaciones complejas y de $N(N - 1)$ a $N(M + L - 2)$ sumas complejas.

El siguiente paso consta de aplicar nuevamente un reacomodo al arreglo bidimensional de datos para regresar a un arreglo unidimensional nuevamente, el algoritmo fue implementado en el paquete computacional Matlab siguiendo el enfoque mencionado con anterioridad, dicho enfoque se ilustra en el daigramas de flujo que se muestra en la figura 18.

Para validar el correcto funcionamiento del algoritmo implementado, se procedio a generar una señal base denominada fundamental del tipo " $A \sin(\omega t)$ " con una amplitud de 10V y una frecuencia de 60Hz, la cual despues fue contaminada con una serie de armonicos de 3V y 1V de amplitud asi como 3 y 5 veces la frecuencia de la señal original respectivamente. Esto genera una señal contaminada, la cual es aplicada al algoritmo para obtener su contenido espectral, en la figura 19 se ilustra cada una de las señales artificiales generadas para la validacion del algoritmo.

El siguiente paso seria ejecutar el algoritmo programado en el paquete computacional

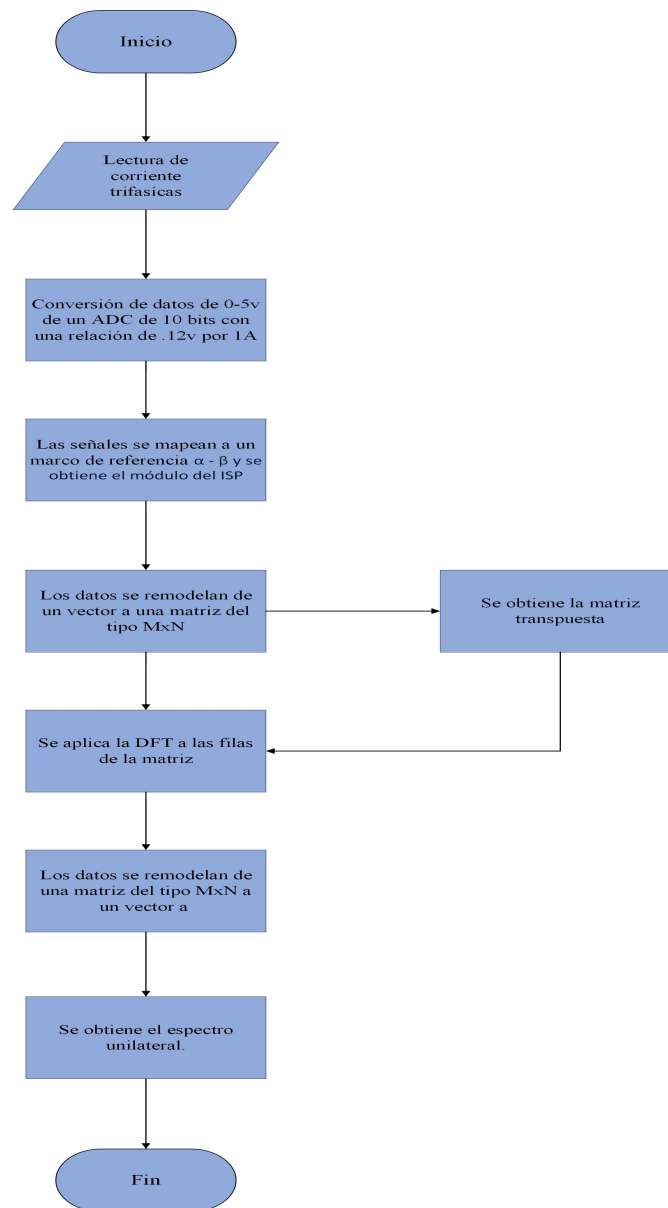


Figura 18. Diagrama de flujo

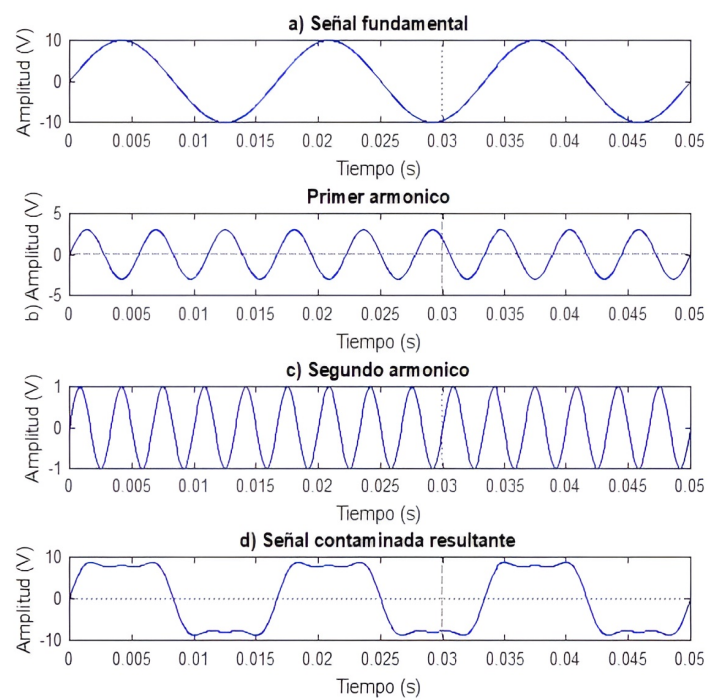


Figura 19. a)Señal fundamental, b)Primer armónico, c)Segund armónico, d)Señal contaminada de prueba.

Matlab de la FFT base 2 diezmada en tiempo. En la figura 20 es posible ver el contenido espectral de la señal contaminada de prueba, en la cual es posible apreciar las componentes, es decir, se observa la señal fundamental la cual tiene una amplitud de $10V$ a una frecuencia de $60Hz$, así como el primer y segundo armónico, logrando identificar sus amplitudes de $3V$ y $1V$ así como sus frecuencias al triple y quintuple valor de la frecuencia de la señal fundamental respectivamente.

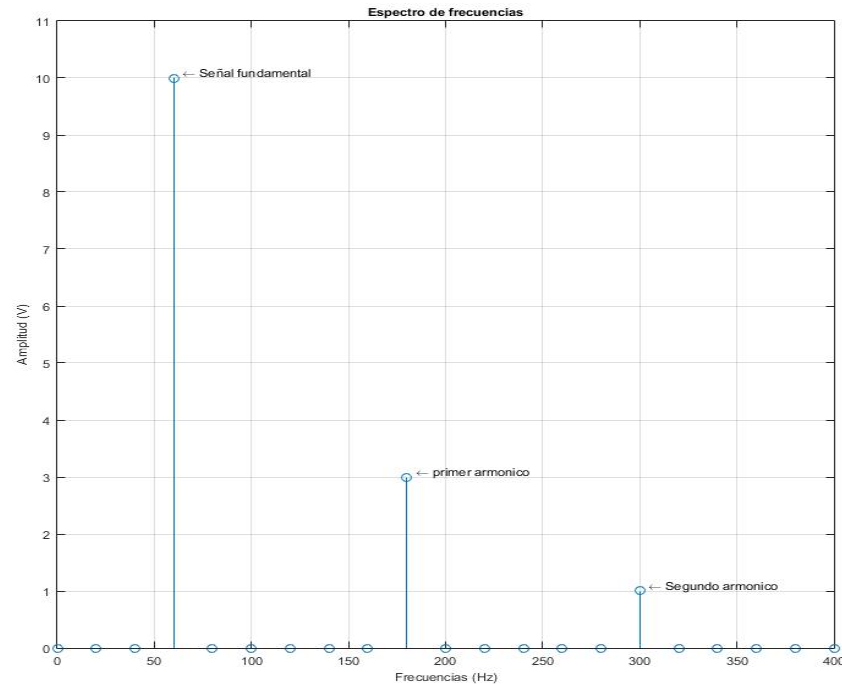


Figura 20. Espectro de frecuencias de la señal de prueba del algoritmo de la FFT.

Transformada Discreta de Ondeleta (DWT).

La transformada discreta de ondeleta es una herramienta matemática que aplicada a una señal cambia la forma de ésta aplicando señales que varían en duración conocidas como "ondeletas", pueden ser utilizadas para una gran variedad de tareas fundamentales en el procesamiento digital de señales la transformación tiene el objetivo de mostrar características que pueden no ser evidentes en la señal original [51]. Para su aplicación a una señal $f(t)$ se necesita una función conocida como ondeleta madre la cual es una onda que puede tener una forma irregular y una duración limitada en tiempo, las ondeletas madre más comunes se muestran en la tabla 4.

La función ondeleta se define como el cuadrado de una función integrable $\Psi(t)$ que cumple con la condición de admisibilidad que implica que la transformada de Fourier de

Ondeleta	Descripción
Haar	Es la ondeleta más simple, funciona como base para todas las otras ondeletas, se utiliza generalmente para comprimir audio y eliminar ruido. Una característica distintiva es que se presta fácilmente a cálculos manuales simples.
Daubechies.	Ondeleta poco simétrica con un soporte compacto, tiene el mayor número de momentos de desvanecimiento para un determinado ancho de ventana. Los filtros de escalado asociados son filtros de fase mínima.
Symlets	Casi simétrica con soporte compacto. Ondeleta con menos asimetría y el mayor número de momentos de desvanecimientos para un ancho de ventana dado. Los filtros de escalado asociados son casi filtros de fase lineales.
Coiflets	Casi simétrica con soporte compacto. Ondeleta con el mayor número de momentos de desvanecimiento tanto para reconstrucción como para descomposición para un ancho de ventana dado.
Meyer	Ondeleta ortogonal infinitamente periódica.
Mexican hat	Ondeleta que representa la segunda derivada de la función de probabilidad Gaussiana.

Tabla 4. Tipos de ondeletas madre.

la función $\Psi(t)$ se desvanece en el valor de frecuencia cero [52]. Una forma de definir la función ondeleta es a través de sus procesos, de dilatación dependiente de la escala s y de traslación dependiente del parámetro τ . La función ondeleta en estos términos se muestra en la ecuación (25)

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), \quad s > 0, \quad \tau \in \mathbf{R} \quad (25)$$

Una vez obtenida la definición de ondeleta, se puede definir la transformada de ondeleta continua (CWT, por sus siglas en inglés) como se muestra en la ecuación (26)

$$\Psi(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (26)$$

donde Ψ^* es el complejo conjugado de la función ondeleta Ψ escalada y trasladada.

Al utilizar la CWT se obtiene información redundante debido a que los parámetros s y τ varían constantemente, dando como resultado el aumento de memoria y tiempo computacional. Para la eliminación de redundancia en los datos de las ondeletas, mientras que al mismo tiempo sacrificamos información no relevante de la señal original se logra discretizando la señal. Para discretizar la escala s y ligarla a los pasos de los valores del parámetro de traslación τ se utiliza la discretización logarítmica, la cual se muestra en la ecuación (27).

$$\begin{cases} s = s_0^j \\ \tau = k\tau_0 s_0^j \end{cases} \quad s_0 < 1, \quad \tau_0 \neq 0, \quad j, k \in \mathbf{Z} \quad (27)$$

En donde $\mathbf{Z}$ pertenece al conjunto de los números enteros. De esta manera la ondeleta puede expresarse como se muestra en la ecuación (28).

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \Psi\left(\frac{t - k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad (28)$$

Normalmente en la forma discreta de la ondeleta se adoptan los valores de $s_0 = 2$ y $\tau_0 = 1$, que corresponden a la discretización diádica, por lo tanto la transformada discreta de ondeleta (DWT, por sus siglas en inglés) se representa como se muestra en la ecuación (29)

$$W(j, k) = \langle f(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t - k2^j}{2^j}\right) dt \quad (29)$$

Donde $\langle f(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle$ es la convolución de los datos y la ondeleta.

El componente principal del análisis de ondeletas es el análisis multiresolución (MRA, por sus siglas en inglés) el cual consiste en la descomposición de una señal principal en sub-señales de diferentes tamaños y niveles de resolución, como se muestra en la figura 21, donde $h(n)$ y $l(n)$ son filtros de paso alto y paso bajo, respectivamente. Es decir, la señal pasa por una descomposición que reduce a la mitad la resolución de tiempo, acortando a la mitad el número de muestras que caracteriza toda la señal, esto ocasiona que se duplique la resolución de frecuencia, ya que la banda de frecuencia de la señal ahora abarca solo la mitad de la banda de frecuencia anterior, reduciendo así la incertidumbre en la frecuencia a la mitad.

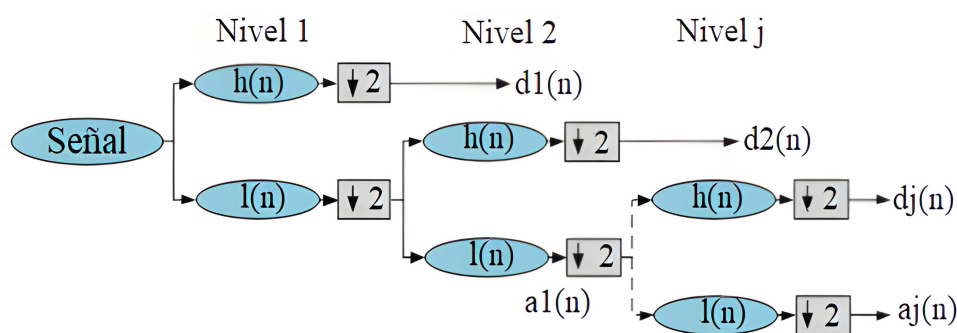


Figura 21. Análisis Multiresolución.

Ondeleta Madre de Haar

La ondeleta Haar es la ondeleta mas sencilla. En forma discreta la ondeleta Haar esta relacionada con una operacion matemática llamada "transformada Haar". La transformada Haar sirve como bases para todas las otras ondeletas, por lo cual la correcta comprensión y estudio de la ondeleta Haar permite un buen fundamento para la comprensión de otras ondeletas en el futuro [51]. En la figura 22 podemos observar la ondeleta madre Haar, así como magnitud.

Uno de los usos mas comunes para la ondeleta Haar se basa en la manipulación de señales de audio, ya sea para comprimir las señales de audio y eliminar o reducir el ruido que estas puedan presentar. Una de las características principales y que vuelven a la transformada Haar una de las mas utilizadas tiene que ver con su simplicidad para poder realizar calculos a mano ó calculos computacionales.

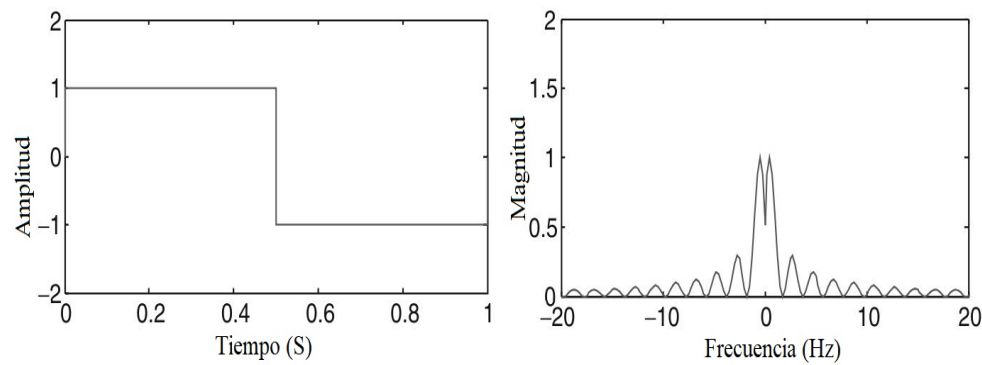


Figura 22. Ondeleta Haar y la magnitud de su espectro

Ondeleta Madre de Daubechies

La familia de las ondeletas Daubechies son ortogonales, sin embargo son asimétricas, por lo que generan una gran distorsión de fase. Por lo tanto no se pueden utilizar en aplicaciones donde se necesite mantener la información de la señal de fase [52].

La ondeleta Daubechies es una ondeleta compacta debido a el ancho en que se manejan el ancho de sus bases, es decir, el orden de la ondeleta. La ondeleta Daubechies tiene una gran versatilidad para diferentes usos debido a que puede manejarse con diferentes coeficientes (2,4,.....20,etc.). En la figura 23 podemos observar la ondeleta Daubechies con coeficientes de valor 2 y 4.

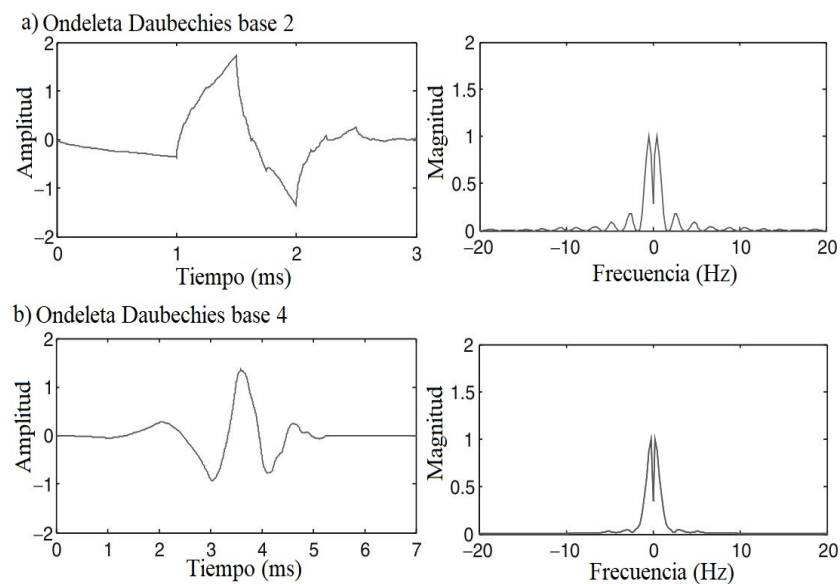


Figura 23. a) Ondeleta Daub2, b) Ondeleta Daub4

Ondeleta Madre de Coiflet

La familia de la ondeleta Coiflet es ortogonal y casi simétrica. Esta propiedad de casi simetría conduce a las características de fase casi lineal de la wavelet de Coiflet.

Estas wavelets están diseñadas para mantener una coincidencia extremadamente estrecha entre los valores de tendencia y los valores de señal originales. Siguiendo una sugerencia de Ronald Coifman, estas ondeletas fueron construidas por primera vez por Daubechies, quien los llamó Coiflet. Todas las ondeletas Coiflet se definen de manera similar; sin importar el número de coeficientes (2,4,...,10,etc.). En la figura 24 podemos observar la ondeleta madre Coiflet con coeficientes para valores 2 y 4 respectivamente.

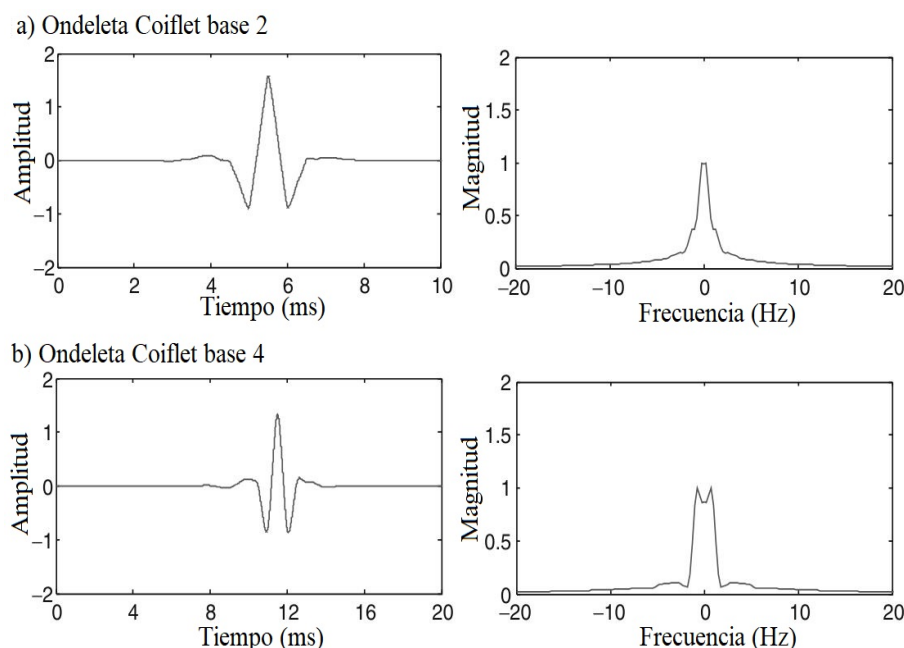


Figura 24. a) Ondeleta Coif2, b) Ondeleta Coif4

Una vez entrado en contexto el tema de las ondeletas, se sigue el mismo procedimiento que se realizó con la FFT, es decir, se diseña un algoritmo en el paquete computacional Matlab para las diferentes ondeletas madres utilizadas durante este trabajo de investigación.

Transformada discreta de ondeleta Haar 1.

El primer paso es identificar con que tipo de señal se está trabajando, al estar trabajando las señales con un procesamiento digital, la señal es una "señal discreta" la cual

generalmente podemos expresar como:

$$f = (f_1, f_2, \dots, f_N) \quad (30)$$

Existen ondeletas de varios niveles, la transformada Haar descompone una señal discreta en dos subseñales conocidas como "promedio" ó "coeficientes" representadas como a_m^n y "fluctuación" o "detalle" representado por d_m^n , donde los superíndices representan el nivel de la ondeleta, y el subíndice el nivel de descomposición de análisis mediante MRA.

EL primer promedio o coeficiente se representa $a^1 = (a_1, a_2, \dots, a_{N/2})$ y se obtiene al promediar el primer par de los datos de la señal, es decir, $\frac{(f_1+f_2)}{2}$ y el resultado obtenido multiplicarlo por $\sqrt{2}$, y así consecuentemente como se muestra en la ecuación (31).

$$a_m = \left(\frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{2} \right) \sqrt{2} \quad (31)$$

en donde $m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2}$.

La primera fluctuación o el primer detalle de la señal f se representa $d^1 = (d_1, d_2, \dots, d_{\frac{N}{2}})$ y a diferencia de la tendencia esta se obtiene de promediar la diferencia entre el primer par de datos, es decir, $\frac{(f_1-f_2)}{2}$, y el resultado se multiplica por $\sqrt{2}$, por lo cual $d_1 = \left(\frac{f_1-f_2}{2} \right) \sqrt{2}$, $d_2 = \left(\frac{f_3-f_4}{2} \right) \sqrt{2}$, y así sucesivamente, por lo tanto podemos definirlo como se muestra en la ecuación (32).

$$d_m = \left(\frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{2} \right) \sqrt{2} \quad (32)$$

en donde $m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2}$.

Al obtener el "promedio" y la "fluctuación" de la señal, la transformada Haar se desarrolla en varios escenarios. Por ejemplo, el primer nivel se mapea H_1 y es definido por la ecuación (33)

$$f \longrightarrow^{H_1} (a^1 | d^1) \quad (33)$$

Al realizar la transformada Haar nivel uno, el proceso se facilita, debido a que el proceso se repite en los siguientes niveles de la transformada. Por ejemplo, para la transformada Haar nivel 1, se tiene una señal f de la cual obtenemos el primer promedio a^1 y la primera fluctuación d^1 , por lo que para obtener la segunda tendencia a^2 aplicamos la fórmula (31) a los valores de a^1 y para obtener la segunda fluctuación aplicamos la fórmula (32) a la misma a^1 , de esta manera, la transformada Haar nivel 2, quedaría de la siguiente manera.

$$(a^2|d^2|d^1)$$

Por lo tanto para la señal f se puede realizar el mismo procedimiento para la transformada Haar nivel 3 dando como resultado [51].

$$(a^3|d^3|d^2|d^1)$$

En base a el principio de la transformada Haar descrita en los parrafos anteriores, se puede utilizar la ondeleta mas simple de todas, la ondeleta Haar de nivel 1. Segun el libro A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications (2nd Ed, CRC) la ondeleta Haar nivel 1 puede representarse como:

$$\begin{aligned} W_1^1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ W_2^1 &= \left(0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ W_3^1 &= \left(0, 0, 0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ &\vdots \\ W_{\frac{N}{2}}^1 &= \left(0, 0, \dots, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \end{aligned} \quad (34)$$

Tomando en cuenta que los subíndices de W son las traslaciones de las unidades de tiempo y que los superíndices son el nivel de la ondeleta. En el libro tambien se especifica que al tener la ondeleta de Haar nivel 1, podemos obtener la fluctuación de la señal realizando un producto escalar de la señal con la ondeleta como se muestra en la siguiente ecuación.

$$d_m = fW_m^1 \quad (35)$$

De esta misma manera se puede calcular la tendencia, es decir, la tendencia se obtiene del producto escalar de la señal con las señales de ajuste como se muestra a continuación.

$$a_m = fV_m^1 \quad (36)$$

donde las señales de ajustes V_m^1 estan dadas segun la formula (37)

$$\begin{aligned} V_1^1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ V_2^1 &= \left(0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ &\vdots \\ V_{\frac{N}{2}}^1 &= \left(0, 0, \dots, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \end{aligned} \quad (37)$$

Una vez obtenida la ondeleta Haar de nivel-1, se puede aplicar el mismo procedimiento para los siguientes niveles de transformación, es decir la ondeleta Haar nivel-2 se puede definir como se muestra en la ecuación (38).

$$d^2 = (fW_1^2, fW_2^2, \dots, fW_{\frac{N}{4}}^2) \quad (38)$$

Se realiza el código en el paquete computacional Matlab para poder generar diferentes niveles de descomposición de una señal utilizando las formulas vistas en esta sección.

Transformada discreta de ondeleta Daubechies 4.

Existen diferentes tipos de ondeletas Daubechies, sin embargo todas ellas son muy similares entre si. Para el desarrollo de este algoritmo partiremos de la Daubechies de 4 coeficientes (Daub4). La ondeleta Daub4 es basicamente igual al proceso de la ondeleta Haar, es decir, si una señal f tiene una cantidad de N valores, la transformada Daub4 de nivel 1 se mapea como $f \xrightarrow{D_1} (a^1|d^1)$. Por lo que el primer promedio o coeficiente de la ondeleta Daub4 se calcula igual que en la formula (36) y la primer fluctuación se calcula como se mostró en la formula (35).

La Daub4 puede extenderse en multiples niveles de tiempo diezmando la señal al irse diviendo entre 2. Esta extensión es parecida a la que se realiza con la transformada Haar, es decir para la ondeleta Daub4 de nivel 1 la transformada D_1 a la primer tendencia a^1 , por lo que se mapea $a^1 \xrightarrow{D_1} (a^2|d^2)$. Pasando así de la primer tendencia a^1 a la segunda tendencia a^2 y a la segunda fluctuación d^2 . Entonces se obtiene la transformada Daub4 de nivel 2 D_2 , la cual se define por el mapeo de $f \xrightarrow{D_2} (a^2|d^2|d^1)$.

Como se pudo observar en los parrafos anteriores, la transformada Daub4 y la transformada Haar tienen un proceso basicamente igual, la diferencia entre estas transformadas radica en la forma en que las señales de escala y de ondeleta son definidas. Para las señales de escala se utiliza la numeración de los coeficientes de la ondeleta como: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ las cuales se muestran en la ecuación (39).

$$\alpha_1 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad \alpha_2 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad \alpha_3 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad \alpha_4 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}. \quad (39)$$

Por lo que de esta manera los valores de escala pueden quedar definidos en la transformada Daub4 de nivel 1 como se muestra en la ecuación (40).

$$\begin{aligned}
V_1^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\
V_2^1 &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\
&\vdots \\
V_{\frac{N}{2}}^1 &= (\alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2)
\end{aligned} \tag{40}$$

Una vez definidos los valores para las escalas, el siguiente paso es definir los valores para los números ondeleta, los cuales están representados por $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y su valor se encuentra definido en la ecuación (41)

$$\beta_1 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad \beta_2 = \frac{\sqrt{3} - 3}{4\sqrt{2}}, \quad \beta_3 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad \beta_4 = \frac{-1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}. \tag{41}$$

Se puede observar que los valores de las ondeletas están relacionados con los valores de la escala, es decir, $\beta_1 = \alpha_4, \beta_2 = -\alpha_3, \beta_3 = \alpha_2, \beta_4 = -\alpha_1$, utilizando estos valores para las ondeletas podemos definirlas como se muestra en la ecuación (42)

$$\begin{aligned}
W_1^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\
W_2^1 &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\
&\vdots \\
W_{\frac{N}{2}}^1 &= (\beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2)
\end{aligned} \tag{42}$$

Se realizó un algoritmo en el paquete computacional Matlab para la aplicación de la ondeleta Daubechies.

Transformada discreta de ondeleta Coiflet 4.

Otro tipo de ondeletas, son las ondeletas Coiflet que a diferencia de la ondeleta Haar y la Daubechies, está diseñada para mantener una relación muy estrecha entre los valores del promedio o coeficientes y los valores de la señal original. Todas las coiflet se definen de manera similar, por lo que para el algoritmo desarrollado en este trabajo de investigación se utilizó la ondeleta Coiflet de 4 Coeficientes (coif4). Los números para la transformada Coif4 se muestran en la ecuación (43)

$$\alpha_1 = \frac{1 - \sqrt{7}}{16\sqrt{2}}, \quad \alpha_2 = \frac{5 + \sqrt{7}}{16\sqrt{2}}, \quad \alpha_3 = \frac{14 + 2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}, \quad \alpha_4 = \frac{14 - 2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}. \tag{43}$$

Por lo que podemos sustituir los valores de escalada para la transformada como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
 V_1^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\
 V_2^1 &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\
 &\vdots \\
 V_{\frac{N}{2}}^1 &= (\alpha_3, \alpha_4, 0, 0 \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2)
 \end{aligned} \tag{44}$$

Una vez definido el valor de las escalares, los valores para las ondeletas serán representados con β como en los casos pasados, debido a que se sabe que guardan alguna relación para la ondeleta coiflet se definen de la siguiente manera, $\beta_1 = \alpha_4, \beta_2 = -\alpha_3, \beta_3 = \alpha_2, \beta_4 = -\alpha_1$, por lo que podemos definir los valores de la ondeleta como se muestran en la ecuación (45)

$$\begin{aligned}
 W_1^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\
 W_2^1 &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\
 &\vdots \\
 W_{\frac{N}{2}}^1 &= (\beta_3, \beta_4, 0, 0 \dots, 0, \beta_1, \beta_2)
 \end{aligned} \tag{45}$$

Se desarrollo un algortimo en el paquete computacional Matlab para la aplicación de la ondeleta discreta Coiflet de nivel 4.

Protocolo de tesis.

Objetivo General.

El objetivo general de la presente investigación es efectuar el diagnóstico de fallas de tipo eléctrico en el estator de un aerogenerador de imanes permanentes de baja potencia(PMSG).

Objetivos Particulares.

- 1) Efectuar la adecuación de un banco de pruebas experimental fruto de una investigación previa.
- 2) Estudiar e implementar el algoritmo de la transformada discreta y rápida de Fourier para efectuar el diagnóstico de fallas mediante técnicas de procesamiento de señales.

- 3) Estudiar e implementar los algoritmos de la transformada discreta ondeleta madre de Haar, Daubechies 4 y Daubechies 6 y Coiflet.
- 4) Efectuar pruebas experimentales y efectuar el diagnóstico de fallas de tipo drástico e incipiente del estator mediante el uso de un PMSG alterado con dicho fin.
- 5) Efectuar una publicación fruto del trabajo de investigación en un congreso especializado.

Hipotesis.

Es posible efectuar el diagnóstico de fallas eléctricas del estator en un PMSG con un carácter no invasivo analizando las señales de corrientes utilizando técnicas basadas en procesamiento de señales y mediante el uso de procesadores de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés) de bajo costo mediante una plataforma experimental construida para dicho fin.

Justificación.

El contar con una herramienta o grupo de ellas que permita efectuar el diagnóstico de fallas de PMSG de manera oportuna, en línea o fuera de ella, permitirá lograr una correcta operación de sistema de energía eólica renovable, así como efectuar una reducción del costo de los mantenimientos preventivos y correctivos así como los paros inadvertidos de los sistemas de co generación.

Capítulo 1

Metodologia.

El alto índice de fallas de tipo eléctrico en los aerogeneradores, así como el aumento en el uso de la energía eólica, la cual espera un incremento del 31 % al 48 % para el año 2050 motiva la presente investigación en el campo de energías renovables como el caso de los aerogeneradores..

Existen diferentes tipo de fallas que se presentan en los aerogeneradores, la presente investigación se centra en el estudio de fallas de tipo eléctrico del estator en el PMSG que es el tipo de falla más común para éste tipo particular de máquina eléctrica.

1.1. Adecuación de banco de pruebas experimentales para generar patrones de viento.

El principal elemento para simular el comportamiento de un PMSG es generar de manera artificial los patrones de viento. Para lograr dicha tarea, fue necesario el rediseño de un sistema electro mecánico basado en un motor de corriente directa de imanes permanentes. El sistema consiste básicamente en un control de seguimiento de velocidad en un esquema de lazo cerrado.

En la figura 1.1 se ilustra un diagrama de bloques de los elementos que forman parte del sistema generador de patrones de viento.

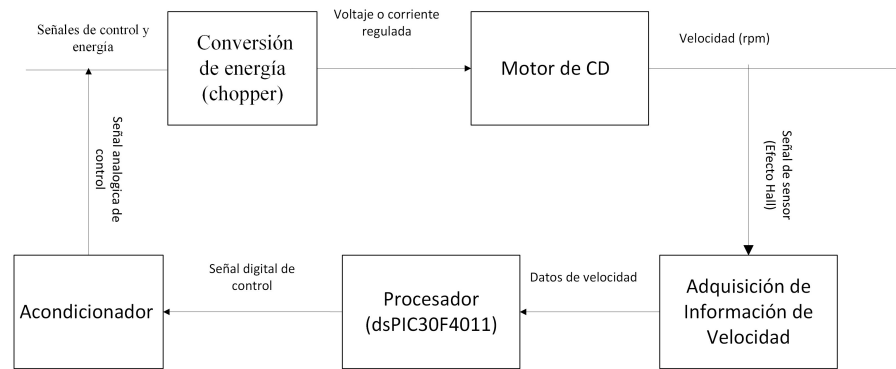


Figura 1.1. Diagrama de bloques del sistema generador de patrones de viento.

1.1.1. Chopper de un cuadrante para el control del motor de CD

Para efectuar el control del motor de corriente directa el cual impulsa el aerogenerador para simular los patrones de viento a los que se sometería dicho generador de forma real, se tomó la decisión de utilizar un Chopper de un cuadrante de tipo comercial. El Chopper opera a una tensión monofásica de $100/220V A/C$ y opera a una frecuencia de la red eléctrica de $60Hz$, además es capaz de soportar una corriente máxima de $10A$ en la carga. Cuenta con protección básica a fusible. Para el control del velocidad requiere de una entrada de referencia de voltaje de niveles TTL, es decir, un rango de voltaje de entrada de 0 a $5V$ de CD, esto permite lograr una velocidad de 0 rpm a 1750 rpm a las que opera la máquina de corriente directa utilizada. El Choper cuenta con una entrada a contacto que permite interrumpir con fines de seguridad la operación del Chopper, éste permite efectuar paros de emergencia del sistema En la Figura 1.2 se ilustra el diagrama de conexiones y en la Figura 1.3 se ilustra una imagen del sistema implementado.

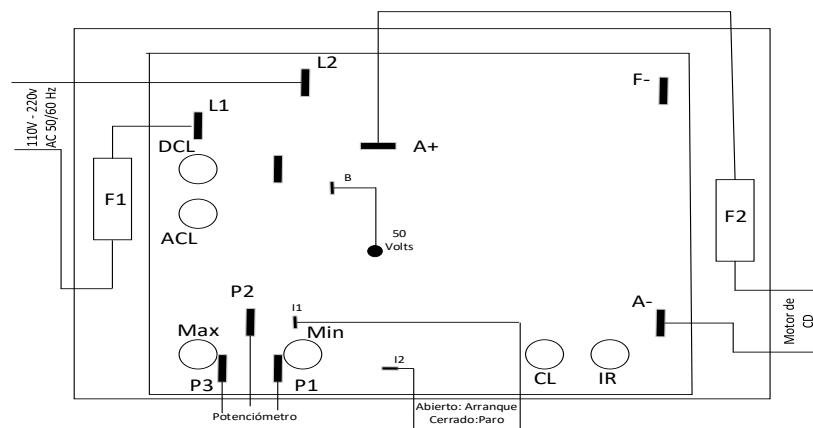


Figura 1.2. Diagrama de conexiones Chopper comercial de un cuadrante.

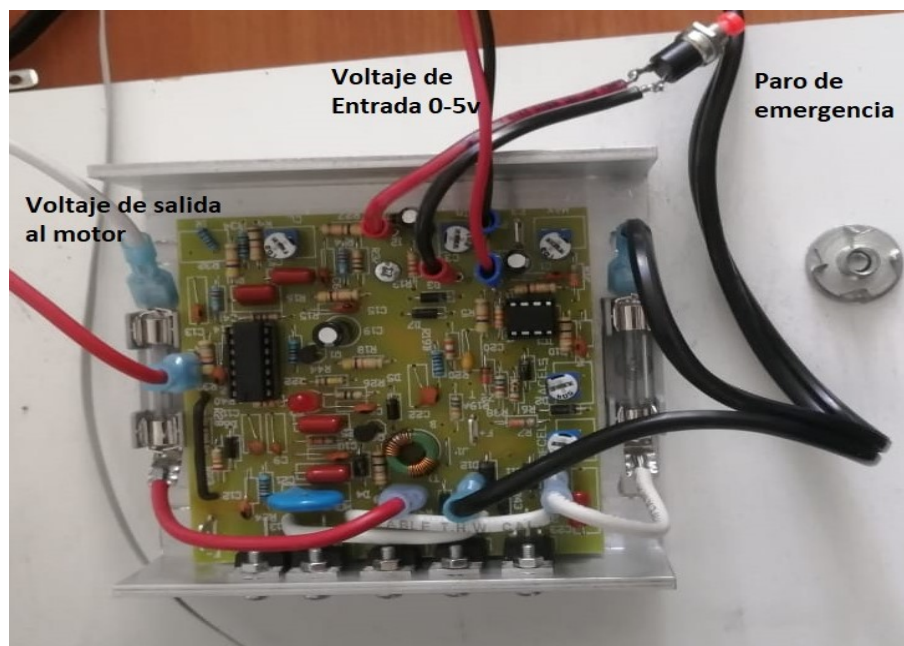


Figura 1.3. Implementación experimental del Copper de un cuadrante

1.1.2. Etapa de acoplamiento del sistema electrónico de potencia y el sistema de control.

Para lograr el control del motor de CD es necesario interactuar con la etapa de electrónica de potencia, como ya se mencionó anteriormente, se utiliza un Chopper de un cuadrante de tipo comercial, el cual requiere de una entrada de voltaje de referencia para la regulación de la velocidad, ésto se logra mediante el uso de un convertidor digital analógico (DAC por sus siglas en inglés) de 12 bits, el MCP4921 de la compañía Microchip, el cual se interconecta con el procesador principal mediante comunicación serial síncrona SPI de alta velocidad. El voltaje se acondiciona y se aísla mediante el optocoplador el HCPL7800 de la compañía Sharp, el cual entrega una salida a corriente, por lo que se implementa después de la etapa del aislamiento óptico un convertidor de corriente a voltaje mediante un amplificador operacional. Con fines de protección se añade antes de la entrada al choper de potencia un regulador basado en un diodo zener para lograr un voltaje en un rango de 0 a 5V.

En la figura 1.4 se ilustra un diagrama de bloques de manera general del acoplamiento del sistema de control con el sistema electrónico de potencia, en dicha figura se pueden apreciar todas las partes individuales con conforman el sistema de acoplamiento, es decir desde la señal de control entregada por el procesador (dsPIC30F4011) hasta el voltaje de salida

del diodo zener utilizado como regulador de voltaje.

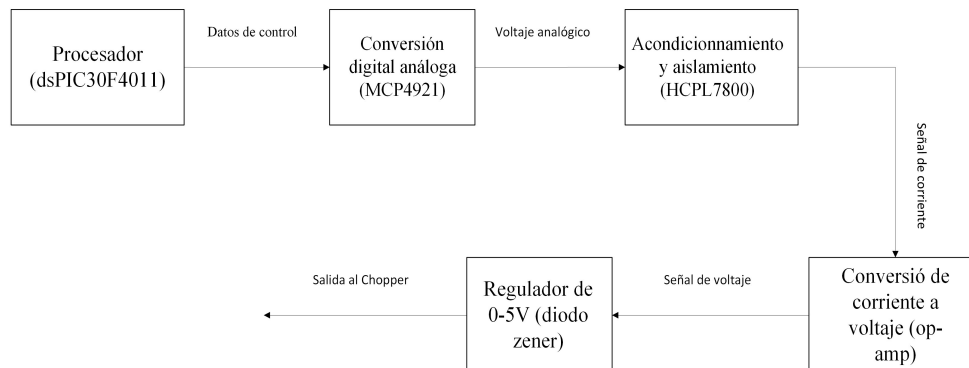


Figura 1.4. diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento.

En la figura 1.5 se presente una imagen del sistema de acoplamiento entre la unidad central de procesamiento y el sistema electrónico de potencia implementado.

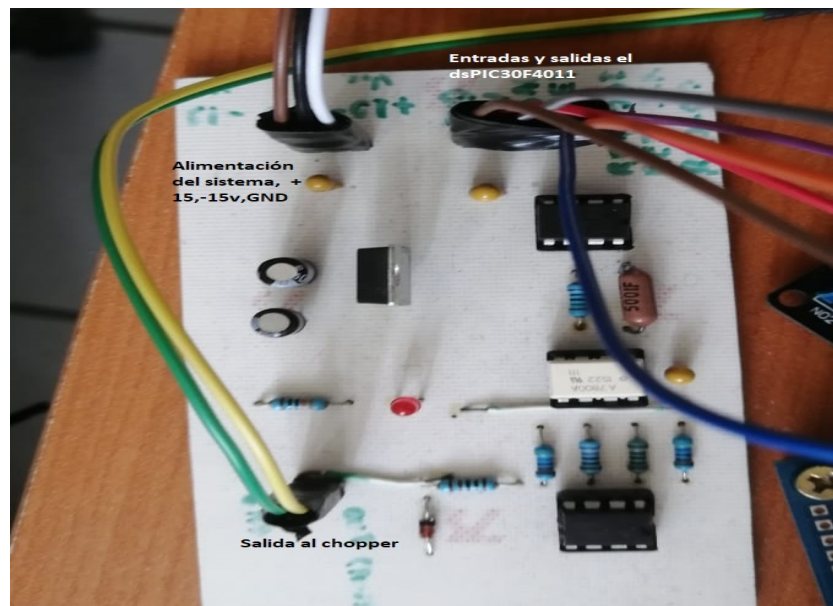


Figura 1.5. Circuito impreso DAC

1.1.3. Incorporación de imanes de neodimio al ventilador del motor de CD y diseño del sensor de efecto Hall

Para efectuar la medición de velocidad del motor de CD considerando una herramienta de bajo costo, se adopta el uso de un sensor de efecto hall basado en un transistor el A3144,

el cual es básicamente un sensor integrado que requiere solo un par de componentes externos, en la figura 1.6 se muestra el diagrama esquemático del sensor implementado. Se retira la tapa del ventilador de velocidad del motor de CD y se aprovecha el hecho de contar con 5 aspas del ventilador y en cada una de ellas se coloca un imán de neodimio de alta capacidad magnética para aumentar la resolución mecánica a 5 pulsos por revolución, ésto permite mejorar la medición de velocidad a bajas velocidades utilizando el recurso del módulo de captura con el que cuenta el procesador de señales digitales con el que cuenta el procesador.

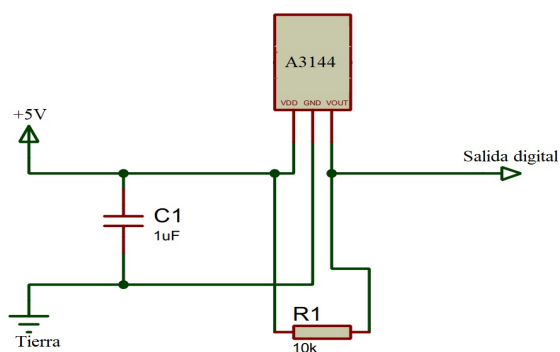


Figura 1.6. Diagrama esquemático sensor de velocidad

El diseño del sensor de velocidad entrega un tren de pulsos de voltaje de salida de niveles TTL (0 V a 5V de CD), dicho tren cambia en frecuencia en función de la velocidad del motor. El montaje del sensor de efecto Hall se muestra en la figura 1.7.



Figura 1.7. Detalle de la incorporación de los imanes de neodimio al ventilador.

1.1.4. Unidad central de procesamiento

Para efectuar el control y seguimiento de velocidad del motor de corriente directa, se utiliza un procesador de señales de punto fijo de 16 bits de la compañía Microchip, el dsPIC30F4011. La razón de la elección del procesador obedece a que cumple con los requerimiento de velocidad y capacidad de aritmética, además que el procesador es capaz de alcanzar una frecuencia de reloj de 120MHz , la segunda razón es que la presente investigación hace uso del banco de pruebas experimentales de un trabajo previo. En la figura 1.8 podemos observar el circuito donde se encuentra localizado el dsPIC.

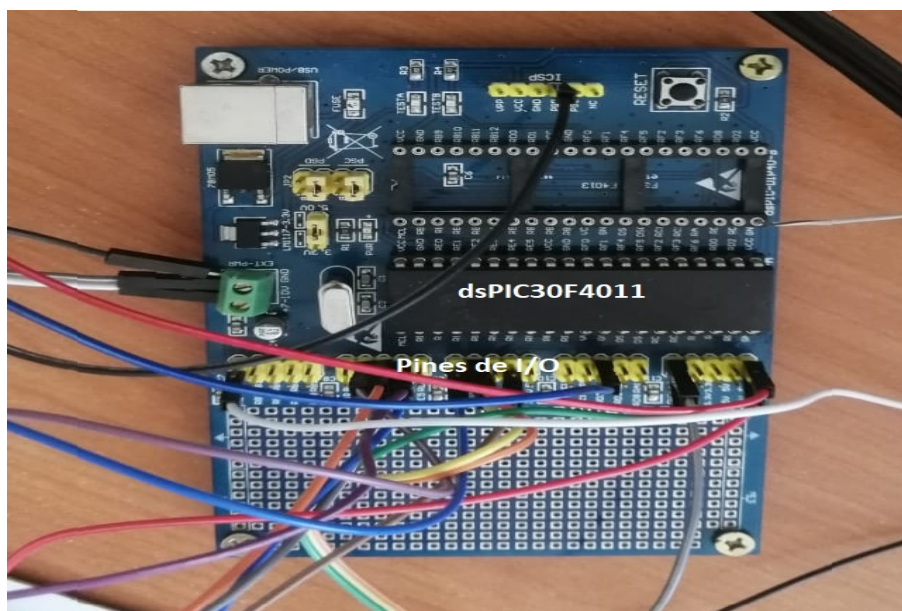


Figura 1.8. Circuito impreso del dsPIC30F4011

La unidad central de procesamiento tiene la función de efectuar el control de la máquina de corriente directa, ésto se logra mediante un proceso de comunicación vía serial a alta velocidad, ésto se logra mediante el uso de un transceiver USB-serial el llamado FTDI, ésto permite un control con la característica de tiempo real.

1.1.5. Fuentes de alimentación del sistema

Para alimentar el sistema electrónico se diseñaron un par de fuentes lineales basadas en el uso de transformador con derivación central, el cual se conecta a un puente de wheatstone de diodos para posteriormente filtrar la señal de CD mediante un filtro capacitivo. Además del uso de reguladores monolíticos para obtener diferentes niveles de salida de 5V de CD, $\pm 15\text{V}$ de CD y 17V de CD. En la figura 1.9, se muestra el sistema electrónico de potencia implementado

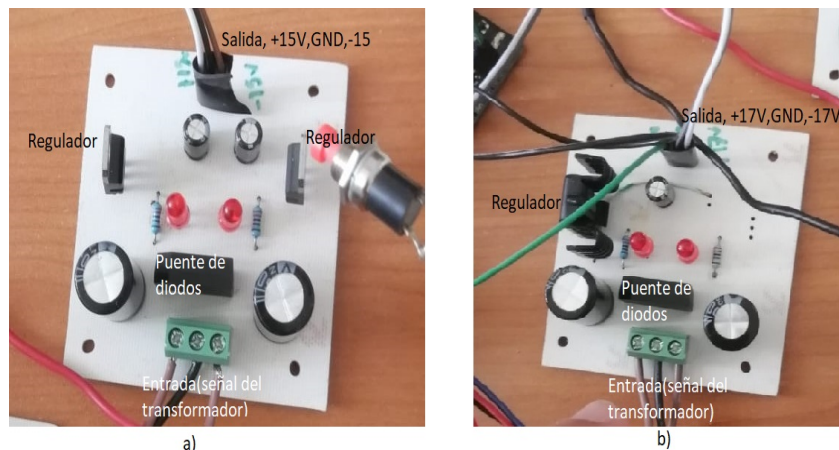


Figura 1.9. a) Fuente $\pm 15VCD$, b) Fuente 17V

1.1.6. Sistema de adquisición de corrientes del estator del PMSG..

Para efectuar el diagnóstico de fallas eléctricas del estator del PMSG, es necesario efectuar la adquisición de señales de corrientes del estator, para efectuar ésta tarea, se utilizó un diseño de sensores de efecto hall basados en el sensor CSNA11 de lazo cerrado y un sistema embebido basado en un procesador de señales digitales de punto fijo de 16 bits, de la compañía Microchip el dsPIC30F4011, de un trabajo de investigación previo. El PMSG tiene una carga resistiva constante, la cual se lleva a cabo mediante un juego de lámparas de tipo automotriz, en la figura 1.10, se muestra un banco de tres lámparas conectadas en estrella que son la carga del sistema trifásico del generador.

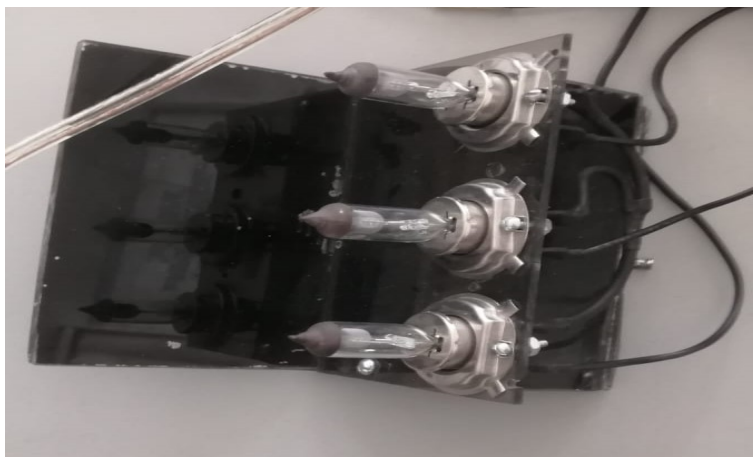


Figura 1.10. Carga del generador

En la figura 1.11 se ilustra un diagrama de bloques sobre el funcionamiento general del sistema electrónico utilizado para la obtención de las señales de corriente del PMSG y su

procesamiento para poder ser almacenadas en una computadora personal.

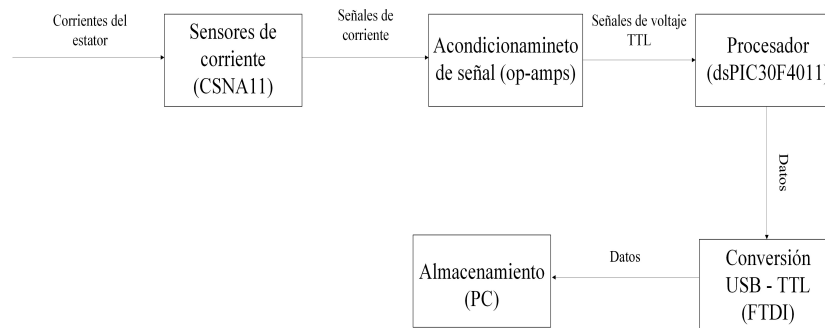


Figura 1.11. Sistema electrónico para la adquisición de señales de corriente del estator del PMSG.

En el proceso de esta tesis se utilizó el sistema electrónico diseñado en [53] al cual solo se le realizó una modificación, siendo esta el cambio del módulo USB que tenía el sistema, esto debido a que el módulo con el que contaba comenzó a presentar problemas con los drivers en computadores con Windows 10 y 11, por lo que se optó por reemplazarlo por un chip FTDI.

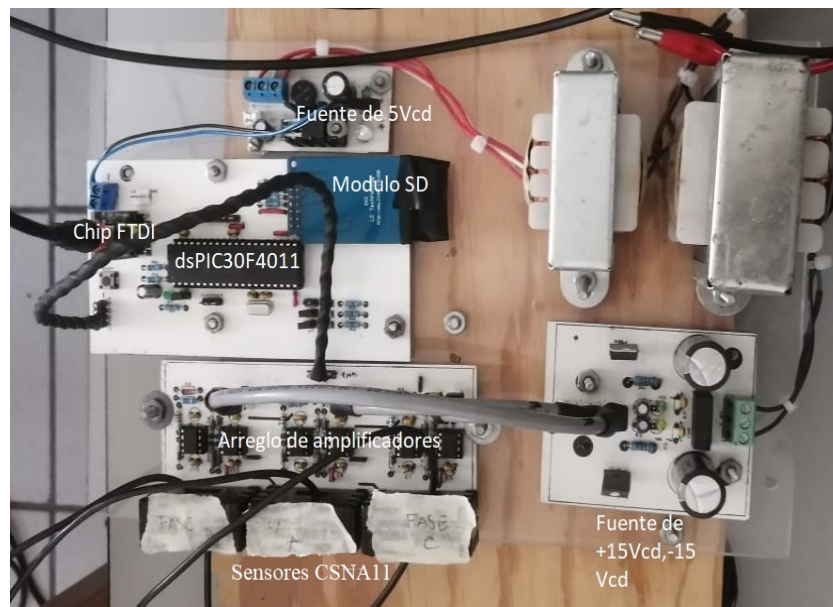


Figura 1.12. Sistema electrónico para la adquisición de señales de corriente del estator del PMSG.

1.1.7. Proceso de identificación del motor de CD

Para poder efectuar el control de la máquina de CD, es necesario contar con un modelo matemático de la misma (función de transferencia) el cual permita sintonizar alguna estrategia de control, para obtener dicho modelo se efectuó un procedimiento experimental, en el cual, se adquiere una curva de reacción de velocidad de la máquina aprovechando la unidad central de procesamiento, en la cual se deja embebido un algoritmo que aplica una señal escalón de voltaje y se toman muestras discretas de la velocidad del motor, adquiriendo una cantidad variable de muestras en función de configuraciones enviadas vía comunicaciones con el equipo de cómputo, además, es posible modificar la frecuencia de muestreo del experimento para ajustar la calidad de la curva de reacción obtenida.



Figura 1.13. Motor CIMGAR de imanes permanentes

En la figura 1.13 se ilustra el motor de imanes permanentes de corriente directa, el cual opera a un voltaje de 90V, alcanza una velocidad máxima de 1750 rpm, y tiene un consumo de 10A, se muestra el detalle de los datos de placa de la máquina la cual se encuentra montada en el prototipo banco de pruebas experimentales.

1.1.7.1. Función de transferencia del dominio del tiempo continuo.

Para obtener el modelo matemático del dominio del tiempo continuo (función de transferencia) de la máquina de corriente directa, se procede aplicando una señal escalón de voltaje, se adquieren 1000 muestras discretas de la velocidad del motor a una frecuencia de muestreo de 1KHz , es decir, se adquiere un segundo de tiempo real de la evolución de la velocidad de la máquina. Existen muchas técnicas de identificación de sistemas dinámicos, con fines de simplicidad, se idealiza el sistema como una planta de primer orden, en la cuál, se

identifica la constante de tiempo del sistema (τ) y la ganancia del sistema K , la propuesta de sistema se ilustra en la ecuación (1).

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

En la figura 1.14 se muestra un diagrama de bloques en la cual se muestra el proceso efectuado para la adquisición de la curva de reacción de velocidad. En la figura 1.15 se muestra una curva experimental de velocidad.

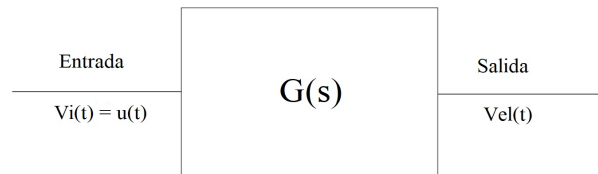


Figura 1.14. Representación para el sistema de control

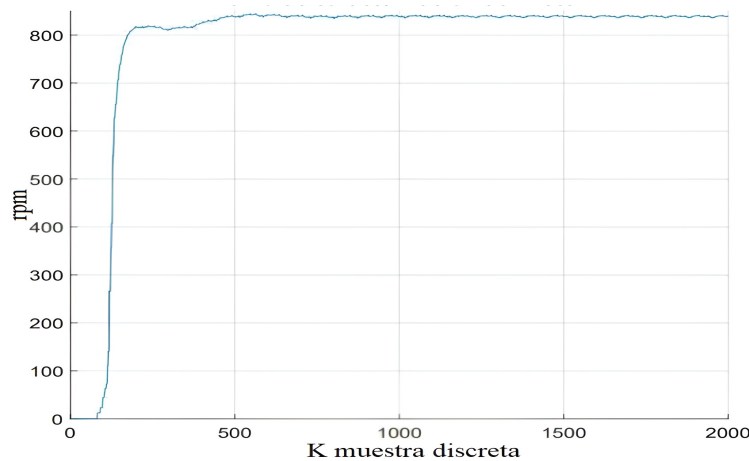


Figura 1.15. Curva de reacción de velocidad del motor de CD

En la figura 1.16 se muestra un diagrama de bloques de lazo abierto del sistema propuesto de primer orden.

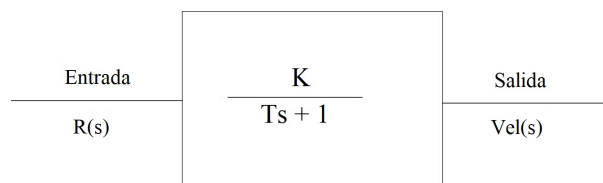


Figura 1.16. Representación para el sistema de control

Como se puede observar en la figura 1.16 la funcion de transferencia del motor puede quedar definida como:

$$G(s) = \frac{K}{\tau_s + 1} \quad (2)$$

Para obtener la ganancia de sistema se parte del valor máximo de velocidad alcanzado es decir:

$$Vel_{Max} = K * V_s * u(t) \quad (3)$$

Para $t \geq 0$ la ecuación (3) puede describirse como:

$$Vel_{Max} = K * V_s(t) \quad (4)$$

En donde V_s es la magnitud del escalón de voltaje aplicado como entrada.

Entonces

$$K = \frac{Vel_{Max}}{V_s} \quad (5)$$

Para efectuar la identificación del sistema se procedió a desacoplar el motor de CD del PMSG, ya que éste no puede operar a una velocidad superior de 500 rpm ya que el rotor está construido por una serie de imanes empotrados los cuales se desprenden a altas velocidades. Se aplica una escalón de voltaje de entrada magnitud $V_s = 90V$ de CD, ésta magnitud en el voltaje de entrada se logra una constante de tiempo $\tau = 0.128$ segundos y se alcanza una velocidad de 831rpm . En (6) se muestra el sistema de primer orden identificado.

$$G(s) = \frac{18.47}{0.128s + 1} \quad (6)$$

1.1.7.2. Función de transferencia del dominio del tiempo discreto

El control del motor de CD para efectuar seguimiento de velocidad se desea implementar en una plataforma digital, por tal razón, es necesario mapear la función de transferencia del dominio del tiempo continuo al discreto. Para ello se efectúa el mapeo considerando el efecto del retenedor de orden cero del convertidor A/D del procesador. Dicho mapeo se ilustra en (7).

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \quad (7)$$

La función de transferencia del dominio del tiempo discreto, considerando una frecuencia de muestreo de 1Khz se ilustra en (8).

$$G(z) = \frac{0.1437}{z - 0.9922} \quad (8)$$

1.1.7.3. Sintonización de controlador tipo PID para efectuar seguimiento de velocidad

Para efectuar el seguimiento de velocidad del motor de CD para emular los patrones de viento, se sintonizó e implementó en el procesador de señales digitales el algoritmo de control proporcional + integral + derivativo, conocido como controlador PID. En la figura 1.17 se ilustra el diagrama de bloques del esquema de lazo cerrado propuesto.

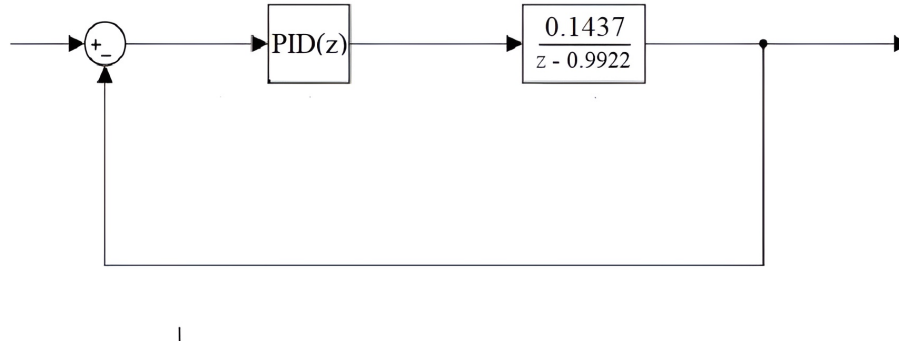


Figura 1.17. Representación para el sistema de control

En donde la retroalimentación del sistema será representada mediante $H(z)$, la función discreta del controlador con $G_c(z)$ y la función de transferencia discreta con $G_p(z)$, el siguiente paso será obtener $G(z)$ la cual se muestra en la ecuación (9)

$$G(z) = G_c(z)G_p(z) \quad (9)$$

Para efectuar la sintonización del controlador PID discreto utilizando la técnica de ubicación arbitraria de los polos, es necesario obtener la función de transferencia de lazo cerrado como se ilustra en (10).

$$T(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z)H(z)} \quad (10)$$

El producto de la función de transferencia $G_p(z)$ y la función discreta del controlador $G_c(z)$ se muestra en (11)

$$G(z) = \frac{z^2(2\tau_s K_p + K_i \tau_s^2 + 2K_d) + z(K_i \tau_s^2 - 2K_p \tau_s - 4K) + 2K_d}{2\tau_s z^2 - 2\tau_s z} \quad (11)$$

Con fines de simplicidad para presentar la función de transferencia se introduce:

$$\begin{aligned} A &= K(K_p + \frac{\tau_s}{2} K_i + f_s K_d) z^2. \\ B &= K(-K_p + \frac{\tau_s}{2} K_i - 2f_s K_d) z. \\ C &= f_s K \end{aligned} \quad (12)$$

en donde:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= z^3 \\
 \beta &= (-1 - p + KK_p + \frac{\tau_s}{2}KK_i + Kf_sK_d)z^2 \\
 \gamma &= (\frac{K}{f_s} - KK_p + \frac{\tau_s}{2}KK_i - 1 - p - 2f_sKK_d)z \\
 \sigma &= KFf_sK_d
 \end{aligned} \tag{13}$$

La función de transferencia de lazo cerrado, se muestra en (14)

$$T(z) = \frac{A + B + C}{\alpha + \beta + \gamma + \sigma} \tag{14}$$

Con base en el polinomio característico de lazo cerrado discreto mostrado en (15) es posible efectuar la propuesta arbitraria de polos de lazo cerrado, con base en el polinomio de la propuesta mostrado en (16) es posible generar un sistema de ecuaciones y sintonizar el controlador como se muestra de forma matricial en (17).

$$z^3 - 0.0718z^2 - 0.9095z = 0 \tag{15}$$

$$z^3 - 0.1787z^2 - 0.8198z = 0 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} K & 0.5\tau_s K & KF_s \\ -K & 0.5\tau_s K & -2F_s K \\ 0 & 0 & KF_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_p \\ K_i \\ K_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} b + p + 1 \\ c - p \\ d \end{bmatrix} \\
 A & \quad K \quad R
 \end{aligned} \tag{17}$$

El proceso de sintonización, consiste en efectuar una propuesta arbitraria de polos de lazo cerrado como se muestra en 1.18.

Para el presente trabajo de investigación se proponen los polos de lazo cerrado en (18). Con base en la propuesta de polos de lazo cerrado se obtiene el polinomio característico de lazo cerrado el cual se muestra en (19), desarrollando la expresión se tiene (20).

$$x = 0, \quad y = 0.9992 \quad y \quad z = 0.8205 \tag{18}$$

$$(z + 0)(z - 0.9992)(z - 0.8205) \tag{19}$$

$$z^3 - 1.8197z^2 + 0.8198z = 0 \tag{20}$$

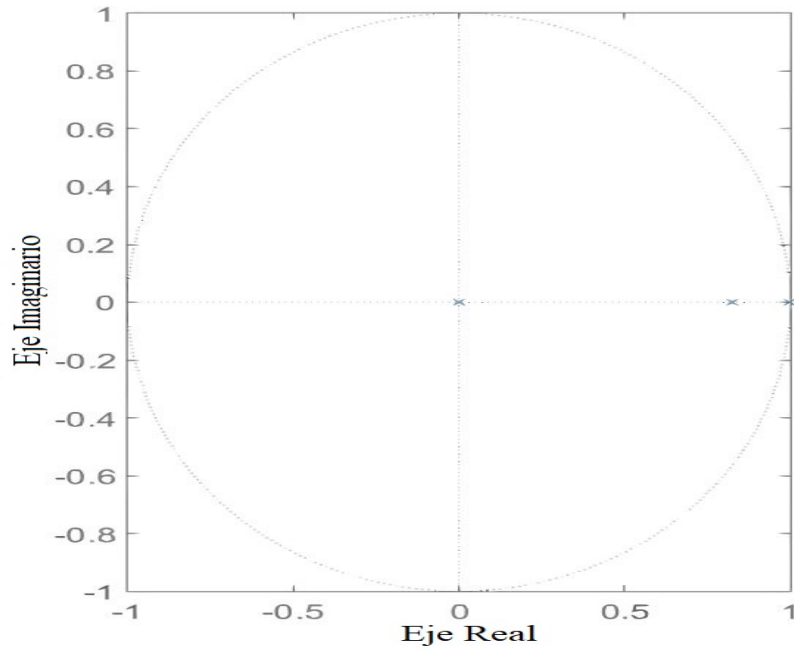


Figura 1.18. Diagramas de Polos y Ceros

Los coeficientes del polinomio de tercer grado característico de lazo cerrado propuestos a, b, c y d se muestran en (21), (22), (23) y (24).

$$a = 1 \quad (21)$$

$$b = -1.8197 \quad (22)$$

$$c = -0.8198 \quad (23)$$

$$d = 0 \quad (24)$$

La propuesta arbitraria de los polos consiste en lograr una dinámica de velocidad adecuada para efectuar el seguimiento de la velocidad del motor y así ser capaz de reproducir los patrones de viento que le son almacenados en el sistema embebido. Se elige un primer polo $P1 = 0$ el cual actúa como integrador para permitir que el error de estado estable tienda a ser cero, el segundo polo $P2 = 0.9992$ es un polo que proporciona una característica de respuesta dominante de primer orden exponencial sin sobre tiro ni tampoco oscilaciones, el tercer polo $P3 = 0.8025$ es un segundo polo que proporciona característica de mayor velocidad pero también respuesta de primer orden.

Finalmente se resuelve el sistema mostrado en (17) y se obtiene el valor de las ganancias del controlador K_p , K_i y K_d como se muestra en (25).

$$K = A^{-1}R \quad (25)$$

Realizando la ecuación (25) se obtienen los valores para el control proporcional y el control integral, dando como resultado $K_p = 1.2$ y $K_i = 1$.

1.2. Rediseño de programa de computadora para el control del sistema de patrones de viento.

Para efectuar el control del sistema generador de patrones de viento, se efectúa el rediseño de un programa de computadora de una investigación previa, el cual fue diseñado en el lenguaje de programación visual Delphi XE7 Embarcadero, el cual permite efectuar la identificación del sistema, descarga de patrones de viento y ejecución de los mismos con el recurso del tiempo real en el equipo de cómputo. En la figura 1.19, se ilustra una pantalla del programa de computadora.

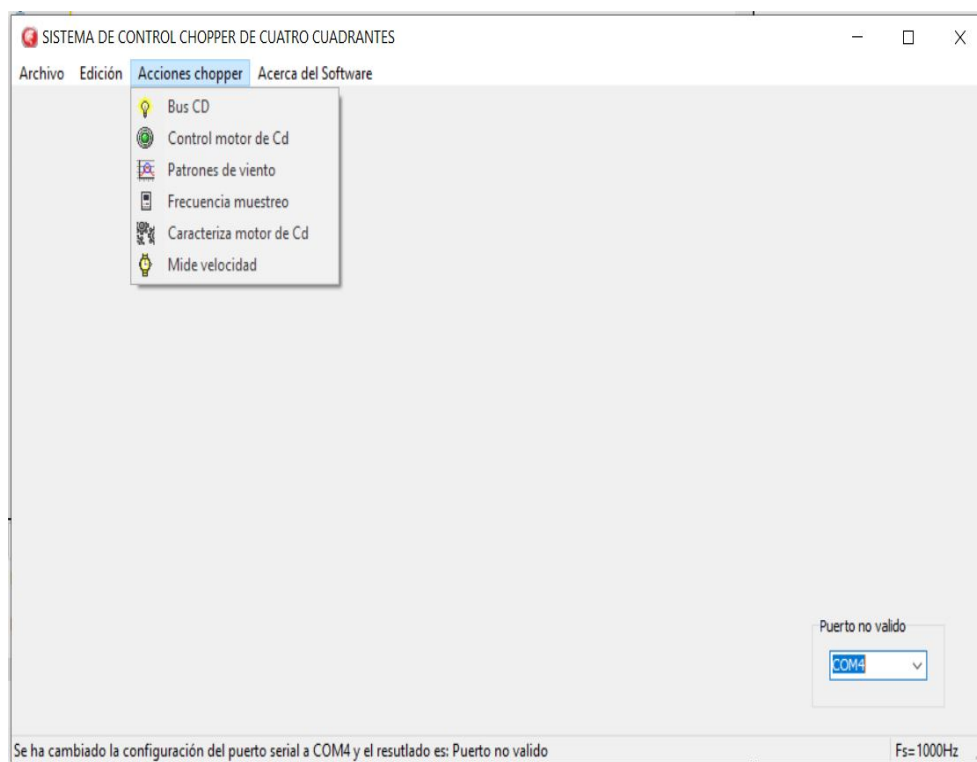


Figura 1.19. Interfaz principal del programa

El sistema permite efectuar la carga y descarga de bus que alimenta el choper de un cuadrante el cual se ilustra en la figura 1.20.

Además el sistema permite colocar el motor en un modo de operación a velocidad constante el cual se ilustra en la figura 1.21.

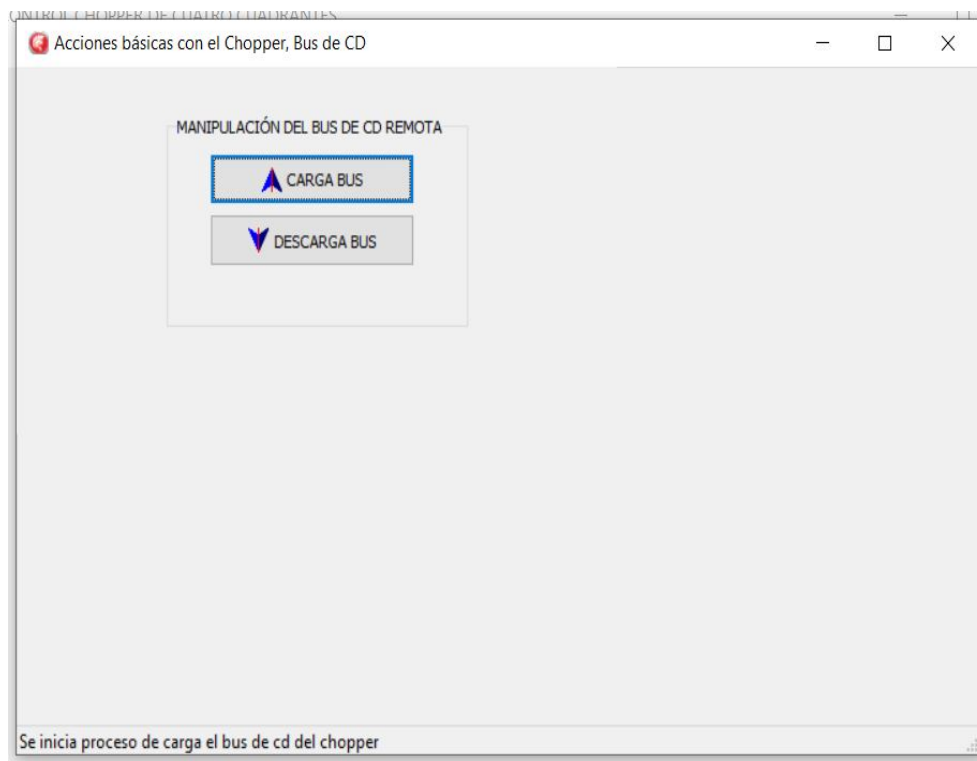


Figura 1.20. Interfaz de carga y descarga de bus

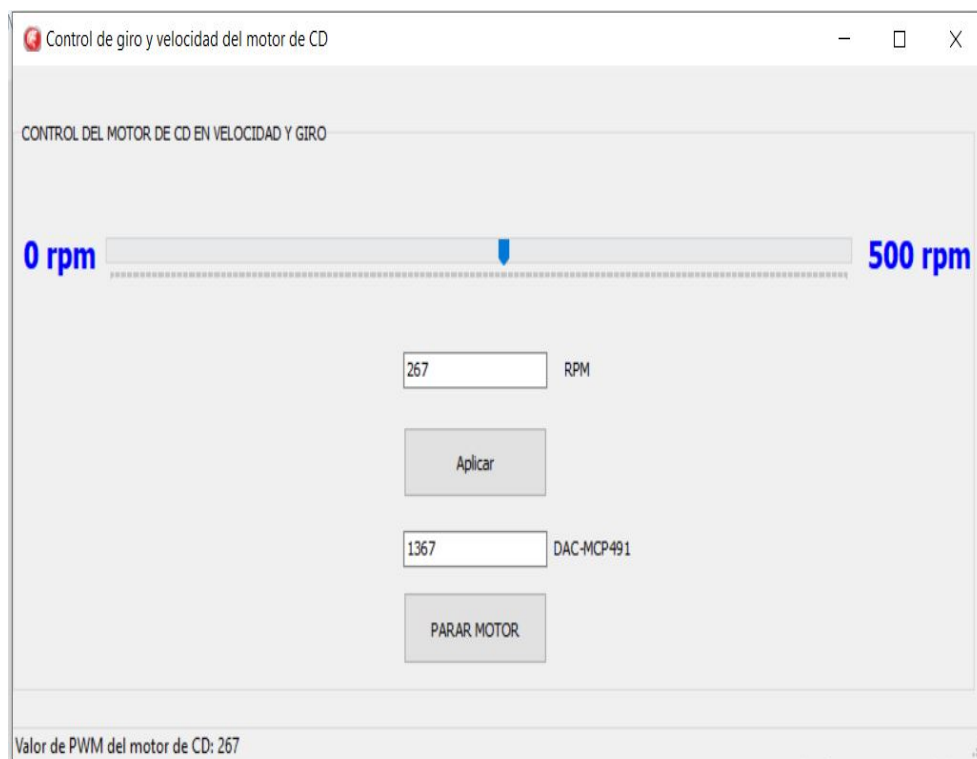


Figura 1.21. Interfaz control de velocidad

También se detalla el proceso de carga, descarga y ejecución de patrones de viento arbitrarios se muestra en la figura 1.22

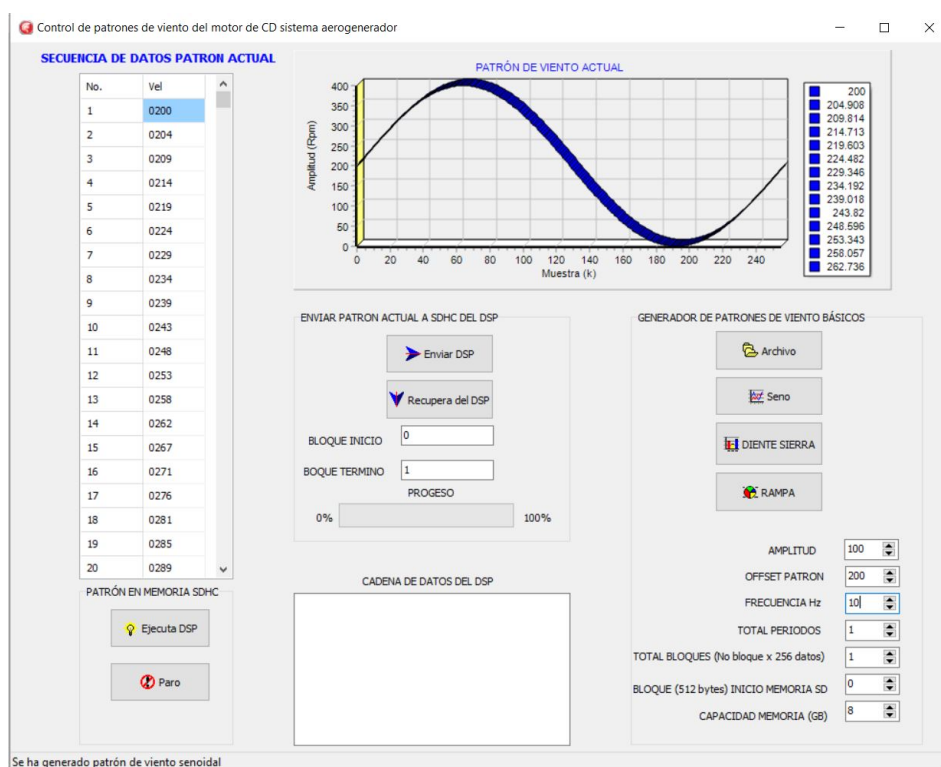


Figura 1.22. Interfaz de carga y descarga patrones de viento.

El programa de computadora efectúa un dialogo con el sistema embebido mediante comunicación serial de alta velocidad emulada en el equipo de cómputo mediante el transceiver USB-Serial FTDI-232.

1.2.1. Programa de computadora para adquisición de señales de corriente del PMSG.

Para efectuar la adquisición de las corrientes del estator del PMSG, se aprovecha un programa de computadora, diseñado en un trabajo de investigación previo. El programa fue desarrollado en el lenguaje de programación visual de alto nivel Delphi Embarcadero XE7, el cual permite efectuar el dialogo con el sistema embebido iniciar la captura de información, efectuar la descarga y almacenamiento de la misma. Todo este proceso se lleva acabo utilizando comunicación serial emulada de alta velocidad. El sistema embebido, es un sistema de alta capacidad de almacenamiento de gran capacidad, ésto, gracias al uso de una memoria de tipo SD de alta capacidad. El acceso, limpieza y mantenimiento de dicha memoria puede

ser efectuada a través del programa de computadora. En la figura 1.23 se ilustra la pantalla que muestra dichas capacidades lectura, almacenamiento y recuperación de datos.

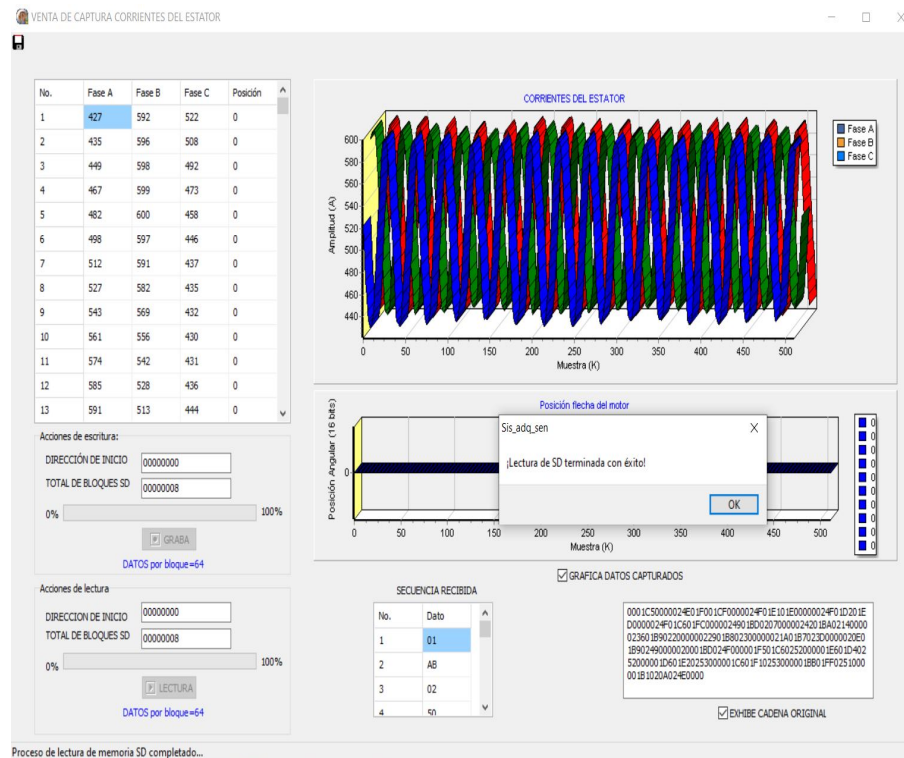


Figura 1.23. Programa del sistema de adquisición de datos

1.3. Alteración de generador PMSG para inducir fallas eléctricas del estator.

Para el estudio de diferentes escenarios de diagnóstico de falla eléctrica del estator, se utilizó un generador de imanes permanentes (PMSG por sus siglas en inglés), de 400W y 12V, el cuál se ilustra en la figura 1.24.

En [53] se realizaron las modificaciones al PMSG, fueron directamente en el estator, es decir, el estator tuvo que ser re-devanado, todo esto para poder generar las derivaciones pertinentes para las diferentes fallas que se pretenden inducir al PMSG para su análisis. Estas fallas son en la fase A con porcentajes del .5 %, 2.0 % y 4.5 %, es decir, 1 cc, 4 cc y 7 cc (espiras en cortocircuito), así como las derivaciones de fallas en la fase B con porcentajes del .5 %, 1.0 % y 2.0 %, es decir, 1 cc, 2 cc y 4cc (espiras en cortocircuito). En la figura 1.25, se muestra el diagrama esquemático que muestra las alteraciones efectuadas al PMSG para inducir diferentes escenarios de falla.



Figura 1.24. PMSG de 400W y 12V

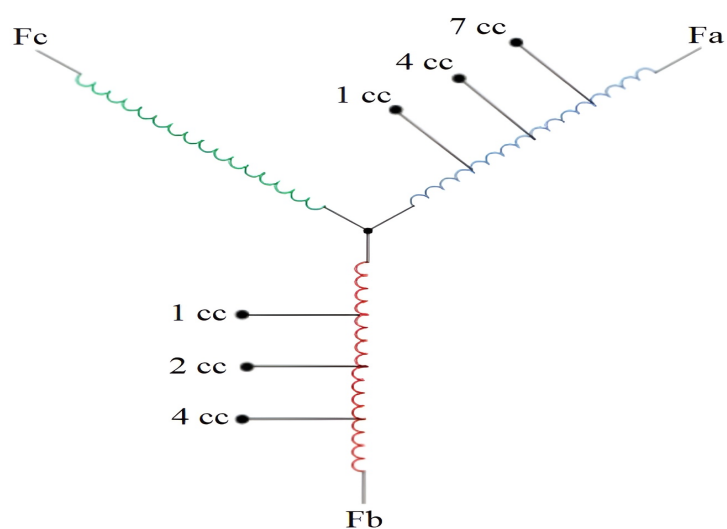


Figura 1.25. Esquema de las derivaciones de falla

Capítulo 2

Resultados y conclusiones.

En la presente sección se presentan los resultados experimentales del diagnóstico de fallas eléctricas incipientes del estator del generador PMSG. Se presentan resultados utilizando la técnica MCSA (motor current signature analysis por sus siglas en inglés) análisis de las firmas de corrientes del estator, para lo cual se efectúa el análisis con técnicas de procesamiento de señales como lo son el análisis espectral del módulo del ISP y el análisis con herramientas tiempo frecuencia como lo son las ondeletas de Haar, Daubechies y Coiflet. Se efectúa un diagnóstico de fallas en estado estacionario de velocidad y a velocidad variable.

2.1. Diagnóstico de fallas eléctricas incipientes del estator del PMSG.

La presente investigación se centra en el diagnóstico de fallas eléctricas del estator de tipo incipiente, el interés en éste tipo de falla radica en el hecho de que es el comienzo de una falla de tipo catastrófica en los devanados de las máquinas eléctricas. Se aprovecha una máquina alterada en sus devanados que permite inducir de forma artificial diferentes escenarios de falla. En la tabla 2.1 se muestra una tabla comparativa con los diferentes escenarios de falla que pueden ser inducidos en el PMSG como se mostró en la figura 11 y el porcentaje en corto circuito de cada devanado.

No de prueba	Fase A	Fase B	Fase C
1	Falla del 2 %	Sin falla	Sin falla
2	Falla del 4.5 %	Sin falla	Sin falla
3	Falla del 4.5 %	Falla del 2 %	Sin falla

Tabla 2.1. Escenarios de fallas para una velocidad de 200RPM

2.1.1. Diagnóstico de falla del estator a velocidad constante caso sano.

El primer escenario estudiado para efectuar el diagnóstico de fallas eléctricas de estator, fue el escenario de caso sano a velocidad constante del PMSG. En la realidad un aerogenerador de éste tipo no opera a velocidad constante debido al cambio en las condiciones del viento que son impredecibles, de cualquier manera, se toma la decisión de evaluar las condiciones de salud del PMSG operando a una velocidad constante, ésto se logra gracias a el sistema implementado y anteriormente descrito sistema generado de patrones de viento el cual puede operar a velocidad constante. En la figura 2.1 se muestran las señales de corriente trifásicas del PMSG para el caso sano a una velocidad constante de 200 rpm.

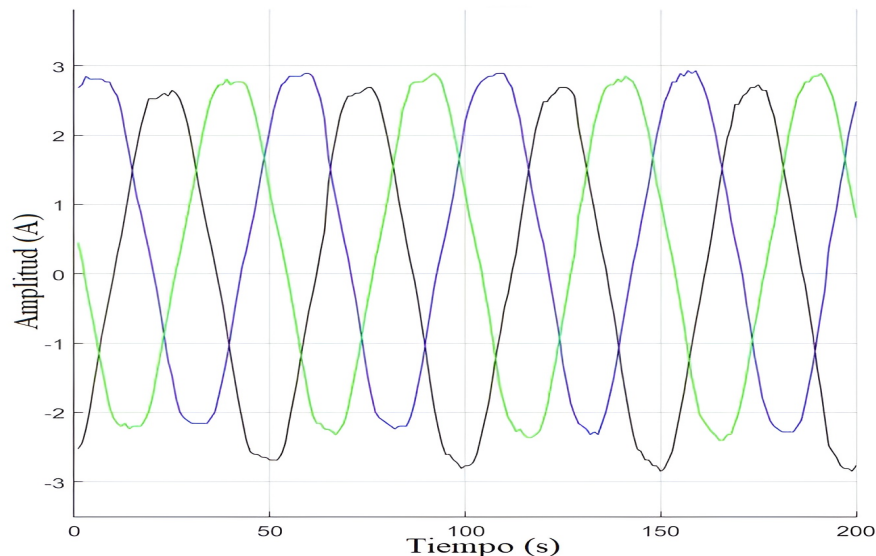


Figura 2.1. Corrientes del estator del PMSG caso sano a 200 rpm.

El primer paso efectuado una vez que han sido adquiridas las corrientes del estator del PMSG para el caso sano a velocidad constante, es efectuar el mapeo de las corrientes al

marco de referencia de concordia y después de obtiene del módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.2 se muestra el resultado de dicho mapeo.

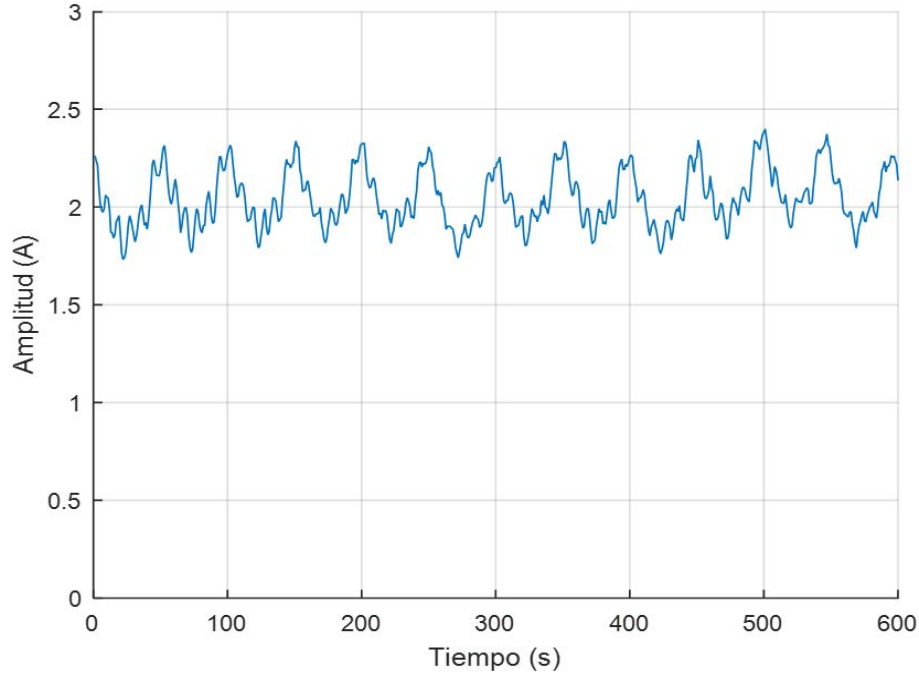


Figura 2.2. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso sano a 200 rpm.

Una de las herramientas ampliamente utilizadas en el diagnóstico de fallas que cuentan con un carácter no invasivo, es el análisis del contenido espectral de las corrientes del estator, el módulo del fasor de Park o vector de Park es una herramienta que es altamente sensible a los desbalances de las corrientes causadas por las fallas eléctricas del estator, en [46] se muestra que la falla eléctrica del estator aparece en múltiplos del doble de la frecuencia fundamental de la red:

$$F_{falla} = 2nf \quad (1)$$

en donde $n = 1, 2, 3, \dots$

Para fines prácticos se asume $n=1$ como se muestra en (1).

El análisis experimental para el caso sano del PMSG fue analizado a una velocidad constante de 200 rpm, el PMSG cuenta con 12 pares de polos, por lo tanto la frecuencia de la corriente fundamental en el módulo de ISP aparece a una frecuencia de 20 Hz, el armónico de firma de falla debe aparecer al doble de dicha frecuencia, en la figura 2.3 se muestra el detalle del espectro de frecuencia del ISP. Para este caso la firma de falla del estator aparece

en 40 Hz y muestra una magnitud pequeña de 0.004 A debido a que la máquina se encuentra en condición sana.

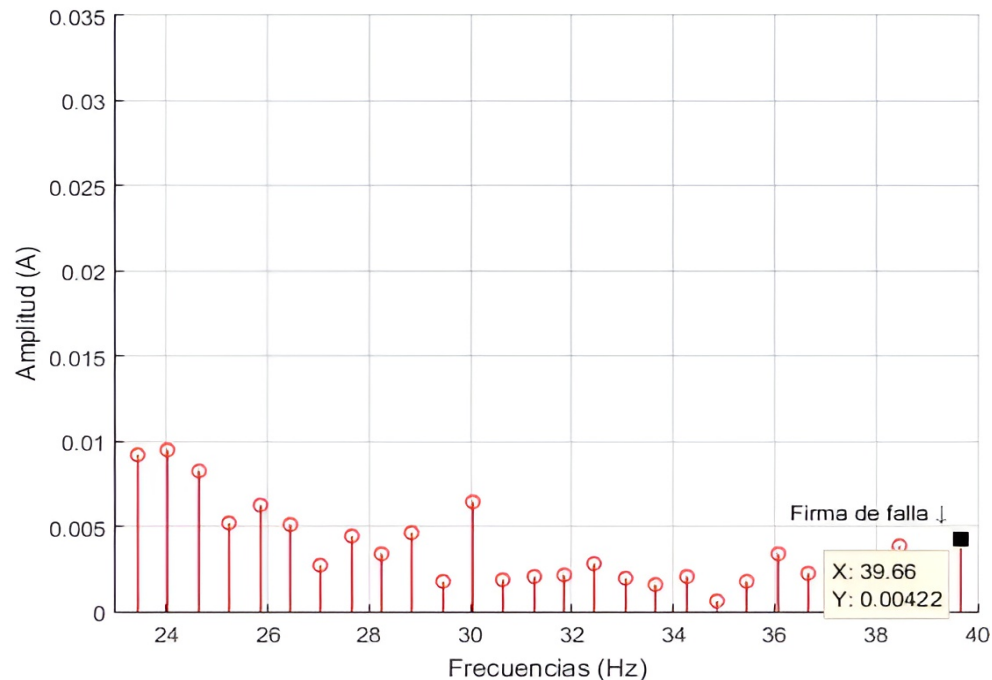


Figura 2.3. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso sano a 200 rpm.

El siguiente paso consta de aplicar un análisis MRA al modulo del ISP ya que a través de la transformada de ondeletas es posible reconocer los cambios en el espectro gracias a los cambios que se ocasionan en el valor rms de la ondeleta. En la tabla 2.2 se muestran los valores rms obtenidos para el caso sano para obtener valores de referencia necesarios para las comparaciones en los casos con falla.

Rango de frecuencia	Ondeleta	Valor rms caso sano
31.25-62.5Hz	Haar	0.2525
31.25-62.5Hz	Daub2	0.2167
31.25-62.5Hz	Daub4	0.1705
31.25-62.5Hz	coif4	0.1691

Tabla 2.2. Valores rms caso sano a 200 rpm

2.1.2. Diagnóstico de falla del estator a velocidad constante caso con falla de 2 %.

El segundo escenario estudiado en la investigación es el diagnóstico de falla eléctrica incipiente del estator en la cual se induce un corto circuito entre espiras equivalente al 2%, es decir 4 espiras en cortocircuito del devanado de la fase a del estator.

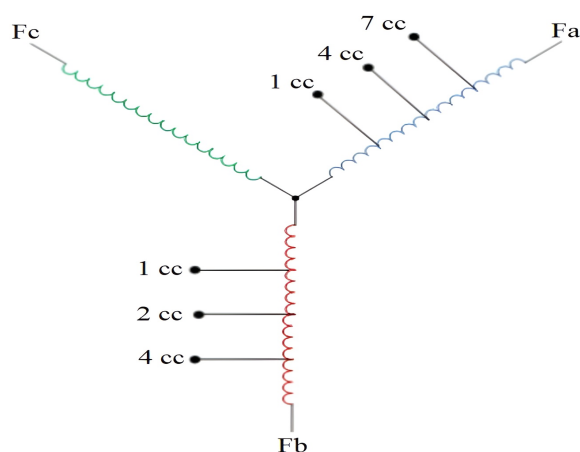


Figura 2.4. Esquema de las derivaciones de falla

En la figura 2.5, se muestran las corrientes del estator para el caso de falla incipiente del estator de corto circuito entre espiras correspondientes al 2 % del devanado de la fase a.

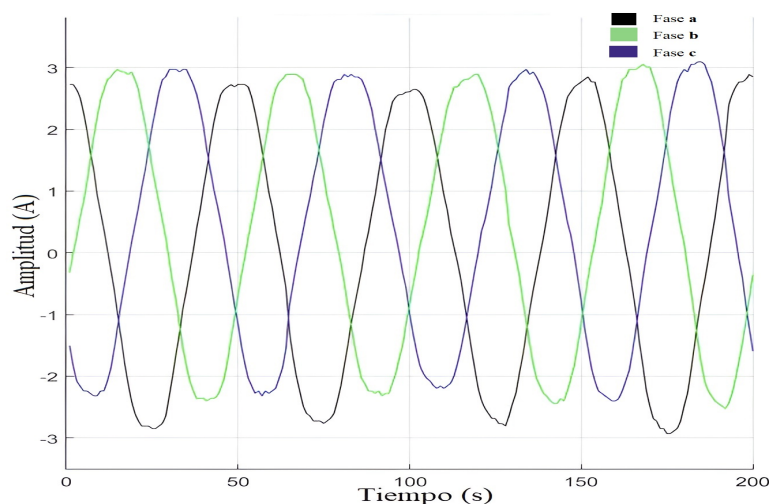


Figura 2.5. Corrientes del estator del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.

El primer paso efectuado una vez que han sido adquiridas las corrientes trifásicas del estator del PMSG para el caso con falla en la fase a del 2 % a velocidad constante, es efectuar

el mapeo de las corrientes al marco de referencia de concordia para posteriormente realizar la obtención de el módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.6 se muestra el resultado de dicho mapeo.

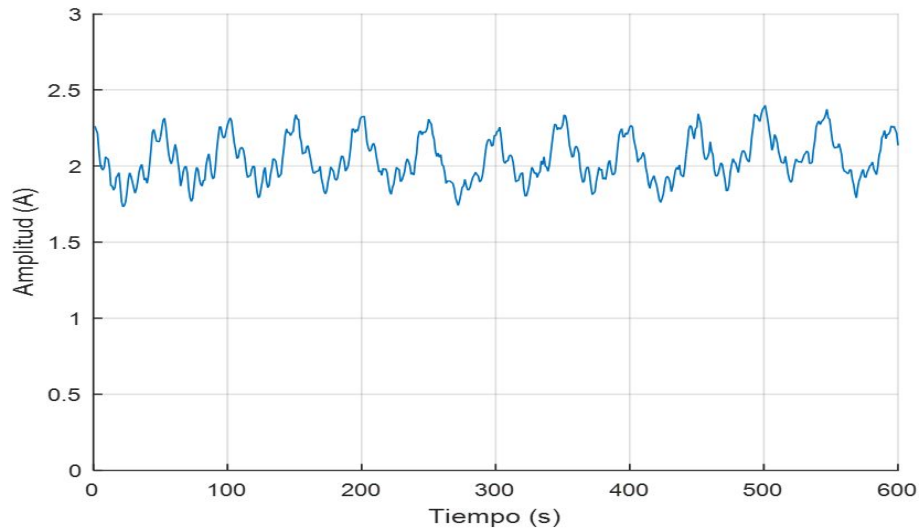


Figura 2.6. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.

En la figura 2.6 se muestra el modulo del ISP de las corrientes trifasicas mostradas en la figura 2.5 para el caso de falla del 2 %, se observa tambien que al comparar esta figura con la del modulo del ISP mostrada en el caso sano, se observan algunas leves diferencias en dicha señal, las cuales seran comprobadas con ayuda de la FFT.

En la figura 2.7 se ilustra el resultado experimental del análisis espectral para el caso con falla en la fase a del 2 %, para la velocidad de 200 rpm., segun la ecuación (1) mostrada anteriormente la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental, es decir 40 Hz, podemos comprobar el aumento de la firma de falla debido a que la magnitud del armónico de firma de falla para este caso de estudio es de 12 mA.

En la tabla 2.3 se muestran los valores rms obtenidos mediante el análisis MRA con las diferentes ondeletas madre para el caso con falla en la fase a del 2 %, para la velocidad de 200 rpm., asi como los valores del caso sano y su diferencia algebraica.

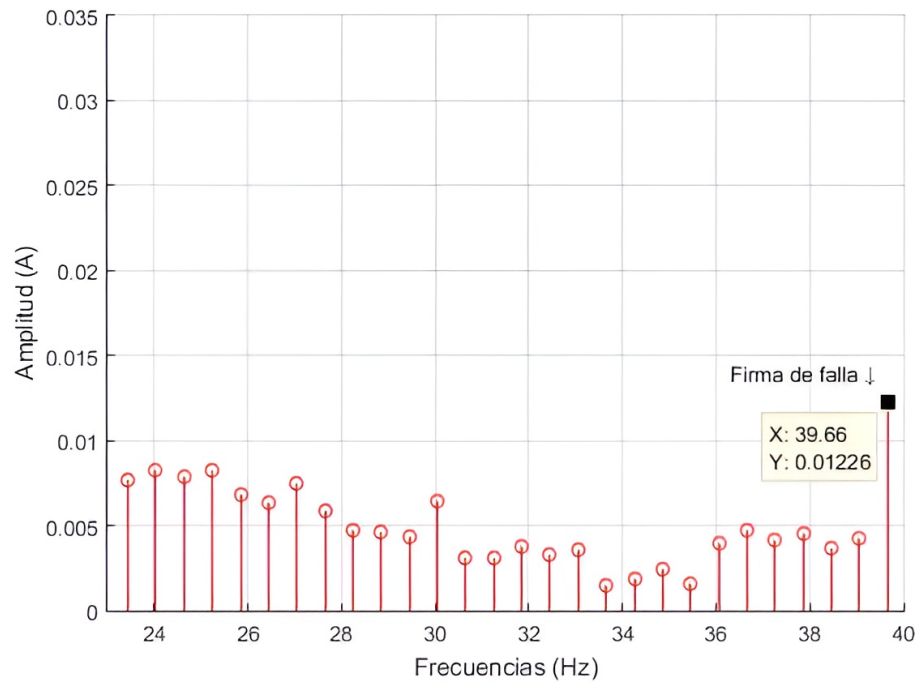


Figura 2.7. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.

Rango de frecuencia	Ondeleta	Valor rms caso sano	Valor rms falla 2 %	diferencia rms
31.25-62.5Hz	Haar	0.2525	0.2531	0.0006
31.25-62.5Hz	Daub2	0.2167	0.2126	-0.0041
31.25-62.5Hz	Daub4	0.1705	0.1581	-0.0124
31.25-62.5Hz	coif4	0.1691	0.1578	-0.0113

Tabla 2.3. Análisis MRA de ISP del PMSG caso falla 2 % a 200 rpm.

2.1.3. Diagnóstico de falla del estator a velocidad constante caso con falla de 4.5 %.

El tercer escenario estudiado en la investigación es el diagnóstico de falla eléctrica incipiente del estator en la cual se induce un corto circuito entre espiras equivalente al 4.5 %, es decir 7 espiras en corto circuito del devanado de la fase a del estator.

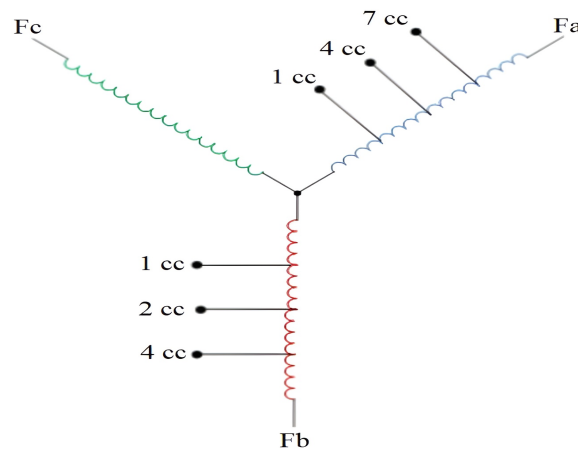


Figura 2.8. Esquema de las derivaciones de falla

En la figura 2.9 , se muestran las corrientes del estator para el caso de falla incipiente del estator de corto circuito entre espiras correspondientes al 4.5 % del devanado de la fase a.

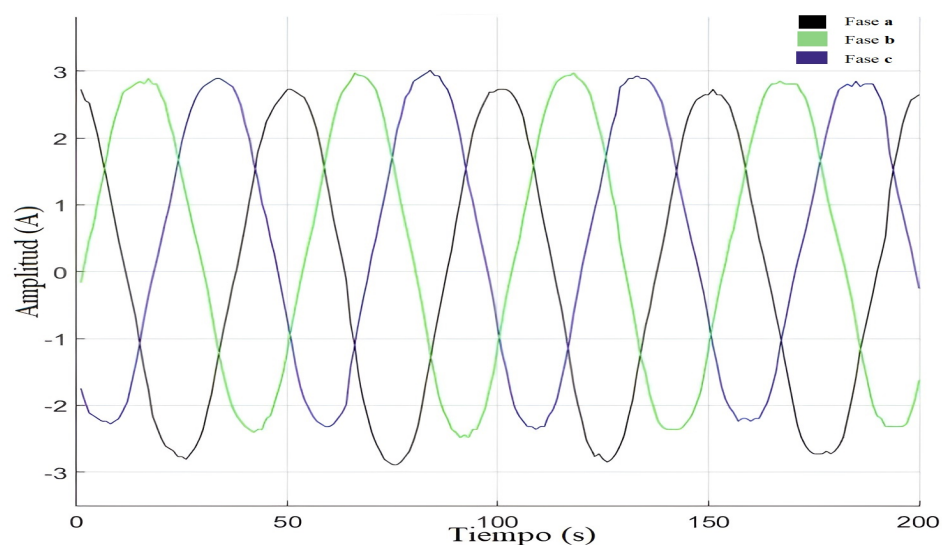


Figura 2.9. Señales trifásicas de Corriente en caso falla del 4.5 %

Una vez que han sido adquiridas las corrientes trifásicas del estator del PMSG para el caso con falla en la fase a del 4.5 % a velocidad constante, se observa que al ir aumentando el porcentaje de falla el desbalance entre las corrientes aumenta, siendo la fase a la que muestra este desbalance, debido a que es la fase donde se inducen las fallas, el siguiente paso a realizar es efectuar el mapeo de dichas corrientes al marco de referencia de concordia para posteriormente realizar la obtención de el módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.10 se muestra el resultado de dicho mapeo.

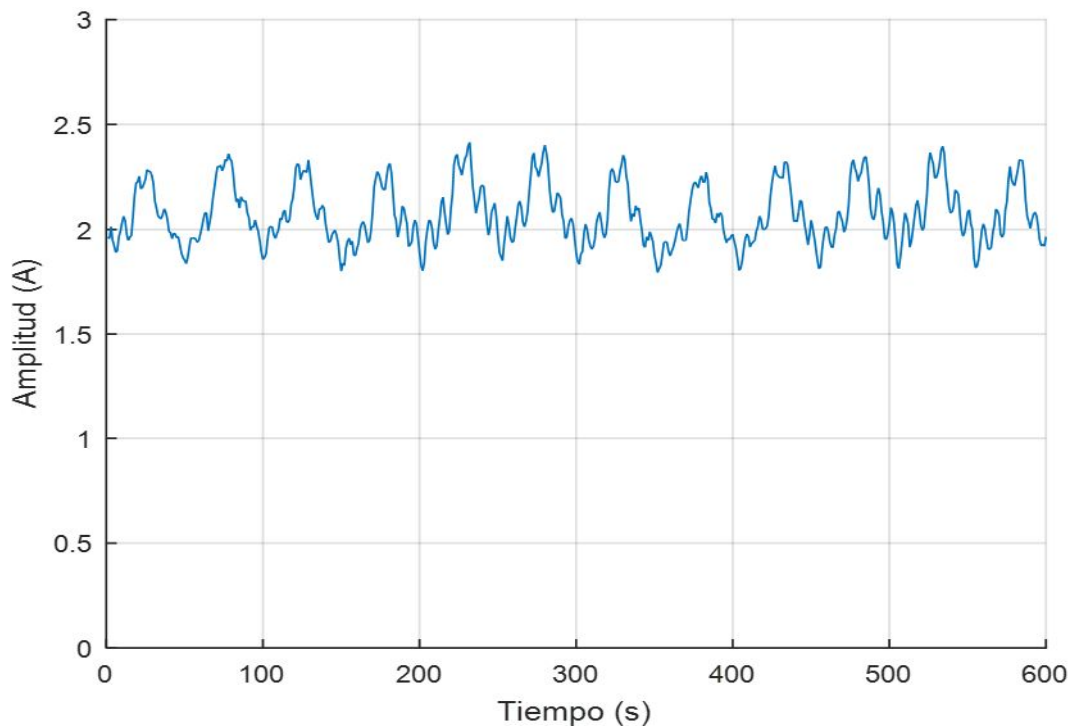


Figura 2.10. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso falla 4.5 % a 200 rpm.

En la figura 2.11 se ilustra el resultado del análisis espectral para el caso con falla en la fase a del 4.5 %, para la velocidad de 200 rpm., la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental, es decir 40 Hz, podemos comprobar el aumento de la firma de falla debido a que la magnitud del armónico de firma de falla para este caso de estudio es de 33 mA.

En la tabla 2.4 se muestran los valores RMS obtenidos mediante el análisis MRA para el caso con falla en la fase a del 4.5 %.

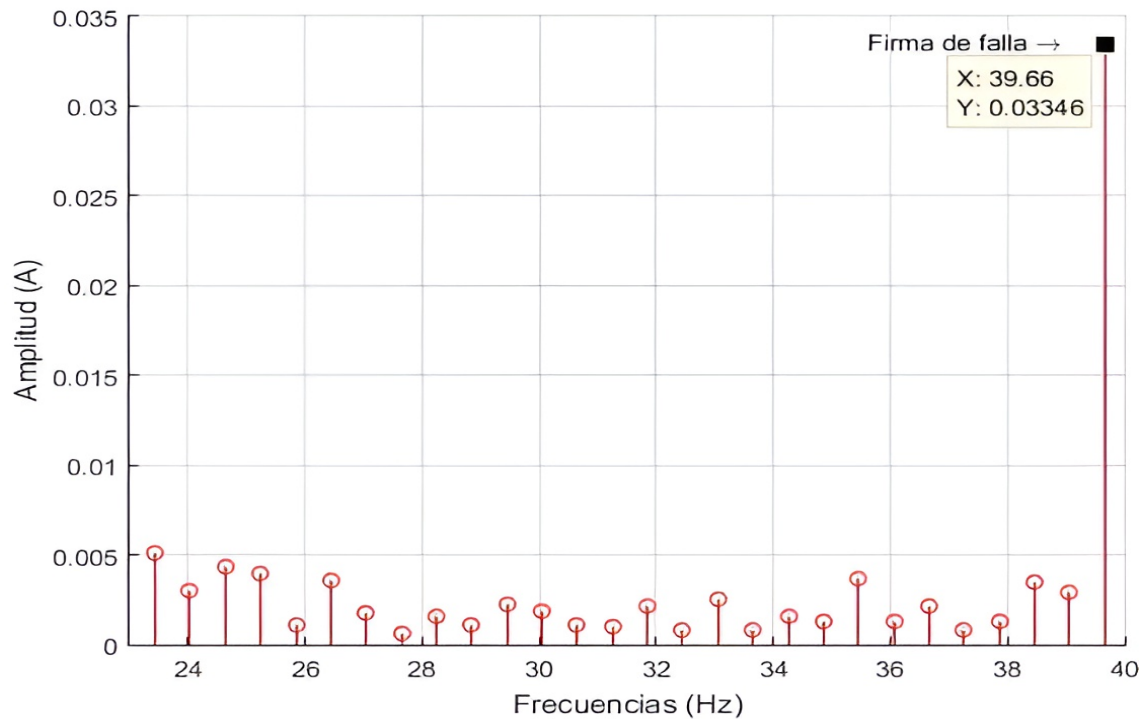


Figura 2.11. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 4.5 % a 200 rpm.

Rango de frecuencia	Ondeleta	Valor rms caso sano	Valor rms falla	diferencia rms
31.25-62.5Hz	Haar	0.2525	0.2554	0.0029
31.25-62.5Hz	Daub2	0.2167	0.2104	-0.0063
31.25-62.5Hz	Daub4	0.1705	0.1713	0.0008
31.25-62.5Hz	coif4	0.1691	0.1664	-0.0027

Tabla 2.4. Análisis MRA de ISP del PMSG caso falla 4.5 % a 200 rpm.

2.1.4. Diagnóstico de falla simultánea del estator a velocidad constante caso con falla de 2 % y 4.5 %.

Otro escenario estudiado es el diagnóstico de fallas eléctricas del estator de tipo incipiente y simultáneas, es decir, que se afecta una bobina de diferente fase, en esta caso la fase a y la fase b.

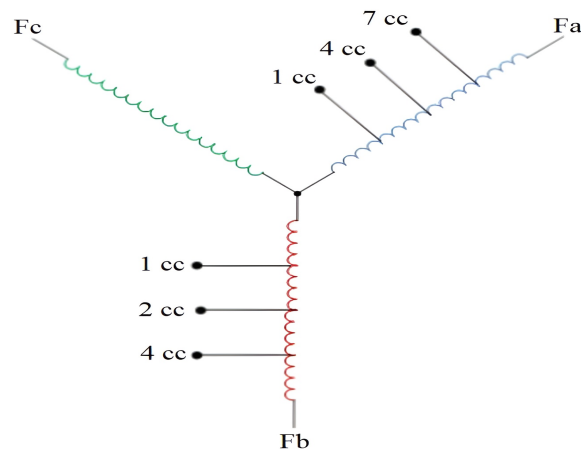


Figura 2.12. Esquema de las derivaciones de falla

En la figura 2.13 , se muestran las corrientes del estator para el caso de falla incipiente del estator de corto circuito entre espiras correspondientes a una falla simultanea de 4.5 % y 2 % del devanado de la fase a y fase b respectivamente.

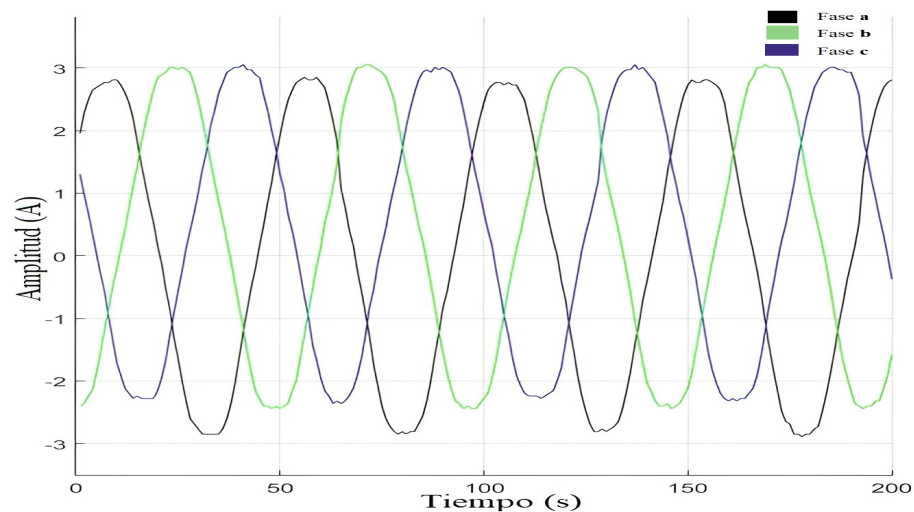


Figura 2.13. Corrientes del estator del PMSG caso falla simultanea 2 % y 4.5 % a 200 rpm.
Señales trifasicas de Corriente en caso falla simultanea

Una vez obtenidas las corrientes, se puede observar en la figura 2.13 el desbalance en las corrientes al aumentar el porcentaje del error en este caso de la falla simultanea. Se realiza el mismo procedimiento que en los casos de estudio pasados, es decir, se debe efectuar el mapeo de las corrientes al marco de referencia de concordia y después de obtiene del módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.14 se muestra el resultado de dicho mapeo.

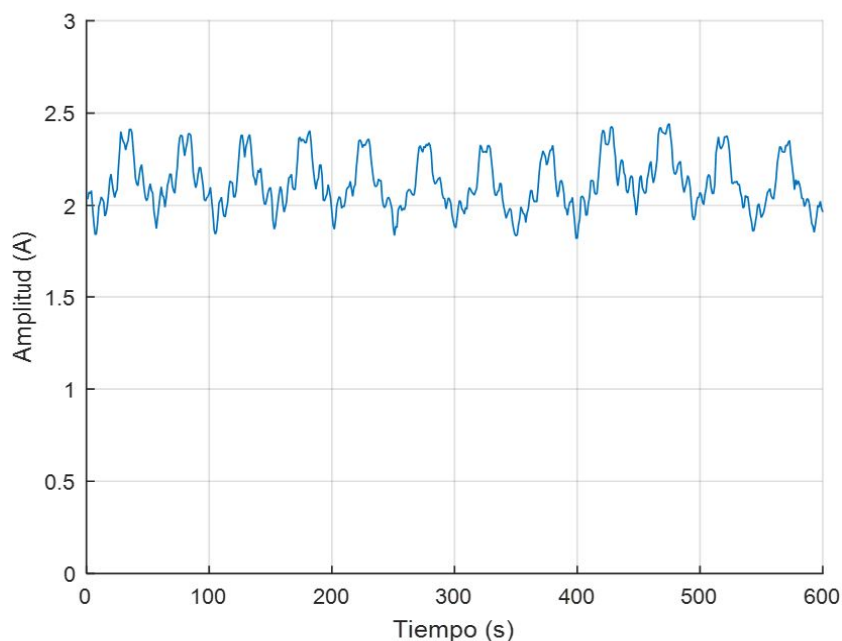


Figura 2.14. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a 200 rpm.

Una vez obtenido el modulo del ISP se realiza una comparación con el modulo del caos sano para notar algunas de las diferencia s que este pueda mostrar. El resultado del análisis espectral para el caso con falla simultanea, para la velocidad de 200 rpm., la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental, es decir 40 Hz, para este caso de estudio podemos notar que no existe un aumento de la firma de falla debido a que la magnitud del armónico de firma de falla para este caso es de 2 mA, es decir que no se puede comprobar la detección de la falla simultanea del 4.5 % y del 2 % en la fase a y la fase b respectivamente. Esto ocasiona que en fines comparativos la falla simulteana tenga valores muy similares a el caso sano de estudio en este trabajo. Este analisis se miuestra en la figura 2.15.

En la tabla 2.5 se muestran los valores rms obtenidos mediante el análisis MRA para el caso con falla simultanea del 4.5 % y 2 % en las fases a y b respectivamente.

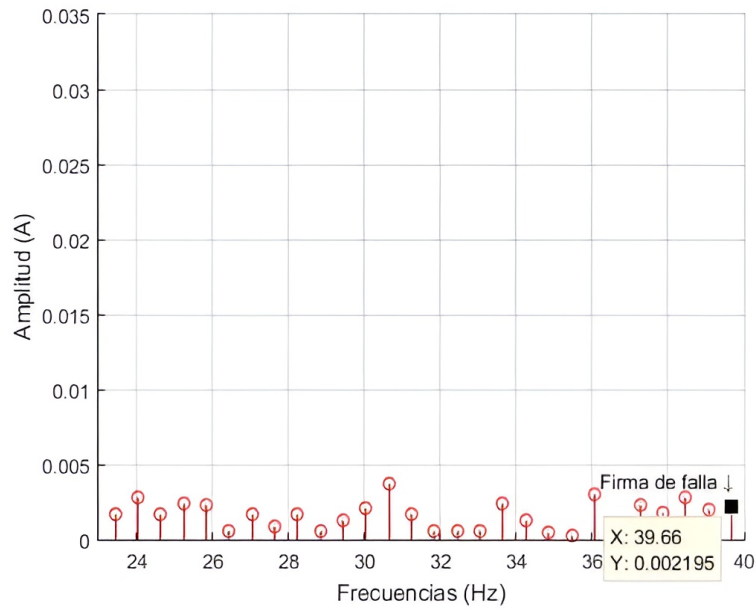


Figura 2.15. FFT del Módulo del ISP fallas 2 % y 4.5 % a 200 rpm

Rango de frecuencia	Ondeleta	Valor rms caso sano	Valor rms falla	diferencia rms
31.25-62.5Hz	Haar	0.2525	0.2577	0.0055
31.25-62.5Hz	Daub2	0.2167	0.2172	0.0005
31.25-62.5Hz	Daub4	0.1705	0.1725	0.002
31.25-62.5Hz	coif4	0.1691	0.1699	0.0008

Tabla 2.5. Análisis MRA de ISP del PMSG caso fallas simultaneas 2 % y 4.5 % a 200 rpm.

2.2. Diagnóstico de falla del estator a velocidad variable caso sano.

Otro escenario que se estudió es el caso de fallas eléctricas del estator a velocidad variable. El sistema generador de patrones de viento fue dotado con la capacidad de reproducir patrones arbitrarios de viento, como se encontraba en una etapa preliminar, ésta etapa es el termino del presente trabajo de investigación, se decidió utilizar un patrón de velocidad de viento de tipo sinusoidal, el cual se ilustra en la figura 2.16. Se estudiaron los escenarios de caso sano, falla de corto circuito del 2 % y de 4.5 % en la fase a del PMSG. El escenario fue estudiado en un régimen de cambio de velocidad con un patrón de tipo sinusoidal, el cual va de las 100 rpm como mínimo a las 300 rpm como máximo, la tasa de actualización en el cambio de velocidad se estableció en 10 Hz.

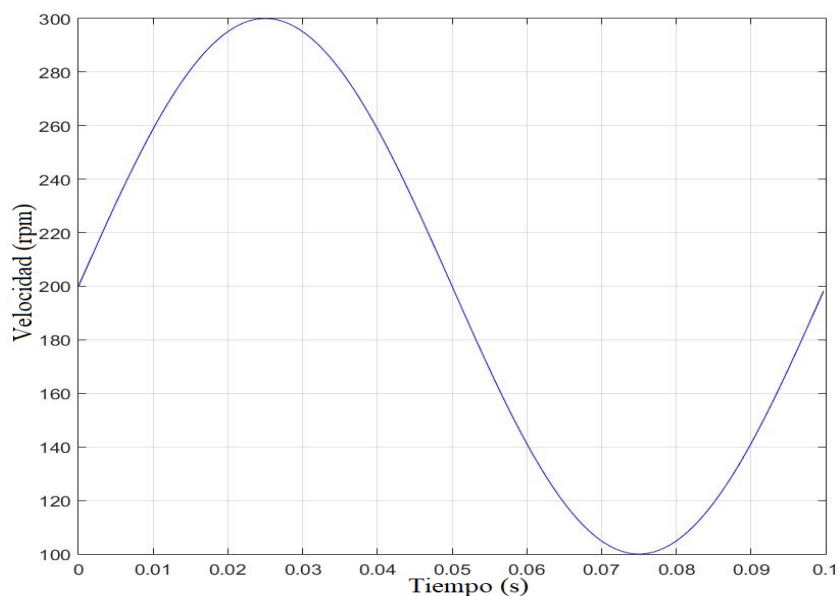


Figura 2.16. Patrón sinusoidal de velocidad de prueba.

No de prueba	Fase a	Fase b	Fase c
1	Falla del 2 %	Sin falla	Sin falla
2	Falla del 4.5 %	Sin falla	Sin falla
3	Falla del 4.5 %	Falla del 2 %	Sin falla

Tabla 2.6. Escenarios de fallas patrón senoidal

En la figura 2.17. se muestran las señales de corriente del estator las cuales fueron

muestreadas a 1 KHz, en las cuales es posible apreciar una envolvente de frecuencia baja 10 Hz, ésto debido a los cambios en la magnitud de la corriente inducida lo cual es provocado por el cambio en la velocidad del PMSG.

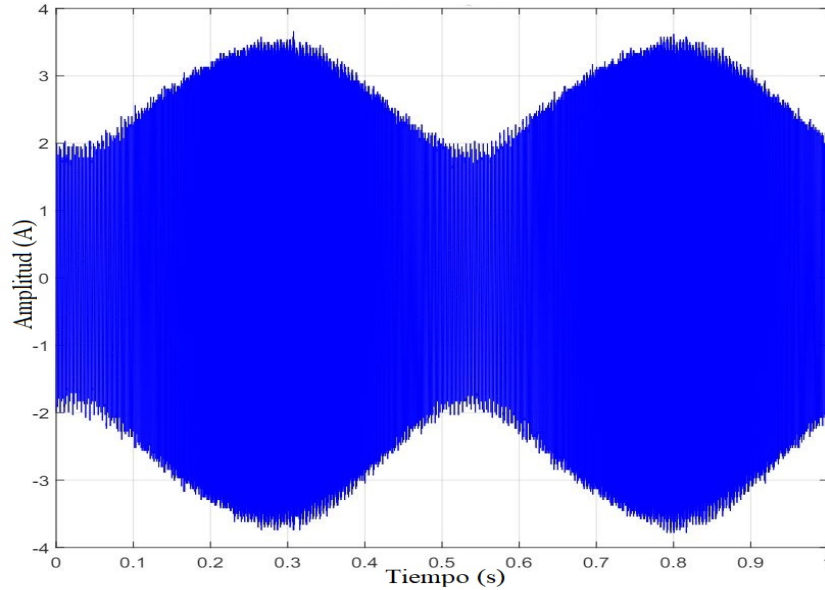


Figura 2.17. Corrientes trifasicas del estator del PMSG caso sano a velocidad variable.

Para el diagnóstico de fallas en el régimen de velocidad variable, se utiliza un enventanado de las señales de corriente, se utiliza la ventana de Hanning, en la expresión (2) se muestra la ventana utilizada en la parte experimental, en la cual, Lambda representa el ancho de la ventana en el dominio del tiempo.

$$V_h(n) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi\frac{\lambda}{2}}{\lambda}\right) \quad (2)$$

Una vez que han sido adquiridas las corrientes trifásicas del estator del PMSG para el caso con falla en la fase a del 4.5 % a velocidad variable, el siguiente paso a realizar es efectuar el mapeo de dichas corrientes al marco de referencia de concordia para posteriormente realizar la obtención de el módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.18 de dicho mapeo.

Para este caso de estudio se optó por tomar un ancho de 50 ms para el enventando Hanning de la señal del modulo del ISP del caso sano a velocidad variable para su posterior análisis con la FFT. Los anchos de enventado propuestos para el análisis de este caso de estudio se muestran en la tabla 2.7

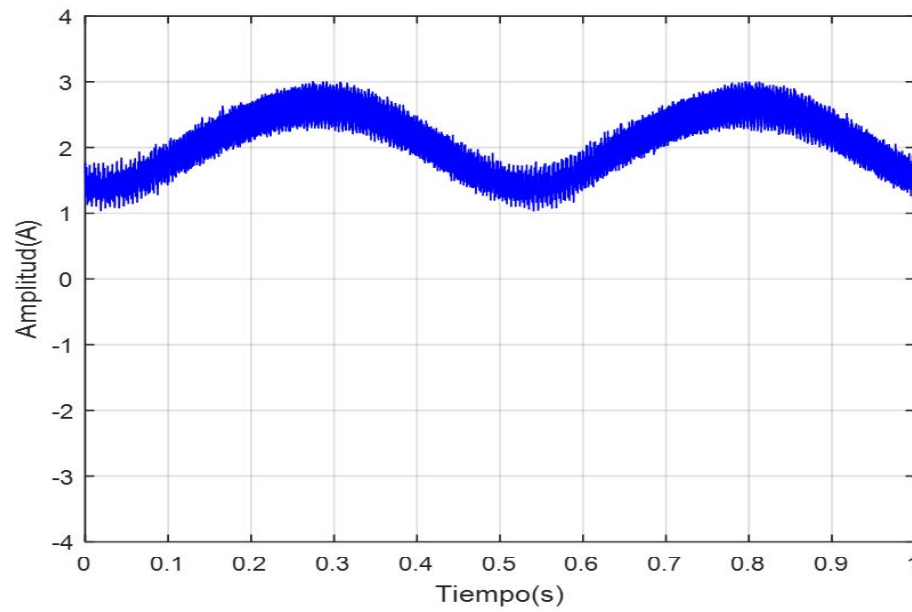


Figura 2.18. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso sano a velocidad variable.

No de prueba	Tiempo inicio(s)	Tiempo Final(s)	Vel. Aproximada(RPM)
1	0	0.05	100
1	0.26	0.31	300
2	0.24	0.29	100
2	0.50	0.55	300
3	0.25	0.29	100
3	0.52	0.57	300

Tabla 2.7. Detallado del ancho de las ventanas de Hanning implementadas.

Para los resultados experimentales del análisis espectral para el caso sano, para la velocidad variable, según la ecuación (1) mostrada anteriormente la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental, al observar la tabla 2.7 se observa que para el primer caso experimental del ancho del enventando se evalúan en velocidades aproximadas a 100 y 300 rpm., por lo que la firma de falla debe de aparecer cerca de los 20 y 60 Hz respectivamente.

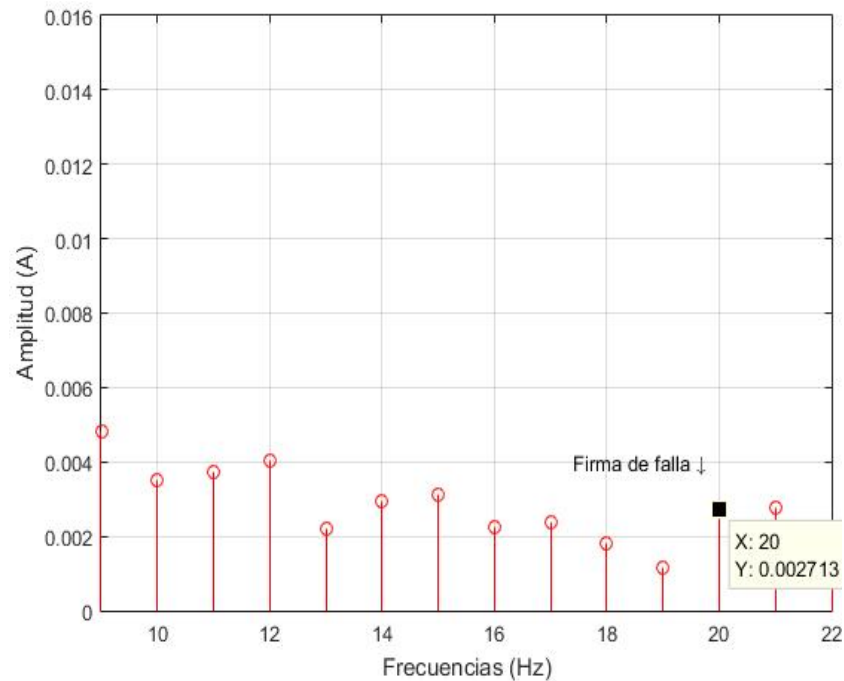


Figura 2.19. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso sano a velocidad variable (0-0.05s).

En las figuras 2.19 y 2.20 se observa la firma de falla de dos anchos de enventado diferentes para este caso de estudio, donde las velocidades aproximadas durante el enventando son de 100 y 300 rpm aproximadamente, por lo que las firmas de falla aparecen cerca de los 20 y 60 Hz, mostrando un armónico de 2.7 y 2.3 mA respectivamente.

Al utilizar enventanados para el análisis espectral del caso de estudio a velocidad variable, es necesario mencionar que las firmas de falla pudieran no presentarse exactamente al doble de la frecuencia fundamental debido a los cambios de velocidad durante el análisis, es decir, pueden aparecer cerca de la frecuencia de firma de falla calculada.

Debido a cuestiones de tiempo para este caso de estudio así como para los casos con falla no se realizará análisis MRA con condeletas.

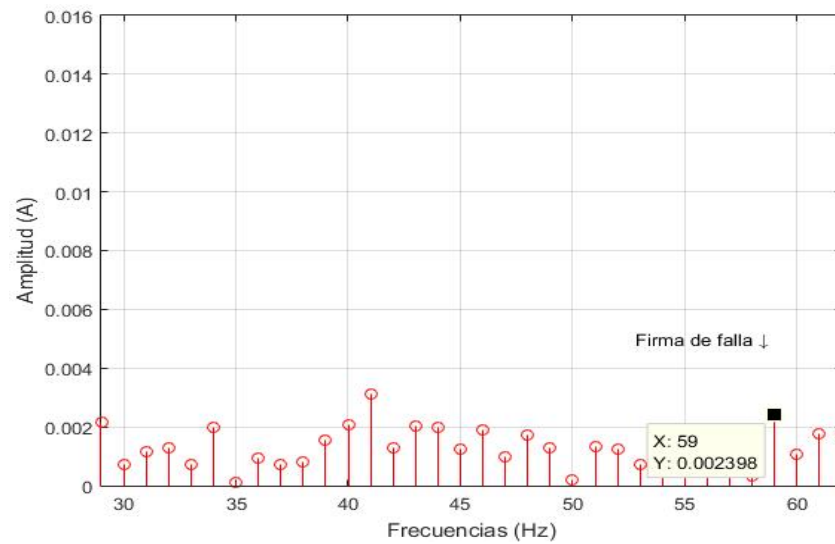


Figura 2.20. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso sano a velocidad variable (0.26-0.31s).

2.3. Diagnóstico de falla del estator a velocidad variable caso falla 2 %.

El segundo escenario que se estudió es el caso de falla del 2 % del estator a velocidad variable. Una vez que han sido adquiridas las corrientes trifásicas del estator del PMSG, el siguiente paso a realizar es efectuar el mapeo de dichas corrientes al marco de referencia de concordia para posteriormente realizar la obtención de el módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.21 se muestra el resultado de dicho mapeo.

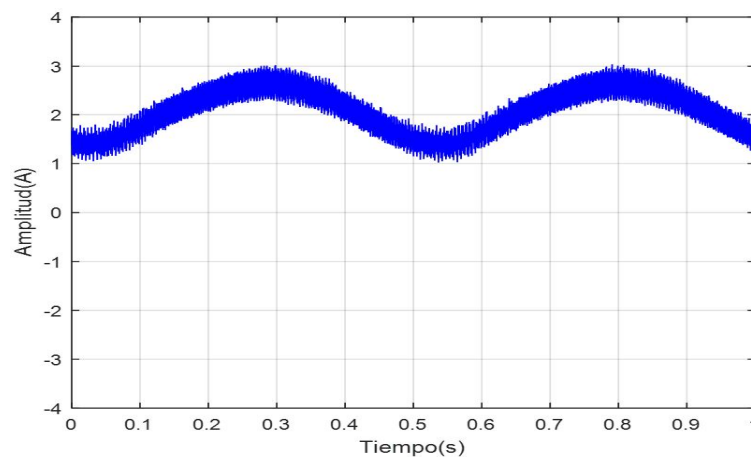


Figura 2.21. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso falla 2 % a velocidad variable.

Una vez obtenido el modulo ISP de la figura 2.21 se realiza una comparación entre dicha figura y el caso sano para observar los desbalances que pueden existir en las señales de corrientes trifasicas del estator debido a la falla incipiente del 2 % provocada en la fase a. Es necesario inventanar para realizar un análisis espectral con la FFT. En las figuras 2.22 y 2.23 se observa el resultado espectral para el caso de estudio de falla del 2 % a velocidad variable, mostrando armonicos con una amplitud de 3.4 y 3.3 mA respectivamente confirmando un aumento de amplitud en la firma de falla.

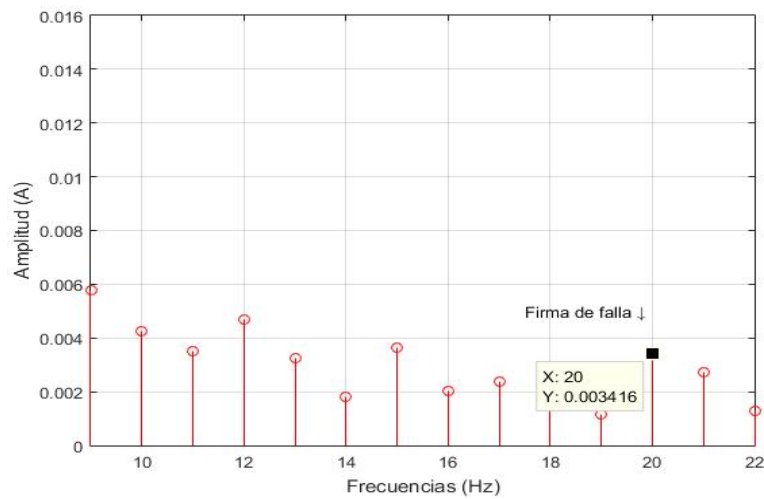


Figura 2.22. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 2 % a velocidad variable (0.0-0.05s)

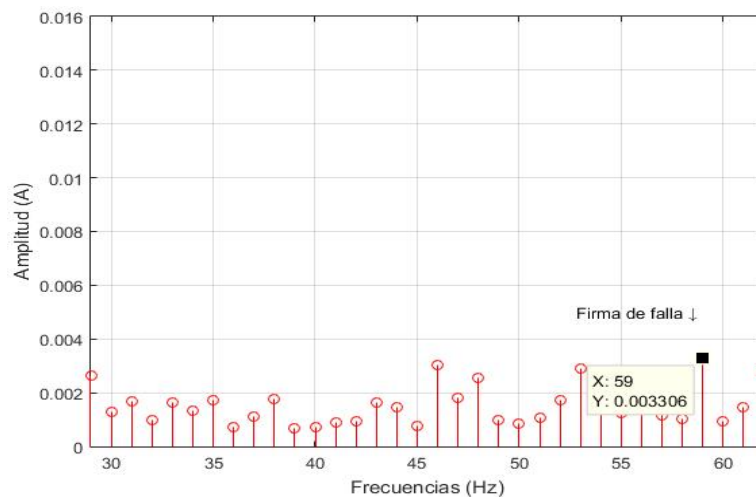


Figura 2.23. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla 2 % a velocidad variable (0.26-0.31s)

2.4. Diagnóstico de falla del estator a velocidad variable caso falla 4.5 %.

El tercer escenario que se estudió es el caso de falla del 4.5 % del estator a velocidad variable. Una vez que han sido adquiridas las corrientes trifásicas del estator del PMSG, el siguiente paso a realizar es efectuar el mapeo de dichas corrientes al marco de referencia de concordia para posteriormente realizar la obtención de el módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.24 se muestra el resultado de dicho mapeo.

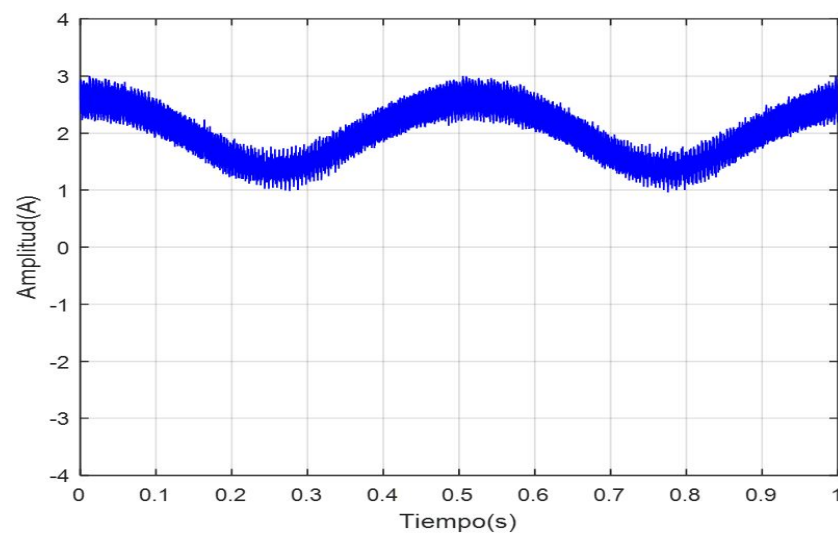


Figura 2.24. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso fallas 4.5% a velocidad variable.

Al igual que en los casos anteriores, al obtener el modulo del ISP para el caso de falla del 4.5 %, se toman un valor de 50 ms para el ancho del envoltorio del el modulo ISP para su análisis mediante la FFT.

En las figuras 2.25 y 2.26 se ilustra el análisis espectral obtenido para este caso de estudio, mostrando un incremento en la amplitud de 2.5 y 2.7 mA en los armonicos localizados en 19 y 61 Hz respectivamente

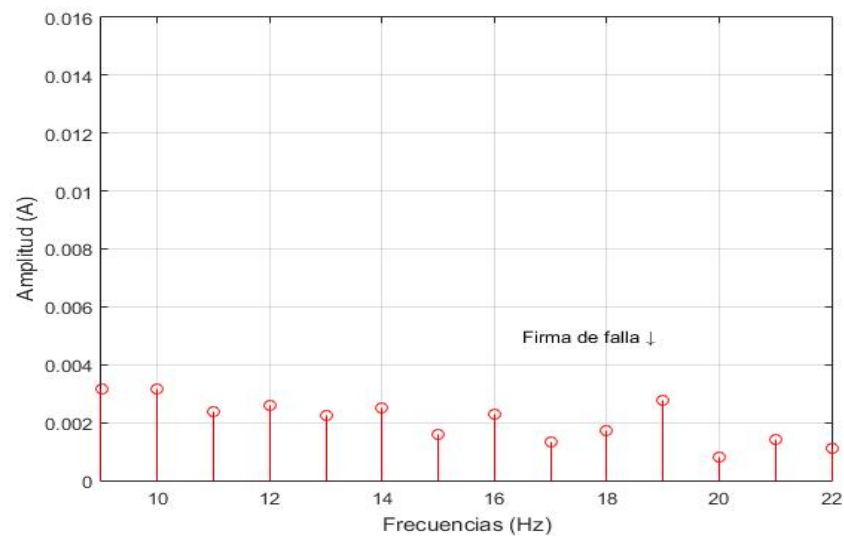


Figura 2.25. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla del 4.5 % a velocidad variable (0.24-0.29s)

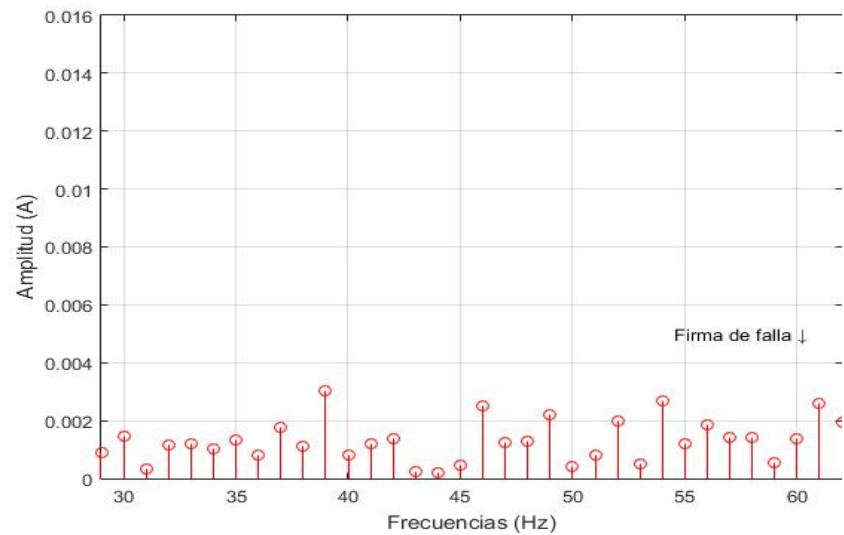


Figura 2.26. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso falla del 4.5 % a velocidad variable (0.50-0.55s).

2.5. Diagnóstico de falla simultánea del estator a velocidad variable caso con falla de 2 % y 4.5 %.

La tercera prueba para velocidad variable según la tabla 2.6 consta de una falla simultánea del estator de 4.5 % y del 2 % en bobinas de diferentes fases a velocidad variable.

Una vez que han sido adquiridas las corrientes trifásicas del estator del PMSG, el siguiente paso a realizar es efectuar el mapeo de dichas corrientes al marco de referencia de concordia para posteriormente realizar la obtención de el módulo del ISP de las corrientes alfa-beta, en la figura 2.27 se muestra el resultado de dicho mapeo.

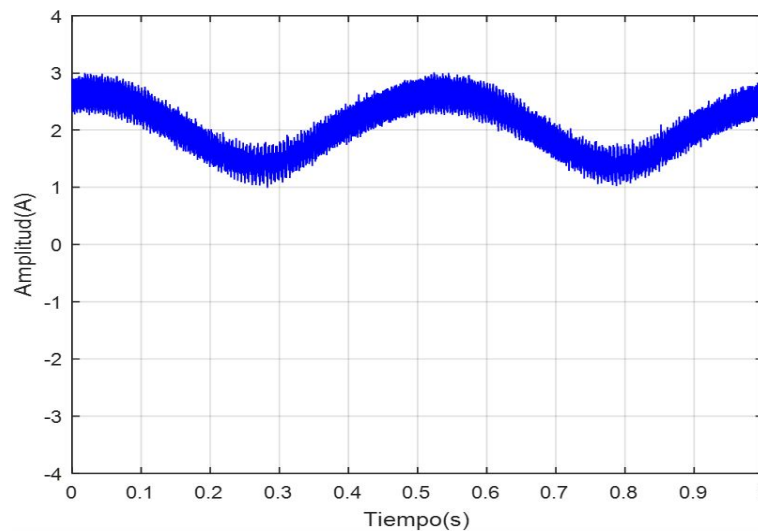


Figura 2.27. Modulo del ISP corrientes del estator del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a velocidad variable.

Para realizar el inventariado de la señal se utilizaran los mismos datos que en los casos de estudio pasados, es decir 50 ms para el inventariado y la firma de falla debe de aparecer cerca de los 20 y 60 Hz respectivamente.

En las figuras 2.28 y 2.29 se ilustran los resultados del análisis espectral obtenido de manera experimental para el caso de falla simultánea del 2 % y 4.5 % a una velocidad variable. Para este caso en específico podemos observar que los armónicos donde se deberían presentar las firmas de falla, disminuyen en lugar de aumentar, por lo que se puede intuir que no se ha logrado una buena detección de falla mediante la utilización de este sistema.

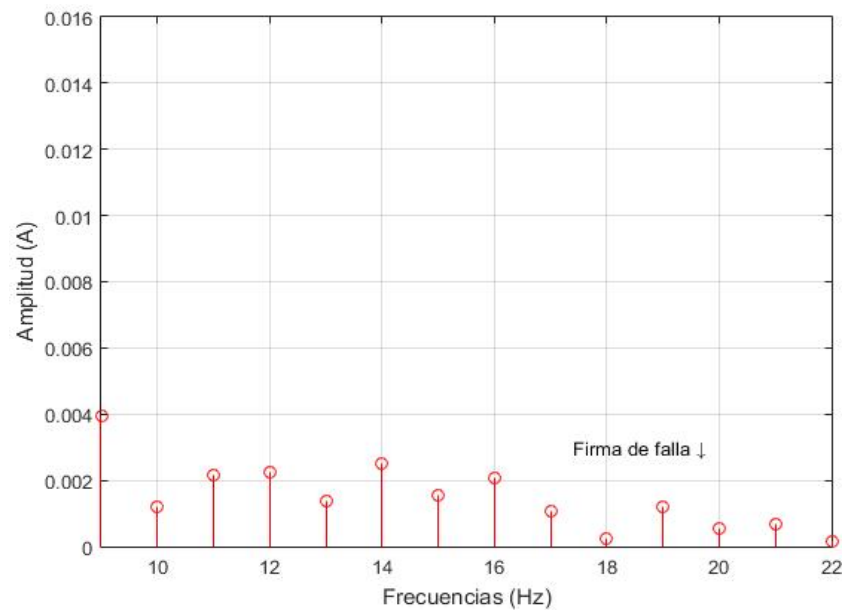


Figura 2.28. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a velocidad variable.(0.25-0.30s).

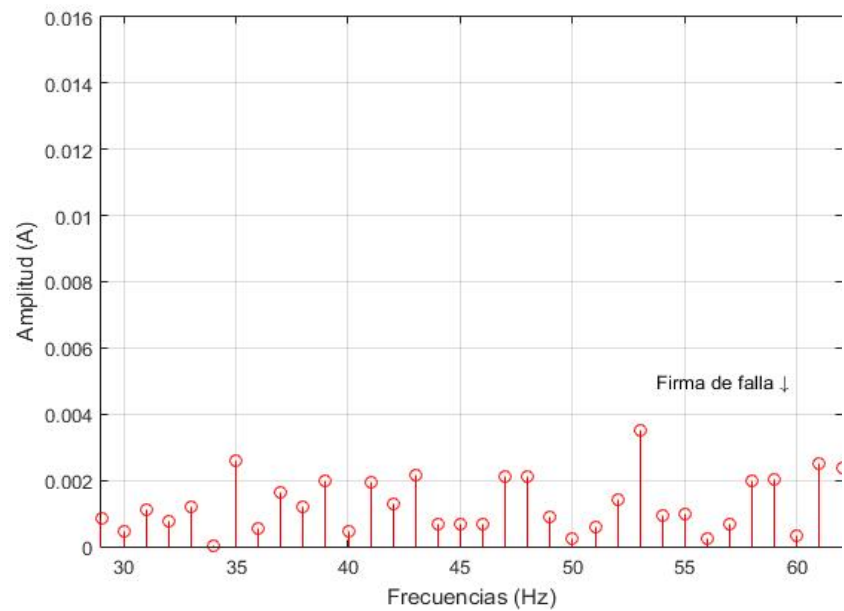


Figura 2.29. Espectro de frecuencia ISP del PMSG caso fallas 2 % y 4.5 % a velocidad variable.(0.52-0.57s).

2.6. Conclusiones.

En el presente trabajo de investigación presenta el diagnóstico de fallas eléctricas incipientes de corto circuito del estator en la fase a en diferentes regímenes de velocidad, tanto en velocidad constante como en velocidad variable. Se indujeron diferentes escenarios de falla, tanto el caso sano como el caso de corto circuito con un porcentaje del 2 % y 4.5 %, es decir de 4 y 7 espiras en corto circuito del devanado de la fase a del estator, para lograr dicho escenario se aprovecha un generador de imanes permanentes (PMGS por sus siglas en inglés) el cual fue alterado en un trabajo previo de investigación.

Se validaron los diferentes escenarios de falla efectuando un análisis con un carácter no invasivo de las corrientes del estator con herramientas basadas en el procesamiento de señales, para lograrlo se usó la técnica conocida como análisis de las firmas de corrientes del estator (MCSA por sus sigas en inglés), los algoritmos implementados son el vector espacial instantáneo de Park (ISP por sus siglas en inglés), el análisis espectral mediante la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), y la descomposición multinivel (MRA por sus siglas en inglés) evaluando las ondeletas madre de Haar, Daubechies 2, Daubechies 4 y Coiflet 4.

Para lograr el régimen de velocidad variable principal aportación del trabajo de investigación se re diseñó el sistema generador de patrones de viento, el cual, es básicamente un sistema que reproduce patrones arbitrarios de viento, para ello se implemento un esquema de control de velocidad de lazo cerrado del motor de corriente directa que impulsa el PMSG.

Se efectúa un análisis comparativo y redundante entre las herramientas tiempo frecuencia, transformada discreta de Fourier y análisis multiresolución ondeleta para el caso de velocidad constante. Finalmente se concluye que fue posible efectuar la detección de falla simple de corto circuito, mientras que la falla multiple no fue posible de detectar en los devanados de la fase a del estator del PMSG, tanto en regímenes de velocidad constante y variable.

Bibliografía

- [1] Flyur R. Ismagilov, Viacheslav Ye. Vavilov, Vladimir I. Bekuzin, and Vladislav S. Chirkov. Design analysis of submersible brushless dc motors for the oil and gas industry. In *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, pages 1–5, 2019, doi:10.1109/ICOECS46375.2019.8949991.
- [2] Karolina Kudelina, Bilal Asad, Toomas Vaimann, Anton Rassolkin, and Ants Kallaste. Effect of bearing faults on vibration spectrum of bldc motor. In *2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, pages 1–6, 2020, doi: 10.1109/eStream50540.2020.9108899.
- [3] Miftah Irhoumah, Remus Pusca, Eric Lefevre, David Mercier, and Raphael Romary. Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3):pp. 2682–2689, 2019, doi:10.1109/TIA.2019.2899560.
- [4] Kim Sung Ho, Rohan Ali., Rabah Mohammed. An integrated fault detection and identification system for permanent magnet synchronous motor in electric vehicles. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 18(1):20–28, March 2018, <https://doi.org/10.5391/IJFIS.2018.18.1.20>.
- [5] S. J. de la Rosa Mendoza, R. Alvarez Salas, M. Gonzalez Garcia, V. Cardenas, F. Pazos Flores, and F. J. Villalobos Pina. Deteccion de fallas en el convertidor de potencia con diodos de enclavamiento back-to-back de un sistema de generacion eolica. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automatico*, pages 489–494, 2019.
- [6] R. Ortiz Medina, F. Villalobos Pina, R. Alvarez Salas, M. Esparza Ruelas, C. Saucedo Zarate, and V. Maldonado Ruelas. Deteccion de fallas en un aerogenerador basado

- en un pmsg. *Memorias del Congrso Nacional de Control Automatico*, pages 477–482, Octubre 2018.
- [7] R. Ortiz Medina, F. Villalobos Pina, V. Maldonado Ruelas, and R. Alvarez Salas. Park's vector analysis for electricla fault detection in stator of low power wind turbine. *Pistas Educativas*, 2018.
- [8] Chapman S. J. *Maquinas Electricas*. Mc Graw Hill, Mexico, D.F., 5ta edition, 2012.
- [9] Theodore Wildi. *Maquinas electricas y sistemas de potencia*. Pearson,educacion, Mexico, sexta edicion edition, 2007.
- [10] Lopez Molina F., Hernandez Mayoral E., Duenas Reyes E., and Parra Velasco L.Y. Revision del estado actual para el analisis de vibraciones para la deteccion y diagnostico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de induccion de doble alimentacion. *Revista de innovavion sistematica.*, 1(3):pp. 10–25, Septiembre 2017.
- [11] International Electrotechnical Commissionl. Wind energy generation systems part 1: Design requirements . International Electrotechnical Commission., 2019, URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/26423>.
- [12] Sathyajith Mathew. *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics* . Springer, USA, 2066a edition, 2014.
- [13] A. Hemami. *Wind turbine technology*. Cengage Learning, University of Salford, UK., 2011.
- [14] Jenkins N. Sharpe D. Burton, T. and E. Bossanyi. *Wind energy handbook*. John Wiley and Sons, 2011.
- [15] Raul A. Ortiz Medina, Francisco J. Villalobos Pina, Ricardo Alvarez Salas, Irving Lopez Garcia, and Victor M. Jimenez Mondragon. Deteccion de fallas den un dfig empleando el metodo del elemento finito. *Memorias del Congrso Nacional de Control Automatico*, Octubre 2019.
- [16] L. Herrera, A. Alarcon., and E. Rivas Trujillo. Diseno de un generador de flujo axial usando el metodo de elementos finitos. *Redes ing.*, Vol: 4(Num: 2):pp. 6–15, Diciembre 2013, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.5920>.
- [17] C. Castillo. and H. Iguaran. Diseno y construccion de un generador de magnetos permanentes. Universidad pontificada Bolivariana, Enero 2012, URL : <http://hdl.handle.net/20.500.11912/1891>.

-
- [18] N. Madani. Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine. Royal Institute of Technology, 2011, URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:470652/fulltext01.pdf>.
- [19] M. D. Rodriguez Santillan. and M. J. Leon Yungaicela. Analisis y aplicacion de un generador de imanes permanentes para un sistema de energia eolica. Master's thesis, Universidad Politecnica Saleciana, Guayaquil, 2016.
- [20] Duzdevich J. P. Propuesta de etiquetado de aerogeneradores de baja potencia orientado a consumidores. Master's thesis, Universidad Nacional del Comahue, 2020.
- [21] Dodero Juan Bautista and Garcia Fernandez Maria. Generador eolico de baja potencia. Master's thesis, Universidad de Buenos Aires facultad de arquitectura, diseno y urbanismo., 2012.
- [22] Lorenzo Scappatici, Nicola Bartolini, Francesco Castellani, Davide Astolfi, Alberto Garrinei, and Marcello Pennicchi. Optimizing the design of horizontal-axis small wind turbines: From the laboratory to market. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.006>.
- [23] A. Bouzida, O. Touhami, R. Ibtouen, A. Belouchrani, M. Fadel, and A. Rezzoug. Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(9):4385–4395, 2010, DOI: 10.1109/TIE.2010.2095391.
- [24] Roberto Flores y Tomas I. Asiain. Fault diagnosis in rotating electrical machines by side bands frequency spectra technique. *Informacion Tecnologica*, 22(4):73–84, 2011, DOI: 10.4067/S0718-07642011000400009.
- [25] Xiang. Gong. Online nonintrusive condition monitoring and fault detection for wind turbines. Master's thesis, ETD collection for University of Nebraska-Lincoln. AA13546799, 2012, URL: <https://digitalcommons.unl.edu/dissertations/AAI3546799>.
- [26] A. Choudhary, D. Goyal, S. L. Shimi, and A. Akula. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26:1221–1238, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>.
- [27] Alberto Bellini, Fiorenzo Filippetti, Carla Tassoni, and Gerard-Andre Capolino. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 55(12), December 2008, DOI: 10.1109/TIE.2008.2007527.
-

- [28] Yao Da, Xiaodong Shi, and Mahesh Krishnamurthy. Health monitoring, fault diagnosis and failure prognosis techniques for brushless permanent magnet machines. *IEEE In :Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*., pages 1–7, 2011, DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043248.
- [29] Ming Cheng, Jun Hang, and Jianzhong Zhang. Overview of fault diagnosis theory and method for permanent magnet machine. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 1(1):21–36, December 2015, DOI: 10.23919/CJEE.2015.7933135.
- [30] Amal Guezmil, Hanen Berriri, Remus Pusca, Anis Sakly, Raphael Romary, and Mohamed Faouzi Mimouni. Detecting inter-turn short-circuit fault in induction machine using high-order sliding mode observer: Simulation and experimental verification. *Control, Automation and electrical systems*, 28(4):532–540, 2017, Doi: <https://doi.org/10.1007/s40313-017-0314-2>.
- [31] Carla Terron Santiago, Javier Martinez Roman, Ruben Puche Panadero, and Angel Sapena Bano . A review of techniques used for induction machinefault modelling. *Sensors*, 21(14), 2021, doi: 10.3390/s21144855.
- [32] Motor reliability working group. Report on large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part i. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA.21(4):853–864, 1985, DOI: 10.1109/TIA.1985.349532.
- [33] Mohammed Obaid Mustafa. On fault detection, diagnosis and monitoring for induction motors. Master’s thesis, Lulea University of Technology, 2015.
- [34] Rajvardhan J., Amandeep S., Lini M., and Shantanu C. A review of condition monitoring and fault diagnosis methods for induction motor. *Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 2018, DOI: 10.1109/IC-CONS.2018.8662833.
- [35] Satish Rajagopalan. Detection of rotor and load faults in brushless dc motors operating under stationary and nonstationary conditions. Master’s thesis, Georgia Institute of Technology, 2006.
- [36] J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero, and J. Urresty. Fault detection in dynamic conditions by means of discrete wavelet decomposition for pmsm running under bearing damage. *in Proc. IEEE APEC*, pages 951–956, Feb 2009, DOI: 10.1109/APEC.2009.4802777.
- [37] Bossio Guillermo, Garcia Guillermo, Forchetti Daniel, and Maria Valla. Modelado de la maquina de induccion con excentricidad del entrehierro incluyebdi el efecto de la

- ondulacion par. *Congreso Argentino de Control Automatico, AADECA*, 1, September 2004
- [38] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa. Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(5):1564–1575, May 2011, DOI: 10.1109/TIE.2010.2089937.
- [39] Cristian H. De Angelo, Guillermo R. Bossio, Santiago J. Giaccone, Maria Ines Valla, Jorge A. Solsona, and Guillermo O. Garcia. Online model-based stator-fault detection and identification in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11):4671–4680, 2009, DOI: 10.1109/TIE.2009.2012468.
- [40] Ivan Ramiro Calero Freire. Proteccion de generadores electricos mediante reles microprocesados multifuncionales. Master’s thesis, Escuela Politecnica Nacional, 2008.
- [41] Ruiz Mondragon Byron F., Mora Florez Juan J., and Perez-Londono Sandra M. Modelado del generador con aterramiento de alta reactancia para el analisis de fallas del estator. *Scientia Et Technica*, XV(42):333–338, Agosto 2009, ISSN: 0122-1701. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84916714062>.
- [42] Luis C. Giraldo, Juan J. Mora Florez, and Gabriel. Olguin. Evaluacion de la proteccion del estator de generadores sincronicos ante fallas a tierra por medio del metodo de inyeccion subarmónica. *Ingenieria y Competitividad*, 10(1):21–30, 2008 ISSN: 0123-3033. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323474002>.
- [43] J. Hang, J. Zhang, M. Cheng, and S. Ding. Detection and discrimination of open phase fault in permanent magnet synchronous motor drive system. *IEEE Trans. Power Electron*, 31(7):4697–4709, Jul 2016, DOI: 10.1109/TPEL.2015.2479399.
- [44] Rafael Torres Medina, Victor Arturo Maldonado Ruelas, and Raul Arturo Ortiz Medina. Metodos de deteccion de fallas en motores sincronos de imanes permanentes con aplicaciones para industria 4.0. *Pistas educativas*, 41(164), Noviembre 2019.
- [45] Purushottam Gangsar and Rajiv Tiwari. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 2020, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106908>.
- [46] Milanez D. L. and Emanuel A. E. The instantaneousspace-phasor: a powerful diagnosis tool. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 52(1):143–148, 2003, DOI: 10.1109/TIM.2003.809069.

- [47] J.J. Grainger and Jr. W.D. Stevenson. *Analisis de sistemas electricos de potencia*. McGraw Hill, USA, 1996.
- [48] Dimitris G. Manolakis John G. Proakis. *Digital Signal Procesing:Principles,Algorithms, and Application*. Prentice Hall, International, Inc, third edition edition, 1996.
- [49] J. W. Cooley, J. W. y Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, 90(19):297–297, 1965.
- [50] Michael Joel Spilsbury and Armando Euceda. Transformada rapida de fourier. *Revista de la escuela de fisica, UNAH*, IV(2):45–52, Agosto 2016.
- [51] Walker S. James. *A primer on waveles and their scientific application*. Chapman and hall/CRC, 2nd edition, 2008.
- [52] Yan Ruqiang Gao Robert X. *Wavelets Theory and applications for manufacturing*. Springer Science Bussisnes Media, LLC., 2011.
- [53] : Raul Arturo Ortiz Medina. Diagnostico de fallas electricas en estator de maquinas electricas de aerogeneradores. Master's thesis, Tecnologico Nacional de Mexico, sede Aguascalientes, 2021.