





# "ESTUDIO DE LAS CORRIENTES CIRCULANTES EN LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DE UN TURBOGENERADOR SINCRÓNICO DE 28KVA ANTE LA PRESENCIA DE CARGA DESEQUILIBRADA EN MAGNITUD"

ALEXIS ISAZA AYALA.
FRANCISCO JAVIER MENDOZA TELLO.

UNIVERSIDAD DEL VALLE.
FACULTAD DE INGENIERÍAS.
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.
SANTIAGO DE CALI, NOVIEMBRE DEL 2014.

# “ESTUDIO DE LAS CORRIENTES CIRCULANTES EN LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DE UN TURBOGENERADOR SINCRÓNICO DE 28KVA ANTE LA PRESENCIA DE CARGA DESEQUILIBRADAS EN MAGNITUD”

ALEXIS ISAZA AYALA.

FRANCISCO JAVIER MENDOZA TELLO.

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el Título de

INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTORES:

JAIRO A. PALACIOS Ph.D.

HAROLD JOSÉ DÍAZ Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE.

FACULTAD DE INGENIERÍAS.

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍAELÉCTRICA.

SANTIAGO DE CALI, NOVIEMBRE DEL 2014.

Nota de aceptación

_____
_____
_____
_____
_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Jairo A. Palacios  PhD. D Director

_____

Harold José Díaz PhD. Director

_____

## AGRADECIMIENTOS

Debemos agradecer primero a Dios porque estamos con vida.

Agradecemos de manera especial y sincera al Profesor Harold Díaz por aceptarnos para realizar este trabajo de grado bajo su dirección, su apoyo y confianza en nuestro trabajo y su capacidad para guiar nuestras ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en nuestra formación como profesionales.

Queremos expresar también nuestro más sincero agradecimiento al profesor Jairo Palacios por su importante aporte y participación en el desarrollo de este trabajo.

Al grupo de investigación en Conversión de Energía “CONVERGIA”, el cual nos proporcionó todos los elementos necesarios para la elaboración de este proyecto.

A la Universidad del Valle por habernos brindado las herramientas a lo largo de nuestra formación profesional.

A nuestros padres y familiares por su apoyo constante en este proceso.

A todos los profesores y compañeros mil y mil gracias por haber hecho parte de este proceso.

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza y por brindarme una vida llena de aprendizajes experiencias y felicidad.

Le doy gracias a mis padres Elmer y Janeth por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado a lo largo de mi vida, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A Aura, por ser una parte importante de mi vida, por haberme apoyado en todos los momentos, sobre todo por su paciencia y amor incondicional.

Francisco Mendoza

## TABLA DE CONTENIDO


**1 INTRODUCCIÓN ..... 16**
1.1 RESUMEN ..... 17
1.2 OBJETIVOS. ..... 19
1.3 JUSTIFICACIÓN ..... 20
**2 INFLUENCIA DE LAS CARGAS DESEQUILIBRADAS Y LOS ARMÓNICOS EN LOS TURBOGENERADORES. ..... 21**
2.1 DESEQUILIBRIOS ..... 21
2.1.1 Reacción de Inducido de una Máquina Sincrónica con Carga Equilibrada ..... 22
2.1.2 Cargas Desequilibradas: ..... 22
2.1.2.1 Componente de Secuencia Positiva: ..... 22
2.1.2.2 Componente de Secuencia negativa: ..... 23
2.1.2.3 Componente de Secuencia Cero: ..... 23
2.1.3 Efecto en los Turbogeneradores ..... 24
2.1.4 Normatividad: ..... 24
2.1.5 Requerimientos Térmicos del Rotor Durante Fallas desequilibradas [17] ..... 25
2.1.5.1 Calentamiento del Rotor: ..... 25
2.2 ARMÓNICOS ..... 27
2.2.1 Indicadores Esenciales de Distorsión Armónica [24] ..... 29
2.2.1.1 Tasas de Distorsión Armónica ..... 29
2.2.1.1.1 THD Corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global) [16] ..... 30
2.2.1.1.2 TIF (Factor de Interferencia Telefónica) [24] ..... 32
2.2.1.1.3 TIF Balanceado (Factor de Interferencia Telefónica Balanceado) [16] ..... 33
2.2.1.1.4 TIF Residual [16] ..... 33
**3 REALIZACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO EN ELEMENTOS FINITOS ..... 34**
3.1 DATOS TOMADOS DEL TURBOGENERADOR [25] ..... 34
3.1.1 Datos de Placa ..... 34
3.1.2 Medición de la Resistencia de los Devanados ..... 34
3.1.3 Medición de la Resistencia de Aislamiento ..... 35
3.2 CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DEL TURBOGENERADOR EN MEF ..... 35
3.2.1 Construcción de la Geometría y Mallado MEF ..... 36
3.2.2 Asignación de Materiales ..... 38
3.2.3 Asignación del Circuito ..... 40
3.3 CURVA DE VACÍO [26, 28, 29] ..... 42
3.3.1 Generalidades de la Prueba [30] ..... 42

3.3.2 Simulación ..... 43
3.4 CURVA DE CORTOCIRCUITO SOSTENIDO A PARTIR DE LA CURVA DE CORTOCIRCUITO BRUSCO [26, 28, 29] ..... 44
3.4.1 Simulación ..... 45
3.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VACÍO Y CORTOCIRCUITO SOSTENIDO A PARTIR DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO BRUSCO ..... 45
3.5.1 Curvas de magnetización del rotor y estator ..... 48
3.5.2 Curvas de tensión de fase en vacío simuladas ..... 48
3.6 Validación característica vacío y cortocircuito real y simulada ..... 49
*3.7 CÁLCULO DEL TIF* ..... 51
3.7.1 Cálculo Magnético del Entrehierro [33]: ..... 51
3.7.2 TIF Balanceado: ..... 55
3.7.3 TIF Residual: ..... 55
3.7.4 TIF Total: ..... 56
3.8 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [34]. ..... 56
3.8.1 Método de Cálculo: ..... 57
**4 ESTUDIO DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA ..... 59**
4.1 ESTUDIO MEF DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA ..... 59
4.1.1 Estudio de MEF del Turbogenerador en Condiciones Equilibradas ..... 60
4.1.2 Parámetros Iníciales de Simulación ..... 60
4.1.2.1 Resultados Obtenidos en la Simulación Software flux 2D ..... 63
4.1.2.1.1 Densidad de Corriente en el Rotor ..... 63
4.1.2.1.2 Densidad de flujo magnético ..... 64
4.1.2.1.3 Curva de Isovalores Equipotenciales de Densidad de Flujo ..... 65
4.1.2.1.4 Densidad de flujo en vacío para condiciones de equilibrio de carga en Magnitud ..... 65
4.1.2.1.5 Corriente por la puesta a tierra del neutro del estator ..... 66
4.1.3 Estudio MEF para el turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga 67
4.1.3.1 Resultados Obtenidos en la Simulación Software flux 2D para Diferentes Casos de Desequilibrio de Carga en Magnitud ..... 68
4.1.3.1.1 Variación de las Corrientes de Fase, Componentes Simétricas 68
4.1.3.1.2 Corriente de Secuencia Negativa ..... 70
4.1.3.1.3 Corriente de Secuencia Cero ..... 70
4.1.3.1.4 Factor de Devanado del Estator ..... 71
4.1.3.1.5 Armónicos de Densidad de Flujo ..... 72
4.1.3.1.6 Densidad de Flujo en el Entrehierro ..... 73

4.1.3.1.7 Armónicos de Corriente ..... 75
4.1.3.1.8 Armónicos de Corriente por el Neutro..... 78
4.1.3.1.9 Densidad de Corriente en el Rotor ..... 81
4.1.3.1.10 Densidad de Flujo Magnético..... 83
4.1.3.1.11 Curva de Isovalores Equipotenciales de densidad de flujo... 85
4.1.3.1.12 Corrientes Inducidas en el Eje del Turbogenerador [40]..... 86
**5 ESTUDIO EN SITIO DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA EN MAGNITUD ..... 89**
*5.1 Esquema de Conexión en Sitio*..... 89
5.2 Parámetros de la Prueba en Sitio ..... 91
5.2.1 Voltajes de Fase y Neutro ..... 91
*5.3 Resultados de la Prueba en Sitio*..... 92
5.3.1 Variación de las Corrientes de Fase, Componentes Simétricas..... 92
5.3.2 Medición de Energía..... 93
5.3.3 Armónicos de Corriente ..... 94
5.3.4 Armónicos de Corriente en el Neutro a Tierra del Devanado del Estator .. 102
5.3.5 Corriente por el Eje..... 106
5.3.6 TIF del turbogenerador para la prueba en sitio ..... 108
**6 ESTUDIO TÉRMICO DEL TURBOGENERADOR ..... 109**
6.1 Estudio térmico MEF del Turbogenerador en Condiciones de Equilibrio y Desequilibrio de Carga ..... 109
Figura. 48. Perfil térmico del estator del en condiciones equilibradas de carga en magnitud [℃] ..... ..... 111
6.1.1 Estudio Térmico de MEF para el Turbogenerador en Condiciones de Desequilibrio de Carga..... 112
6.1.1.1 Variación de la Temperatura en el Rotor y Estator .....115
*6.2 ESTUDIO TÉRMICO EN SITIO DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA* ..... 116
**7 CONCLUSIONES..... 121**
**8 BIBLIOGRAFIA..... 124**

## LISTA DE FIGURAS


| | | |
|---|---|---|
| Figura 1. | Forma de la onda con y sin contenido de armónico, con una frecuencia constante de 60Hz y una amplitud constante de 1pu | 27 |
| Figura 2. | Degradación del voltaje de la red causado por cargas no lineales | 28 |
| Figura 3. | Geometría del turbogenerador en 2d | 36 |
| Figura 3. | Mallado del turbogenerador. | 37 |
| Figura 5. | Curva de magnetización para el rotor. | 38 |
| Figura 6. | Curva de magnetización para el estator. | 39 |
| Figura 7. | Circuito asignado para pruebas de vacío y cortocircuito. | 41 |
| Figura 8. | Curvas de magnetización del rotor y estator del modelo. | 48 |
| Figura 9. | Onda de tensión simulada en las fases A, B y C para el voltaje asignado de la máquina. | 49 |
| Figura 10. | Característica vacío y cortocircuito sostenido, real y simulada | 50 |
| Figura 11. | Puesta a tierra de baja resistencia. | 56 |
| Figura 12. | Circuito asignado para la prueba de operación bajo carga | 61 |
| Figura 13. | Corrientes de fase con operación bajo carga nominal. | 62 |
| Figura 14. | Densidad de corriente del núcleo del rotor bajo condiciones equilibradas [A/mm$^2$]. | 63 |
| Figura 15. | Carta de colores para la densidad de flujo bajo condiciones equilibradas. | 64 |
| Figura 16. | Carta de isovalores para equipotenciales de densidad de flujo bajo condiciones nominales de carga equilibrada. | 65 |
| Figura 17. | Magnitud de la densidad de flujo para los casos vacío y bajo carga equilibrada. | 66 |
| Figura 18. | Corriente por el neutro de la puesta a tierra del turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga. | 67 |
| Figura 19. | Factor de devanado del estator. | 72 |
| Figura 20. | Armónicos de densidad de flujo para los diferentes casos de desequilibrio analizados. | 73 |
| Figura 21. | Densidad de flujo en el entrehierro para el mismo ángulo y tiempo. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 74 |
| Figura 22. | Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con equilibrio de carga. | 75 |
| Figura 23. | Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con | 76 |

| | | |
|---|---|---|
| | desequilibrio de carga del 102%. | |
| Figura 24. | Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con desequilibrio de carga del 104%. | 76 |
| Figura 25. | Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con desequilibrio de carga del 107%. | 77 |
| Figura 26. | Armónicos de corriente para en el turbogenerador con desequilibrio de carga del 111%. | 77 |
| Figura 27. | Armónicos de corriente por el neutro para los diferentes casos de desequilibrio analizados. | 79 |
| Figura 28. | Corriente por hilo neutro. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 80 |
| Figura 29. | Carta de colores para la densidad de corriente [A/mm]. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 82 |
| Figura 30. | Carta de colores para la densidad de flujo [T]. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 84 |
| Figura 31. | Carta de isovalores para el flujo equipotencial [Weber]. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 85 |
| Figura 32. | Efecto de las corrientes inducidas en el eje. | 86 |
| Figura 33. | Voltaje inducido en el eje. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 87 |
| Figura 34. | Corriente inducida en el eje. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%. | 88 |
| Figura 35. | Esquema de conexión para la realización de las pruebas en sitio. | 89 |
| Figura 36. | Montaje para la realización de las pruebas en sitio. | 90 |
| Figura 37. | Resistencia de carga | 90 |
| Figura 38. | Armónicos de corriente para la fase A. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 95 |

| | | |
|---|---|---|
| Figura 39. | Armónicos de corriente para la fase B. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 96 |
| Figura 40. | Armónicos de corriente para la fase C. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 97 |
| Figura 41. | Armónicos de Voltaje para la fase A. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 98 |
| Figura 42. | Armónicos de Voltaje para la fase B. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 99 |
| Figura 43. | Armónicos de Voltaje para la fase C. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 100 |
| Figura 44. | Armónicos de corriente por el neutro. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%. | 103 |
| Figura 45. | Armónicos de voltaje por el neutro Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%. | 104 |
| Figura 46. | Corriente por el eje. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%. | 107 |
| Figura. 47. | Perfil térmico del rotor del en condiciones equilibradas de carga en magnitud [℃] | 110 |
| Figura 48. | Perfil térmico del estator del en condiciones equilibradas de carga en magnitud [℃] | 111 |
| Figura 49. | Perfil térmico rotor del turbogenerador en condiciones desequilibradas de carga en magnitud (Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%). | 113 |
| Figura 50 | Perfil térmico estator del turbogenerador en condiciones desequilibradas de carga en magnitud (Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%). | 114 |
| Figura 51 | Perfil térmico rotor del turbogenerador: vacío superior izquierda, en condición de equilibrio de carga superior derecha, desequilibrio al 107% inferior izquierda, | 117 |

desequilibrio al 110%).inferior derecha.

Figura 52 Variación de la temperatura respecto de la potencia para las diferentes condiciones de operación del turbogenerador en sitio.. 119

Figura 53 Variación de la temperatura respecto de la corriente de secuencia negativa y el tiempo de estabilización de la prueba. 120

## LISTA DE TABLAS


| | | |
|---|---|---|
| Tabla 1. | Capacidad de corriente de secuencia negativa | 25 |
| Tabla 2. | Capacidad de corriente de corto en el tiempo. | 26 |
| Tabla 3. | Máximo factor de potencia real de una carga no lineal. | 31 |
| Tabla 4. | Factores de peso para el TIF, en los primeros armónicos | 32 |
| Tabla 5. | Factores de peso para el TIF balanceado | 33 |
| Tabla 6. | Factores de peso para el TIF residual. | 33 |
| Tabla7. | Datos de placa del turbogenerador. | 34 |
| Tabla 8. | Medida de las resistencias óhmica de armadura y campo | 35 |
| Tabla 9. | Medida de las resistencias de aislamiento de armadura y campo | 35 |
| Tabla 10. | Valores simulados y reales obtenidos para la prueba de vacío. | 46 |
| Tabla11. | Valores simulados y reales obtenidos para la prueba de cortocircuito. | 47 |
| Tabla12. | Coeficientes armónicos de la onda de inducción en el entrehierro de la máquina. | 52 |
| Tabla 13. | Factores para diferentes armónicos. | 54 |
| Tabla 14. | Parámetros para el turbogenerador en condiciones equilibradas | 60 |
| Tabla 15. | Densidad de flujo en los dientes estándar para turbogeneradores refrigerados por aire | 64 |
| Tabla 16. | Variación de las corrientes de fase y las componentes simétricas cuando la maquina se encuentra en equilibrio y desequilibrio de carga | 69 |
| Tabla 17. | Verificación de la corriente de secuencia negativa para desequilibrios del 100%, 102%, 104%, 107% y 111% según los parámetros de norma. | 70 |
| Tabla 18. | Verificación de la corriente de secuencia cero para desequilibrios del 100%, 102%, 104%, 107% y 111% según los parámetros de norma. | 71 |

| | | |
|---|---|---|
| Tabla 19. | Valores de corriente RMS por el neutro para diferentes casos de desequilibrio de carga en magnitud. | 79 |
| Tabla 20. | Pérdidas en el rotor simuladas para los cuatro casos de desequilibrio | 83 |
| Tabla 21. | Corriente y voltaje de excitación del turbogenerador | 91 |
| Tabla 22. | Voltajes de fase y neutro del turbogenerador en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga | 92 |
| Tabla 23. | Variación de las corrientes de fase, componentes simétricas de la fase A y su variación. | 93 |
| Tabla 24. | Variación de la potencia total del turbogenerador, para condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga del 107% y 110 %. | 94 |
| Tabla 25. | Armónicos de corriente de fase, cuando el turbogenerador se encuentra en equilibrio de carga 100% y desequilibrio del 107% y 110% de la fase A | 101 |
| Tabla 26. | Armónicos de voltaje de fase, cuando el turbogenerador se encuentra en equilibrio de carga 100% y desequilibrio del 107% y 110% de la fase A | 101 |
| Tabla 27. | Armónicos de corriente por el neutro: equilibrio al 100%, desequilibrio al 107 y 110% | 105 |
| Tabla 28. | Armónicos de voltaje por el eje: equilibrio al 100%, desequilibrio al 107 y 110% | 105 |
| Tabla 29. | Corriente por el eje cuando el turbogenerador se encuentra en un equilibrio de carga al 100%, desequilibrio al 107y 1110%. | 106 |
| Tabla 30. | TIF del turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga en magnitud. | 108 |
| Tabla 31. | Variación de la temperatura en el rotor y estator para los diferentes casos de desequilibrio. | 115 |

Tabla 32. Temperaturas del rotor y porcentaje de corriente de secuencia negativa cuando el turbogenerador se encuentra en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga. 118

# 1 INTRODUCCIÓN

Los turbogeneradores eléctricos representan el equipo más costoso en un sistema eléctrico de potencia y son de gran importancia para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico y la continuidad de las operaciones de los centros de trabajo de plantas industriales. Durante su vida útil los turbogeneradores eléctricos se encuentran sometidos, más que ningún otro equipo del sistema, a los más diversos tipos de condiciones de operación no solo electromagnética sino térmicas y mecánicas [1].

En la actualidad, en Colombia se están incorporando turbogeneradores a las industrias con el propósito de llevar procesos de cogeneración, normalmente estos turbogeneradores se acoplan al barraje directamente o a través de un transformador. Como consecuencia de esto, los turbogeneradores con frecuencia tienen la carga desequilibrada de la industria y los armónicos producidos por todos los sistemas electrónicos transitoria o permanentemente [2].

Adicionalmente, están sujetos a grandes corrientes y voltajes causados por disturbios eléctricos en el sistema de potencia. Tales como cargas desequilibradas (monofásicas y bifásicas), cargas no lineales, corrientes de secuencia negativa y cero, dispositivos controlados mediante electrónica de potencia, que constantemente producen armónicos [3].

## 1.1 RESUMEN

Esta tesis inicia describiendo las influencias que tienen las corrientes desequilibradas, los armónicos en los turbogeneradores y la normatividad existente referente a los máximos permitidos de desequilibrio. Se hace realización y validación del modelo a aplicar para este estudio de manera que se presentan los datos iníciales de la máquina a validar obtenidos en el laboratorio; se realiza el modelo en Flux 2d y posteriormente se realizan las pruebas básicas de rutina para obtener las características de vacío y cortocircuito para comparar con los resultados obtenidos en campo y de esta manera por satisfactorio el modelo.

Se realizan cuatro simulaciones variando la carga en una de las fases y se extraen de la simulación gráficas y datos de las diferentes variables eléctricas que le involucran.

Se presentan los datos obtenidos de la prueba en sitio en donde se realizaron: un caso equilibrado y dos desequilibrado se analizan los datos y se relacionan con los obtenidos por la simulación.

Se realiza un análisis térmico simulado y real de la máquina ante estas situaciones con el ánimo de concluir los efectos que tienen las corrientes de secuencia inversa en el rotor y su relación con la normatividad existente.

Finalmente con resultados obtenidos se realizan las conclusiones de la tesis.

Palabras Claves: Desequilibrio, armónicos, flujo, corriente, voltaje, térmico, validación, modelo.

This thesis begins by describing the influences of unbalanced currents, harmonics in the turbogenerators and existing regulations regarding maximum allowable imbalance. Implementation and validation of the model is made to apply for this study so that the initial data of the machine are presented to validate obtained in the laboratory; Flux model in 2d is performed and subsequently basic routine tests are performed to obtain the characteristics of vacuum circuit to compare with the results obtained in the field and thus for satisfactory model.

Four simulations are performed by varying the load on one of the phases and are extracted from the simulation, and graphic data of different electrical variables

Balanced and two unbalanced the data are analyzed and related to those obtained by the simulation: the data obtained from the test site where they were performed are presented.

Simulated and actual machine in the situations with the aim of concluding the effects of negative sequence currents in the rotor and its relationship with existing regulations thermal analysis is performed.

Finally results obtained with the conclusions of the thesis are performed.

Keywords: Imbalance, harmonics, flow, current, voltage, temperature, validation, model.

## 1.2 OBJETIVOS.

**Objetivo General:**

Estudiar las corrientes circulantes de la puesta a tierra del neutro de un turbogenerador sincrónico ante la presencia de carga desequilibrada.

**Objetivos Específicos:**

- Identificar la normatividad existentes acerca de la carga desequilibrada en turbogeneradores síncronos.

- Determinar los efectos que producen las cargas desequilibradas en turbogeneradores síncronos.

- Analizar el comportamiento de las corrientes circulantes por el neutro ante cargas desequilibradas mediante el método de elementos finitos MEF.

- Realizar las pruebas a él turbogenerador de 30kVA para establecer el comportamiento de las corrientes circulantes por el neutro ante cargas desequilibradas

- Análisis comparativo de los resultados de simulaciones y pruebas realizadas en sitio.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN.

Debido al número creciente de plantas industriales se ha iniciado un proceso de autogeneración a partir de turbogeneradores, ya sea en un estado parcial o total, adicionalmente se han ido reemplazando dispositivos eléctricos y mecánicos como los reguladores de velocidad y frecuencia entre otros, por dispositivos electrónicos. La entrada en funcionamiento de estos mecanismos ha causado inconvenientes en la operación de las plantas, como resultado del desconocimiento del impacto negativo de las corrientes circulantes de la puesta a tierra de estos turbogeneradores sincrónicos.

El incremento de desequilibrios por causa de las corrientes de secuencia cero que calienta el devanado reduciendo la vida útil y la eficiencia de la máquina. En la actualidad, el procedimiento que se lleva a cabo consiste en reducir la potencia de la máquina llevando la corriente que circula por tierra a limites normativamente admisibles para disminuir el calentamiento y mantener la vida útil [2].

Pero este procedimiento disminuye la capacidad de generación adicionalmente si no se realiza un cálculo adecuado la puesta a tierra, puede generarse un desequilibrio de tensiones y/o corrientes circulantes con otros turbogeneradores o dispositivos que estén dentro del sistema de generación [6].

Es por esto que, se hace necesario y pertinente un análisis de las corrientes circulantes y los perjuicios, que éstas pueden generar en los turbogeneradores. Si bien es cierto que existe suficiente información del tema, esta se encuentra dispersa, dificultando así la realización de un análisis adecuado que permita la solución de los inconvenientes causados por éstas corrientes.

# 2 INFLUENCIA DE LAS CARGAS DESEQUILIBRADAS Y LOS ARMÓNICOS EN LOS TURBOGENERADORES.

En este capítulo se presenta el estado del arte referente a los efectos del desequilibrio de carga y los armónicos en los turbogeneradores, sus consecuencias, métodos de estudio y las restricciones dadas por norma o fabricante en cuanto a la operación bajo tal régimen.

## 2.1 DESEQUILIBRIOS

El desequilibrio en magnitud es un fenómeno que ocurre en sistemas eléctricos donde las tensiones entre fases consecutivas no son iguales. El equilibrio perfecto de tensiones y corrientes es técnicamente inalcanzable en la mayoría de los casos. El continuo cambio de cargas presentes en la red, causan una magnitud de desequilibrio en permanente variación [4].

Los desequilibrios pueden originarse como consecuencia de asimetría de la carga exterior o de deterioros físicos interiores, que perturban la simetría en los devanados de la máquina y conducen a una distribución asimétrica de las corrientes en los devanados del estator de las máquinas sincrónicas [5].

Los desequilibrios de los sistemas eléctricos de potencia y de las máquinas eléctricas se pueden analizar mediante la transformación en componentes simétricas. Cuando el estator tiene el neutro puesto a tierra, las corrientes asimétricas en las fases del devanado del estator pueden estar compuestas de todas las componentes simétricas: de secuencia positiva, negativa y cero. [5].

La secuencia positiva crea un campo que gira positivamente, es decir, que gira en el mismo sentido del rotor mientras que la secuencia negativa gira en sentido contrario.

Paralelamente, las componentes de secuencia cero o homopolares tienen ángulos de fase idénticos que producen campos pulsantes y calentamientos en el devanado. En los sistemas sin conductores de neutro, las corrientes homopolares no pueden fluir creando un campo magnético estático. Pueden surgir diferencias significativas de voltaje entre la “referencia" y los puntos de neutro de las conexiones “Y” de las fuentes del sistema y las cargas [6].

### 2.1.1 Reacción de Inducido de una Máquina Sincrónica con Carga Equilibrada

Un sistema de potencia es equilibrado, si las corrientes y los voltajes tienen igual amplitud y están desfasados 120° eléctricos entre sí.

Cuando la carga es equilibrada, la corriente del devanado del inducido de una máquina sincrónica crea una fuerza magnética cuya onda fundamental, llamada fuerza magnética de reacción del inducido, gira sincrónicamente con el rotor a un respecto de un ángulo que depende de la carga.

Cuando la magnitud de la corriente de carga de cada fase en la máquina sincrónica es igual, las corrientes de línea tienen igual magnitud y están desfasadas 120° entre cada una, por lo tanto a través del hilo neutro no se presenta circulación de corrientes.

Dependiendo del tipo de carga (resistiva, inductiva o capacitiva), o cualquier combinación de ellas, la máquina tendrá un efecto de desmagnetización o magnetización [6].

### 2.1.2 Cargas Desequilibradas:

Cuando el estator tiene su neutro sólidamente aterrizado, las corrientes desequilibradas pueden descomponerse en: secuencia positiva, negativa y cero.

#### 2.1.2.1 Componente de Secuencia Positiva:

Cuando el estator de un generador síncrono tiene corrientes de secuencia positiva, bajo condiciones de estado estable; la componente fundamental de fuerza magnetomotríz, gira a la velocidad sincrónica del rotor y en la misma dirección. Debido a que el entrehierro es menor, los enlazamientos de flujo tienden aumentar, incrementado la F.e.my la reactancia. En esta condición, un valor alto de flujo magnético penetra al rotor y la impedancia de secuencia positiva Zg1 tiene un valor alto [7].

### 2.1.2.2 Componente de Secuencia negativa:

Las corrientes de secuencia negativa en el devanado del estator crea primordialmente un armónico de F.m.m., que gira a la velocidad sincrónica pero en sentido inverso de rotación del rotor, creando un par de frenado sobre el rotor. Se inducen sobre éste, corrientes parásitas del doble de la frecuencia, causando pérdidas notables en: el devanado de excitación, la cara polar de alternadores de polos salientes (en especial los de acero fundido) y en el cuerpo sólido del rotor de los turboalternadores, lo cual reduce el rendimiento del alternador. Además, dependiendo de la magnitud de la componente, se creará un campo alterno adicional en la excitación que deformará la F.e.m inducida en el devanado del estator. Esta puede ser atenuada o no por el devanado, y por tanto, se inducirá en el devanado del estator una F.e.m de tercer armónico [5].

La circulación de éstas corrientes a través de las cuñas del devanado amortiguador y anillos de retención del rotor en los turbogeneradores, causa calentamiento en estos elementos, situación que puede generar dos modos de falla:

- Las cuñas se calientan, y adicionalmente, debido a la fuerza centrífuga del rotor, éstas se pueden flexionar causando fisuras y ocasionalmente su ruptura [8].
- Debido al sobrecalentamiento del anillo de retención, se van perdiendo contactos con las cuñas y el cuerpo del rotor, lo que puede provocar arcos eléctricos, puntos calientes y ruptura [8].

### 2.1.2.3 Componente de Secuencia Cero:

Las componentes de secuencia cero u homopolares tienen ángulos de fase idénticos, en los sistemas sin conductores de neutro las corrientes homopolares no pueden fluir, pero pueden surgir diferencias significativas de voltaje entre la “referencia" y los puntos de neutro de las conexiones “Y” de las fuentes del sistema y las cargas [12].

### 2.1.3 Efecto en los Turbogeneradores

El efecto de las corrientes desequilibradas trifásicas del estator tiene una influencia significativa en el diseño y la operación del turbogenerador. El desequilibrio excesivo de la corriente causa calentamiento y pérdidas adicionales, primordialmente en la superficie del rotor en turbogeneradores con rotores de acero sólido y en los devanados amortiguadores de los turbogeneradores.

Las corrientes desequilibradas del estator producen torques pulsantes tanto en el eje como en el núcleo del estator, que pueden causar problemas de vibración y corriente a tierra a través de los cojinetes; pero en general estos problemas se consideran menos restrictivos que los considerados por el calentamiento del rotor.

Por el contrario, la magnitud de las pérdidas adicionales y el calentamiento resultante para la corriente de armadura de secuencia cero, dependerá del diseño del turbogenerador (en particular del diseño del devanado de armadura) así como también del valor de la corriente de fase de secuencia cero [13].

### 2.1.4 Normatividad:

De acuerdo con [14] los límites de desequilibrio definidos por la ecuación (1) deben ser menores al 2% para sistemas de baja y media tensión y menos del 1% para sistemas de alta tensión, con un máximo instantáneo de 4%. Sin embargo este límite puede ser localmente reducido incluso al 0.25%.

La razón por la cual los límites son más estrictos en sistemas de alta tensión es que están diseñados para ser utilizados en su máxima capacidad con una carga trifásica equilibrada. Cualquier desequilibrio causa una operación ineficiente en sistemas de transmisión muy cargados [15].

$$U_u = \frac{U_i}{U_d} * 100 \qquad (1)$$

Dónde:

| | |
|---|---|
| $U_u$ | Medida del desequilibrio (%) |
| $U_i$ | Voltaje de secuencia negativa |
| $U_d$ | Voltaje de secuencia positiva |

La norma [16] muestra que los generadores síncronos de turbina con combustión a gas, deben resistir, sin daño alguno, los efectos de una continua corriente desequilibrada correspondiente a la secuencia negativa igual o menor que el 10% de la corriente del estator asignada y no exceder el 105% en cualquiera de las tres fases [15].

### 2.1.5 Requerimientos Térmicos del Rotor Durante Fallas desequilibradas [17]

#### 2.1.5.1 Calentamiento del Rotor:

Según [18] un generador debe ser capaz de resistir, sin daños, los desequilibrios correspondientes a las corrientes de secuencia negativa mostradas en la tabla 1, que indica que el máximo de corriente no debe exceder el 105% de la corriente asignada en cualquier fase.

Tabla 1. Capacidad de corriente de secuencia negativa.

| Tipo de Generador | $I_2$ ** Permisible |
|---|---|
| Refrigerado Indirectamente | 30 |
| Refrigerado Directamente | 10 |
| Para 350 MVA | 8 |

$**$ $I_2$ Se expresa en porcentaje de la corriente nominal del estator.

En el caso de las fallas desequilibradas de corta duración la norma estipula unos requerimientos térmicos. El generador debe ser capaz de soportar, sin daños ese tipo de fallas. Los valores de requerimiento se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Capacidad de corriente de corto en el tiempo [17].

| **Tipo de refrigeración del rotor** | **Mínima capacidad del generador para soportar el corto en el tiempo expresada en $I_2$** |
|---|---|
| Refrigerado Indirectamente | 30 |
| Refrigerado indirectamente superior a los 800 MVA | 10 |
| 800 MVA A 1600MVA | 10-(0.00625)(MVA-800) |

En la tabla 2, el factor$\boldsymbol{t * I_2^2}$ es el producto del cuadrado de la corriente de secuencia negativa del generador, expresada en por unidad de la corriente del estator a los kVA asignados y duración de la falla en segundos.

La capacidad del generador ante una falla desequilibrada expresada en términos de $\boldsymbol{t * I_2^2}$ aplica para tiempos menores o iguales a 120s, basados en un incremento constante de almacenamiento de calor y disipación de calor insignificante.

Esos límites reconocen el efecto térmico de las fallas desequilibradas en los terminales de la máquina, incluyendo los siguientes efectos:

- La corriente de rotor, donde la protección causa la reducción de la corriente del rotor, tal como un interruptor del campo o su equivalente.

- La corriente de DC en el estator.

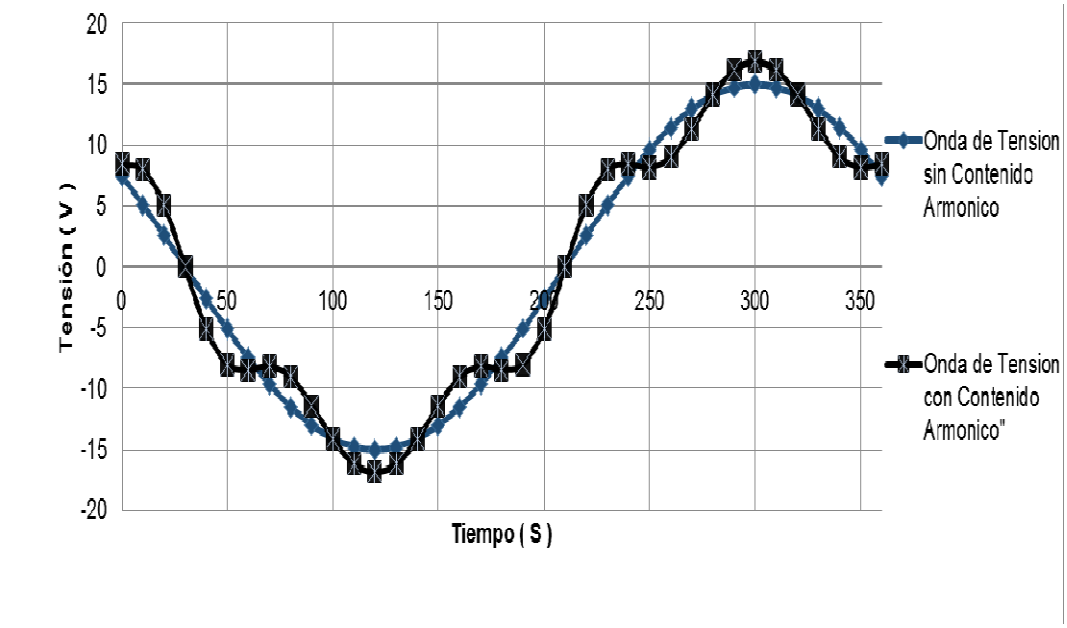
## 2.2 ARMÓNICOS

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, cuyas corrientes no tienen características sinoidales generando formas de ondas no simétricas ocasionando el fenómeno conocido como armónicos [19].

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y armónicas. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de las corrientes de los equipos y cargas de un sistema de potencia [20].

En la figura 1 se puede observar la forma de onda con contenido y sin contenido de armónicos

Figura 1. Forma de la onda con y sin contenido de armónico, con una frecuencia constante de 60Hz y una amplitud constante de 1pu [20].

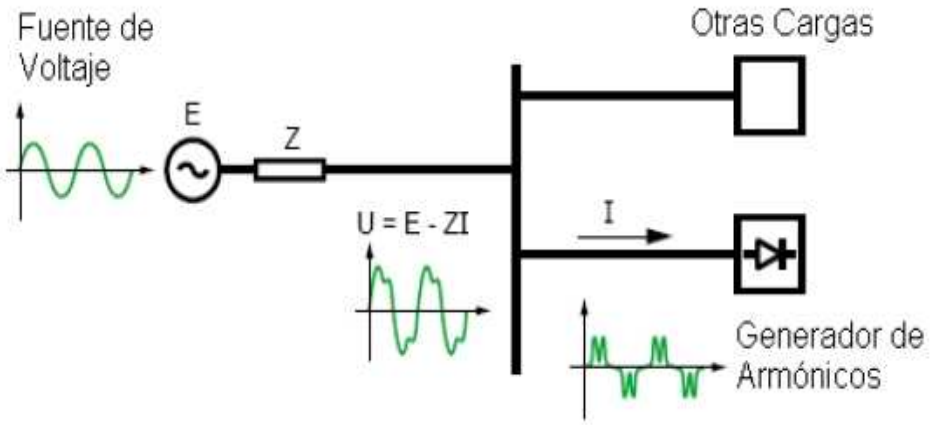


A diferencia de los fenómenos transitorios como el relámpago que dura unos pocos microsegundos, o los 'sags' de voltaje que duran unos pocos milisegundos a varios ciclos, los armónicos son fenómenos periódicos de estado estable que producen distorsión continúa de las formas de onda de voltaje y corriente. Estas formas de ondas periódicas no sinusoidales están definidas en función de sus armónicos, cuyas magnitudes y ángulos de fase son calculados usando el estudio de Fourier [21].

Las cargas no lineales ocasionan una forma de onda de corriente diferente a la del voltaje suministrado (vea figura 2). El valor de la impedancia de la fuente a diferentes frecuencias armónicas tiene un papel importante en limitar la distorsión de voltaje [22].

Se observa que en un sistema de potencia "rígido", donde la corriente de falla disponible es alta (impedancia del sistema baja), la distorsión del voltaje es usualmente pequeña y no presenta un problema en la calidad de potencia. Sin embargo, en un sistema débil, donde la impedancia del sistema es alta, la distorsión del voltaje puede ser alta y puede causar problemas [23].

Figura 2. Degradación del voltaje de la red causado por cargas no lineales [23].



### 2.2.1 Indicadores Esenciales de Distorsión Armónica [24]

La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente. Entre estos indicadores se tendrá en cuenta, la tasa de distorsión armónica.

#### 2.2.1.1 Tasas de Distorsión Armónica

La representación matemática de una señal eléctrica en el dominio del tiempo, se toma como una señal armónica, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia del armónico fundamental que opera a 60 Hz.

Si el voltaje y la corriente en la red están definidos por

$$v(t) = V\cos(w_0 * t) \qquad (2)$$

$$i(t) = I\cos(w_0 * t) \qquad (3)$$

*R*espectivamente, al presentarse armónicos de voltaje y corriente se representará de la siguiente manera

$$v(t) = V_1\cos(w_0 t + \theta_1) + V_2\cos(2w_0 t + \theta_2) + V_3\cos(3w_0 t + \theta_3) + \ldots \qquad (4)$$
$$I(t) = I_1\cos(w_0 t + \theta_1) + I_2\cos(2w_0 t + \theta_2) + I_3\cos(3w_0 t + \theta_3) + \ldots \qquad (5)$$

*Que expresada quedaría*

$$v(t) = \sum_{n=1}^{k} V_n\cos(nw_0 t + \theta_n) \qquad (6)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{k} I_n\cos(nw_0 t + \theta_n) \qquad (7)$$

*Donde*

| | |
|---|---|
| $V_n$ | *Armónico de voltaje de orden "n"* |
| $I_n$ | *Armónico de la corriente de orden "n"* |
| $\theta_n$ | *Angulo de armónico de orden "n"* |

#### 2.2.1.1.1 THD Corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global) [16]

La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alterna, El THD es un factor de medición de la distorsión de la señal que se aplica a la corriente y el voltaje.

Se define como el valor rms de los armónicos dividido por el valor rms del fundamental, y luego multiplicado por 100 % (vea ecuación 8).

El THD de corriente puede variar desde un pequeño porcentaje hasta más del 100%. De acuerdo a la recomendación de la norma [16] el THD de voltaje es usualmente menor que 5 %. Los THDs de voltaje por debajo del 5 % se consideran ampliamente aceptados, pero los valores por encima del 10 % son definitivamente inaceptables y causarán problemas para cargas y equipos sensibles haciendo el sistema ineficiente debido al aumento de las pérdidas.

Para una señal $y(t)$la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación [16]:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{H=2}^{\infty}(Y_h)^2}{(Y_1)^2} * 100\%} \qquad (8)$$

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en:

$$THD_V = \frac{\sqrt{(\sum_{H=2}^{\infty}(V_h)^2)}}{V_1} * 100 \qquad (9)$$

Cuando se trata con armónicos de intensidad, la expresión se convierte en

$$THD_I = \frac{\sqrt{(\sum_{H=2}^{\infty}(I_h)^2)}}{I_1} * 100 \qquad (10)$$

Para armónicas individuales

$$IHD_V = \frac{V_n}{V_1} * 100 \qquad (11)$$

*Donde*

| | |
|---|---|
| $THD$ | Distorsión armónica total de corriente |
| $Y_h$ | Valor individual de cada componente |
| $Y_1$ | Valor fundamental a 60 Hz |
| $THD_V$ | Distorsión armónica total de tensión |
| $V_h$ | Valor individual de cada componente de tensión |
| $V_1$ | Valor fundamental de tensiona 60 Hz. |
| $THD_I$ | Distorsión armónica total de corriente |
| $I_h$ | Valor individual de cada componente de corriente |
| $I_1$ | Valor fundamental a 60 Hz |

La tabla 3 muestra el factor de potencia real máximo teórico de una carga distorsionadora como una función del THD de corriente. La tabla asume el caso óptimo, es decir, donde el factor de potencia de desplazamiento es 1.0.

Tabla 3. Máximo factor de potencia real de una carga no lineal.

| THD de Corriente | Máximo Factor de Potencia Real |
|---|---|
| 20% | 0.98 |
| 50% | 0.89 |
| 100% | 0.71 |

#### 2.2.1.1.2 TIF (Factor de Interferencia Telefónica) [24]

En transmisión de potencia, dependiendo de la magnitud de los armónicos de corriente o voltaje pueden, causar interferencia en las líneas telefónicas vecinas. Para mantener esta interferencia dentro de límites aceptables, los generadores deben tener una forma de onda de voltaje en vacío más sinusoidal posible. Esto es, con un bajo contenido de armónicos. Para evaluar este contenido de armónicos en la onda de tensión se define el TIF [36].

Por definición el TIF es

$$TIF = {}^{Etif}/_{E_{rms}} \qquad (12)$$

$$Etif = \sqrt{((T_1E_1)^2 + (T_2E_2)^2 + \cdots + (T_VE_V)^2)} \qquad (13)$$

Es el valor rms de la onda de voltaje afectada por los factores de peso $T_V$ Dónde.

| | |
|---|---|
| $T_V$ | Factor de peso del TIF para el v- iesimo armónico ver Tabla 4 |
| $E_V$ | Valor rms del viésimo armónico de la componente de voltaje, en las mismas unidades que el Etif |
| $E_{rms}$ | Valor rms de una onda de voltaje |

Tabla 4. Factores de peso para el TIF, en los primeros armónicos [16].

| Armónico | Frecuencia | Factor |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 0.5 |
| 3 | 180 | 30 |
| 5 | 300 | 225 |
| 7 | 420 | 650 |
| 9 | 540 | 1320 |
| 11 | 660 | 2260 |

#### 2.2.1.1.3 TIF Balanceado (Factor de Interferencia Telefónica Balanceado) [16]

El TIF del generador, no podrá superar los valores mostrados en la tabla 5

Tabla 5. Factores de peso para el TIF balanceado.

| Clasificación del Generador en Kva | TIF Balanceado |
|---|---|
| 10000 a 19000 | 100 |
| 20000 a 99999 | 70 |
| 100000 y Superiores | 40 |

#### 2.2.1.1.4 TIF Residual [16]

El TIF componente residual del generador, no puede superar los valores mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Factores de peso para el TIF residual.

| Clasificación del Generador en Kva | TIF Residual |
|---|---|
| 10000 a 19000 | 100 |
| 20000 a 99999 | 50 |
| 100000 y Superiores | 30 |

# 3 REALIZACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO EN ELEMENTOS FINITOS

En este capítulo utilizando el Método de Elementos Finitos se presenta la construcción y validación del modelo en estado estable y transitorio, para el turbogenerador de 28KVA del Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas de la Universidad del Valle. Con esto poder garantizar el método de modelamiento adecuado para el fin propuesto.

## 3.1 DATOS TOMADOS DEL TURBOGENERADOR [25]

### 3.1.1 Datos de Placa

Tabla7. Datos de placa del turbogenerador.

| P (Kva) | 28 |
|---|---|
| v | 220 |
| Ia (A) | 70 |
| Fp | 0.9 |
| F (Hz) | 60 |
| Iexc (A) | 16 |
| v (rpm) | 1800 |
| m | 3 |

### 3.1.2 Medición de la Resistencia de los Devanados

En la tabla 8 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia óhmica del devanado de excitación realizada de acuerdo a norma [26] [30]:

Tabla8. Medida de las resistencias óhmica de armadura y campo.

| Devanado | A1X2 ( Ω) | B1Y2 ( Ω) | C1Z2 ( Ω) | F1F2 ( Ω) |
|---|---|---|---|---|
| Resistencia (25,5 ℃) | 0,235 | 0,300 | 0,240 | 4,400 |
| Resistencia (75℃) | 0,280 | 0,375 | 0,286 | 5,238 |

### 3.1.3 Medición de la Resistencia de Aislamiento

En la tabla 9 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia de aislamiento realizada de acuerdo a la norma [26] [30]**,** la medición se hizo con el megóhmetro en un rango de 500V.

Tabla 9. Medida de las resistencias de aislamiento de armadura y campo.

| Devanado | A1X2 ( MΩ) | B1Y2 ( MΩ) | C1Z2 (MΩ) | F1F2 ( MΩ) |
|---|---|---|---|---|
| Resistencia (25,5 ℃) | 1084,400 | 874,520 | 891,320 | 31,660 |

## 3.2 CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DEL TURBOGENERADOR EN MEF

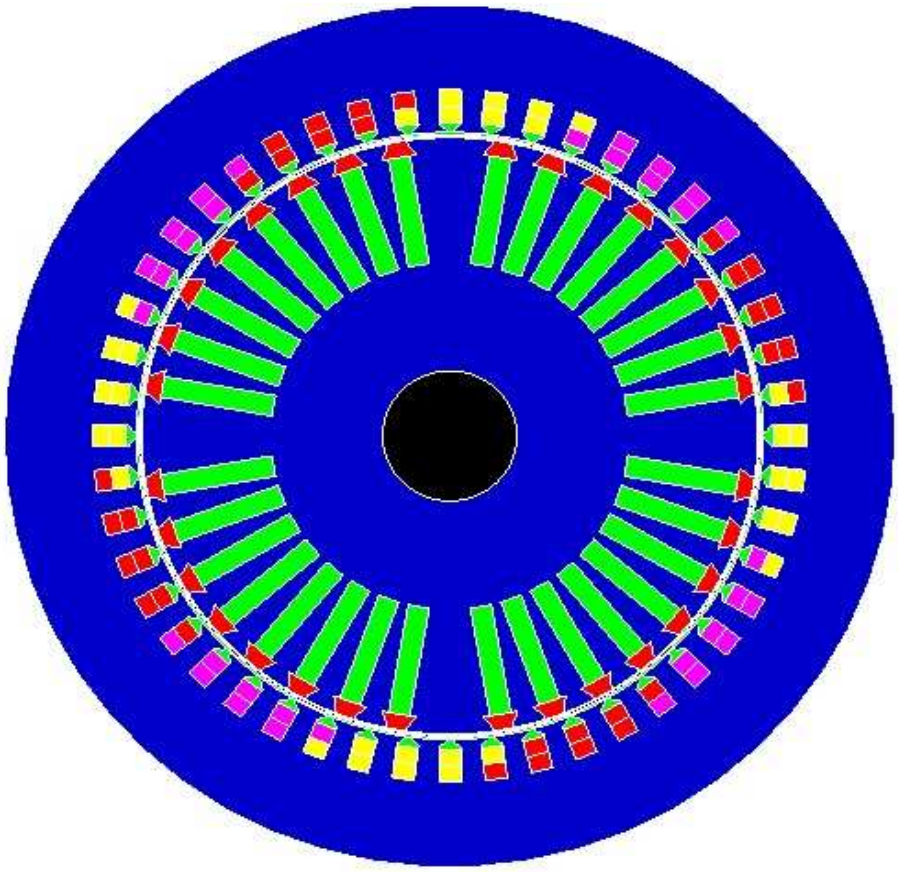
El modelo se elaboró con el software licenciado de simulación **FLUX 2D®** [27], con los datos de construcción dados en [25] y mediante pruebas realizadas al turbogenerador, se procede a realizar la construcción de la geometría y mallado.

### 3.2.1 Construcción de la Geometría y Mallado MEF

Antes de realizar cualquier tipo de construcción o simulación es preciso que se conozca el fenómeno a fondo, de tal manera que se puedan predecir en cierto grado los resultados y lo que está pasando durante cada periodo de la simulación para poderlo comparar con la realidad física, y determinar si es factible seguir con el modelo MEF realizado, ya sea para modificarlo o abortarlo.

Con los datos medidos en el turbogenerador se construye el modelo en “geometry” de Flux2d [27] como se observa en la (Fig.3), el ajuste del modelo requiere de un proceso iterativo por ende algunas simulaciones requieren de tiempos de cómputo largos.

Figura3. Geometría del turbogenerador en 2d.

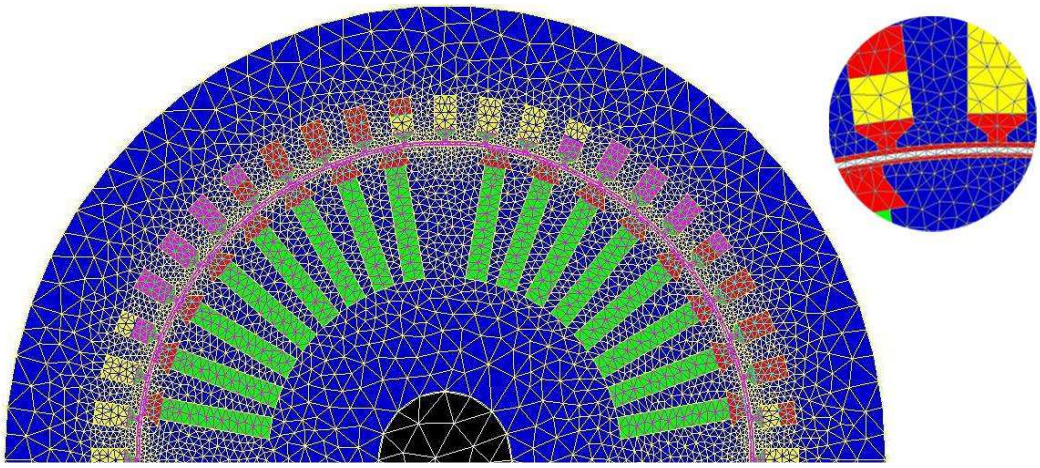


A continuación se hace el mallado del modelo como se muestra en la figura 4 para el cual el programa utiliza elementos tipo triángulo en la geometría. La construcción de este mallado será óptimo si la geometría de los elementos se aproxima más a un triángulo equilátero, para lo cual se refina el mallado, hasta obtener el menor número de nodos.

Entre menor sea el número de nodos el proceso iterativo del programa será más rápido, pero este puede no llegar a converger, aunque esto no quiere decir que se deba aumentar el número de elementos considerablemente, puesto que al tener una gran cantidad de elementos, aumentará el tiempo de simulación, cuyos resultados se podrán obtener con un número menor de elementos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que al disminuir los elementos se puede llegar a un punto en el cual estos se deforman (elementos diferentes de triangulo rectángulo) ocasionando la divergencia, por eso lo ideal será encontrar una relación óptima entre precisión y tiempo.

Así mismo se crea una banda de rodamiento con un espesor de 1/3 del ancho del entrehierro, con número de elementos múltiplo de entero del paso de ranura del estator y el rotor en movimiento.

Figura4. Mallado del turbogenerador.



El mallado elaborado (ver figura 4) después de múltiples ajustes para optimizar tiempo y resultados arrojó los siguientes datos:

Los datos arrojados por el software para el mallado son:

| | |
|---|---|
| No. de elementos excelentes: | 88.32 % |
| No. de elementos buenos: | 11.13 % |
| No. de elementos pobres: | 0.0 % |
| No. de elementos malos: | 0.0 % |
| No. total de nodos: | 37493 |

### 3.2.2 Asignación de Materiales

Es común encontrarse con máquinas a las cuales no se les conoce su curva de magnetización, por eso se procede a usar las recomendadas dadas por [31] y modificar los parámetros de estado estable y transitorio. Las curvas de magnetización del rotor y estator se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente.

Figura 5. Curva de magnetización para el rotor.

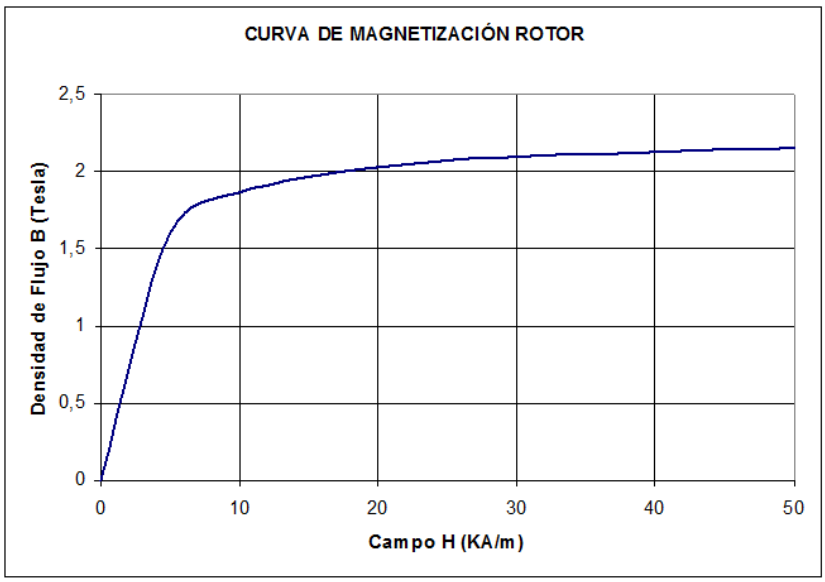
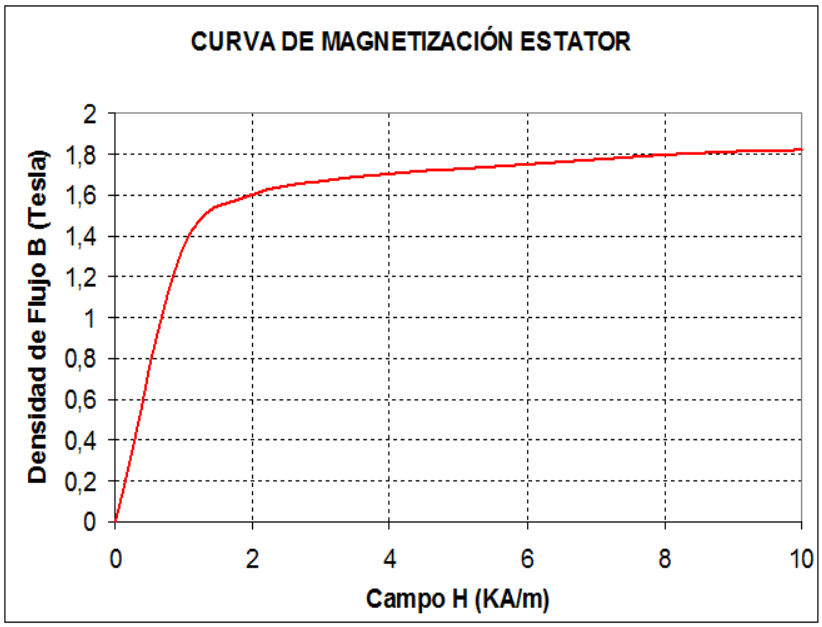


Figura6. Curva de magnetización para el estator.




Al realizar la simulación, no se tienen en cuenta las reactancias de dispersión de cabezas de bobina de los devanados de: armadura, amortiguador y excitación por lo que se deben calcular.

De acuerdo con [30] la inductancia de dispersión de cabeza de bobina de un devanado de una capa en el estator se calcula Con (14) y (15)

$$L_{\sigma fron} = 2\mu_0 \frac{lw^2}{pq} \quad (q\lambda_{0from}\frac{\lambda_{from}}{l}) \quad (14)$$

*Dónde:*

| | |
|---|---|
| $L_{\sigma fron}$ | *Inductancia cabezas de bobina* |
| $f$ | *Frecuencia* |
| $\mu_0$ | *Permeabilidad del aire* |
| $w^2$ | *Número de espiras en serie por fase* |
| $p$ | *Número de polos* |
| $q$ | *Número de ranuras por polo y por fase* |

$l$ *Longitud axial del acero de la máquina*

$$L_{from} * \lambda_{from} = 0{,}71 l_{from} - 0{,}43t) \qquad (15)$$

*Donde*

$L_{from}$ *Longitud de las cabezas de bobina*

$t$ *Paso polar*

Lo que da un valor inicial de simulación de $L_{\sigma.from} = 1.96X10^{-3}$ H.

La inductancia de dispersión del devanado del rotor se puede calcular con las ecuaciones (16) y (17).

$$L_{\sigma.fromr} = 2\pi f \mu_0 \frac{{w_r}^2}{p}\left(Z_r \frac{\lambda_{from.r} l_{from.r}}{l_r}\right) \qquad (16)$$

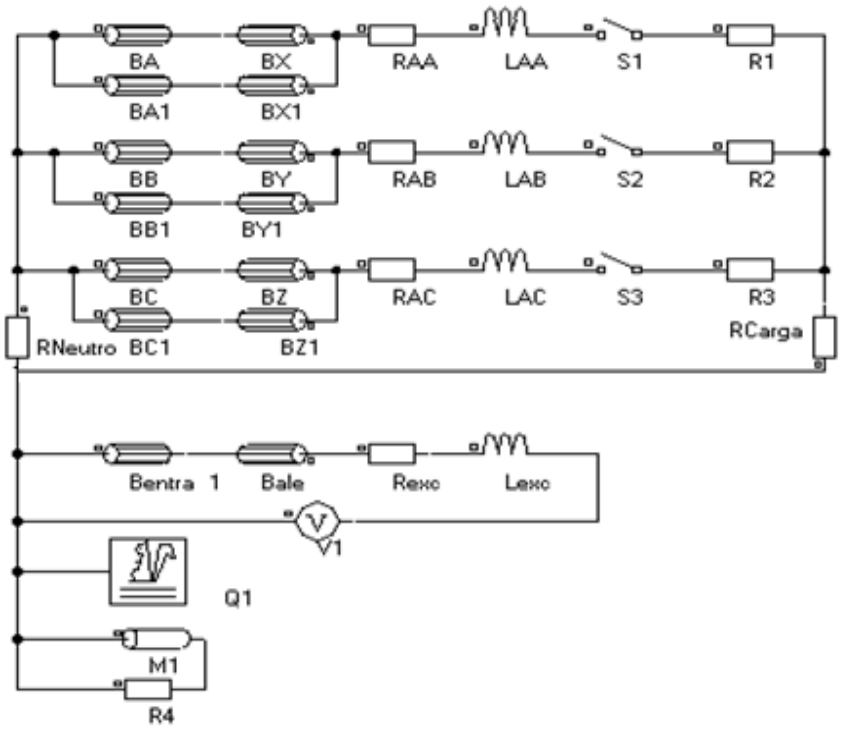
$$\lambda_{fromr} l_{fromr} = 0.67 l_{from.r} - 0.43 t_r \qquad (17)$$

Para el caso del devanado amortiguador [32] recomienda usar un valor inicial para cada barra de $1X10^{-4}\ H$.

### 3.2.3 Asignación del Circuito

El circuito utilizado para el estudio en estado estable y transitorio es el presentado en la figura 7. Para la realización de las simulaciones en vacío y corto circuito brusco, se emplea una fuente de voltaje en la excitación y se agrega un conductor sólido en el eje (M1) para poder conocer el voltaje inducido en él. Las resistencias R1, R2 y R3 tienen valores de $1X10^{8}\Omega$ en la simulación en vacío, luego se cambian a $1X10^{-5}\Omega$en la simulación de cortocircuito brusco.

Figura7. Circuito asignado para pruebas de vacío y cortocircuito.




Dónde:

| | |
|---|---|
| BA,BX,BA1,BX1 | Lados de bobina entrante y saliente de la fase A |
| BB,BY,BB1,BY1 | Lados de bobina entrante y saliente de la fase B |
| BC,BZ,BC1,BZ1 | Lados de bobina entrante y saliente de la fase C |
| RAA,RAB, RAC | Resistencia por fase |
| LAA, LAB, LAC | Inductancia de dispersión de cabezas de bobina del estator |

| | |
|---|---|
| R1, R2, R3 | Resistencia infinitamente pequeña que representa la máquina durante el cortocircuito |
| Rcarga | Resistencia que representa la máquina durante situaciones bajo carga |
| RNeutro | Resistencia del neutro a tierra |
| S1,S2,S3 | Interruptores (abiertos tienen la máquina en vacío y cerrados en cortocircuito) |
| Bentra y Bsale | Lados entrante y saliente del devanado de excitación. |
| Lexo | Inductancia de dispersión de cabezas de bobina devanado de excitación |
| Q1 | Devanado amortiguador |
| M1 | Eje |

## 3.3 CURVA DE VACÍO [26, 28, 29]

### 3.3.1 Generalidades de la Prueba [30]

La característica en vacío de un generador sincrónico es la relación entre la F.e.m. y la corriente de excitación en vacío, siendo constante la velocidad, y por tanto, la frecuencia. Al principio, crece en línea recta, para luego, al aumentar la densidad de flujo sobre todo en los núcleos y dientes. Luego sigue en forma de codo o menos pronunciada y vuelve, finalmente, a una línea recta aproximadamente, muy poco inclinada con respecto a la horizontal. La cual resulta decisiva para determinar las condiciones de servicio de la máquina y se puede obtener por cálculo o por pruebas a la máquina. La mayoría de las máquinas nuevas coinciden bastante en cuanto a las inducciones de las partes fundamentales, y sus características en vacío no difieren mucho entre sí, razón por la cual, para el estudio general de las máquinas, se puede tomar como base una misma característica.

Para esta prueba, con el devanado de armadura en circuito abierto (que en el caso de la simulación es una resistencia por fase de $1X10^8\Omega$), se toman

Lecturas de voltaje en los terminales de armadura, corriente de campo y velocidad, para la siguiente distribución de valores:

- Seis lecturas menores al 60% del voltaje asignado (1 a cero de excitación).
- Desde el 60% al 110% se tomaron 10 medidas (cada 5%), dado que esta es una zona crítica.

- Cerca del 110% se tomaron en dos puntos incluyendo un punto aproximadamente al 120% de la corriente de excitación.

La reactancia de eje directo se obtiene de la expresión (18)

$$X_d = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{BC}} = \frac{i_{fk}}{I_{fg}} \qquad (18)$$

Donde

| | |
|---|---|
| $X_d$ | Reactancia de eje directo |
| $U_n$ | Tensión nominal |
| $I_{BC}$ | Corriente |
| $i_{fk}$ | Corriente nominal del inducido |
| $I_{fg}$ | Corriente de excitación |

### 3.3.2 Simulación

De acuerdo con [33] para la realización de la curva de vacío, el tiempo de inicialización o salto de transitorio converge rápidamente, pero en casos como el cortocircuito sostenido la simulación se puede tornar compleja, habiendo casos en donde no convergió o donde el tiempo de simulación sea demasiado largo. Por ello para obtener los resultados del cortocircuito sostenido es preferible establecer el cortocircuito brusco.

Utilizando el módulo ‘Batch’ del software Flux 2d, se hace la simulación con al menos 3 periodos para observar que el voltaje inducido en el devanado de armadura es estable.

Para menor tiempo de simulación se toma una precisión de $1*10^{-2}$ y un máximo de 30 iteraciones, cuando se llegue al caso final, se utiliza una precisión de $1*10^{-4}$ con un máximo de 50 iteraciones que es el recomendado por “Cedrat” y muchos expertos en el tema.

## 3.4 CURVA DE CORTOCIRCUITO SOSTENIDO A PARTIR DE LA CURVA DE CORTOCIRCUITO BRUSCO [26, 28, 29]

La prueba de cortocircuito sostenido, se obtendrá de la prueba de cortocircuito brusco, por el cual los valores a registrar se obtendrán en el estado estable del corto.

La prueba consiste en colocar en cortocircuito el devanado de armadura, cuando la máquina opera al voltaje de vacío deseado, mientras opera a velocidad asignada.

El valor de la corriente de excitación debe estar alrededor del doble de un p.ude corriente de campo sin carga.

Los contactos de fase deben cerrar con 15 grados de diferencia entre sí. Para obtener valores correspondientes al estado saturado de la máquina, la prueba se hace a voltaje asignado de la máquina antes de cortocircuitar el devanado de armadura. Si la prueba de cortocircuito brusco no puede hacerse a voltaje asignado, es recomendable que la prueba debe realizarse a varios voltajes de armadura (0.3, 0.5 y 0.7 del voltaje asignado) y las cantidades determinados para cada prueba. Los resultados se registran sobre una curva en función de la tensión con circuito abierto antes de poner en cortocircuito la máquina, y las magnitudes se encuentran por el método de extrapolación.

Para determinar las cantidades de la máquina, se toman las curvas de la corriente de armadura en cada fase y de la corriente de excitación.

### 3.4.1 Simulación

Se utiliza en módulo ‘Batch’ del software [27], y el cortocircuito se hace a los 99,028s de manera que se garantice el cruce por cero de la fase A, para este caso, dado el estado transitorio y subtransitorio se hace una simulación de 350 pasos a 0,001s para lograr obtener tres periodos de estado estacionario lo que permite la realización de la curva de cortocircuito sostenido a partir de la prueba de cortocircuito brusco.

## 3.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VACÍO Y CORTOCIRCUITO SOSTENIDO A PARTIR DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO BRUSCO

En la tablas 10 y 11 se presentan los resultados de las pruebas de vacío y cortocircuito sostenido a partir de la prueba de cortocircuito brusco validando los resultados logrados en la simulación con los valores obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio.

Tabla10. Valores simulados y reales obtenidos para la prueba de vacío.

| Característica en PU de la prueba en vacío real y simulada | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| %*100 U línea teórica | Iexc Pu | Va (pu) Real | Va (pu) Simulada | Vb(pu) Real | Vb (pu) Simulada | Vc (pu) Real | Vc (pu) Simulada | Vpro (pu) Real | Vpro (pu) Simulada | Rpm Real | Rpm Simulada |
| **1,2** | 1,53 | 1,20 | 1,22 | 1,20 | 1,21 | 1,20 | 1,22 | 1,20 | 1,22 | 1800,10 | 1800,00 |
| **1,15** | 1,39 | 1,16 | 1,16 | 1,16 | 1,15 | 1,15 | 1,17 | 1,15 | 1,16 | 1800,00 | 1800,00 |
| **1,1** | 1,24 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,09 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1800,50 | 1800,00 |
| **1,05** | 1,11 | 1,05 | 1,04 | 1,05 | 1,03 | 1,05 | 1,04 | 1,05 | 1,04 | 1800,50 | 1800,00 |
| **1** | 1,00 | 1,00 | 0,98 | 1,00 | 0,97 | 1,00 | 0,98 | 1,00 | 0,98 | 1800,50 | 1800,00 |
| **0,95** | 0,93 | 0,95 | 0,93 | 0,95 | 0,93 | 0,95 | 0,94 | 0,95 | 0,93 | 1800,40 | 1800,00 |
| **0,9** | 0,87 | 0,91 | 0,89 | 0,91 | 0,88 | 0,91 | 0,89 | 0,91 | 0,89 | 1800,00 | 1800,00 |
| **0,85** | 0,80 | 0,85 | 0,84 | 0,85 | 0,83 | 0,85 | 0,84 | 0,85 | 0,84 | 1800,50 | 1800,00 |
| **0,8** | 0,75 | 0,81 | 0,79 | 0,81 | 0,78 | 0,80 | 0,79 | 0,81 | 0,79 | 1800,70 | 1800,00 |
| **0,75** | 0,73 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 1800,40 | 1800,00 |
| **0,7** | 0,64 | 0,69 | 0,68 | 0,69 | 0,68 | 0,69 | 0,68 | 0,69 | 0,68 | 1800,60 | 1800,00 |
| **0,65** | 0,60 | 0,65 | 0,64 | 0,65 | 0,63 | 0,65 | 0,64 | 0,65 | 0,64 | 1800,30 | 1800,00 |
| **0,6** | 0,55 | 0,60 | 0,59 | 0,60 | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 0,59 | 0,58 | 1800,90 | 1800,00 |
| **0,48** | 0,50 | 0,49 | 0,54 | 0,49 | 0,53 | 0,48 | 0,54 | 0,49 | 0,53 | 1800,10 | 1800,00 |
| **0,36** | 0,34 | 0,36 | 0,37 | 0,36 | 0,37 | 0,36 | 0,37 | 0,36 | 0,37 | 1801,70 | 1800,00 |
| **0,24** | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,24 | 0,25 | 0,24 | 0,26 | 0,24 | 0,26 | 1800,40 | 1800,00 |
| **0,12** | 0,11 | 0,14 | 0,16 | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 1800,70 | 1800,00 |
| **0** | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 1800,70 | 1800,00 |

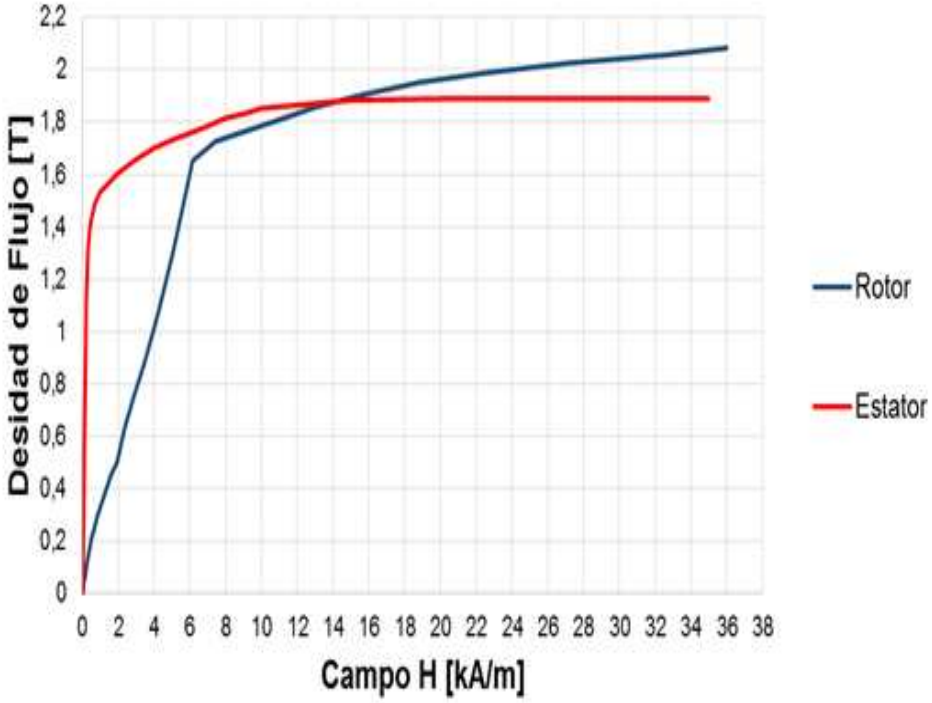
Tabla11. Valores simulados y reales obtenidos para la prueba de cortocircuito.

| Característica en PU de la prueba en corto sostenido real y simulada | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| %*100 línea teórica | Iexc (pu) simulada | Ia (pu) Real | Ia (pu) simulada | Ib (pu) Real | Ib (pu) simulada | Ic (pu) Real | Ic (pu) simulada | Ipro (pu) Real | Ipro (pu) simulada |
| 1,25 | 8,87 | 1,22 | 1,22 | 1,24 | 1,22 | 1,27 | 1,23 | 1,25 | 1,23 |
| 1,00 | 7,15 | 1,01 | 0,99 | 1,01 | 0,99 | 1,01 | 1,00 | 1,01 | 0,99 |
| 0,75 | 5,10 | 0,74 | 0,71 | 0,74 | 0,71 | 0,75 | 0,71 | 0,74 | 0,71 |
| 0,50 | 3,20 | 0,48 | 0,44 | 0,49 | 0,45 | 0,49 | 0,45 | 0,49 | 0,45 |
| 0,25 | 1,60 | 0,26 | 0,22 | 0,25 | 0,22 | 0,26 | 0,22 | 0,26 | 0,22 |
| 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 |

### 3.5.1 Curvas de magnetización del rotor y estator

En la figura 8 se muestran las curvas de magnetización para el rotor y estator finales adaptadas al modelo. Se hizo necesario modificar las curvas dadas de manera predeterminada por flux, para poder comparar las curvas de vacío y cortocircuito real y simulado lo que nos permitió validar el modelo.

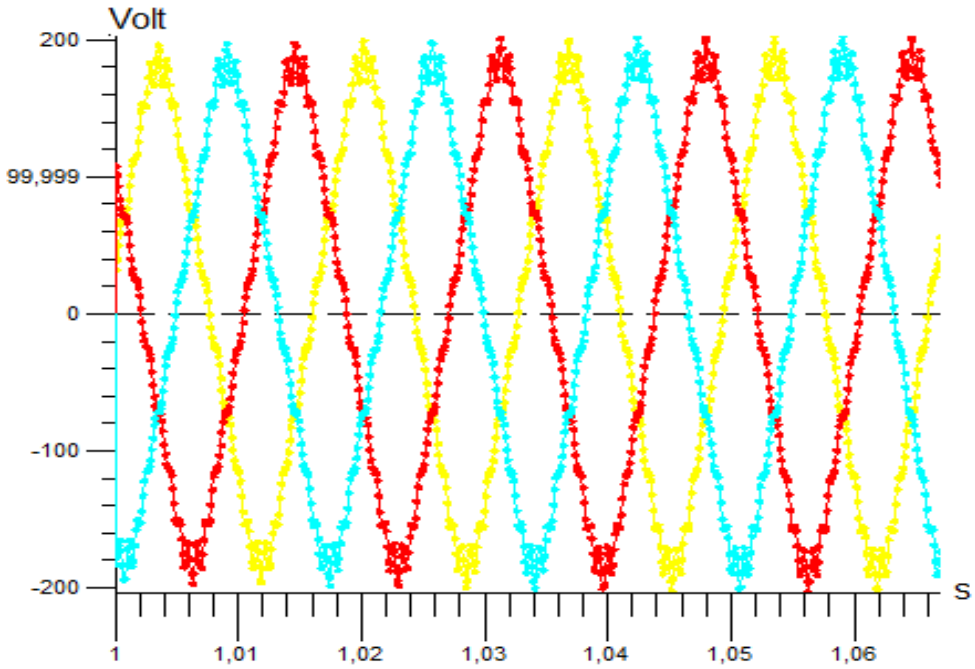
Figura8. Curvas de magnetización del rotor y estator del modelo.




### 3.5.2 Curvas de tensión de fase en vacío simuladas

En la figura 9 se muestran las curvas de tensión de fase simuladas para condiciones de vacío, en las que se puede apreciar la igualdad de magnitud entre las fases y el desfase de 120°.

Figura9. Onda de tensión simulada en las fases A, B y C para el voltaje asignado de la máquina.

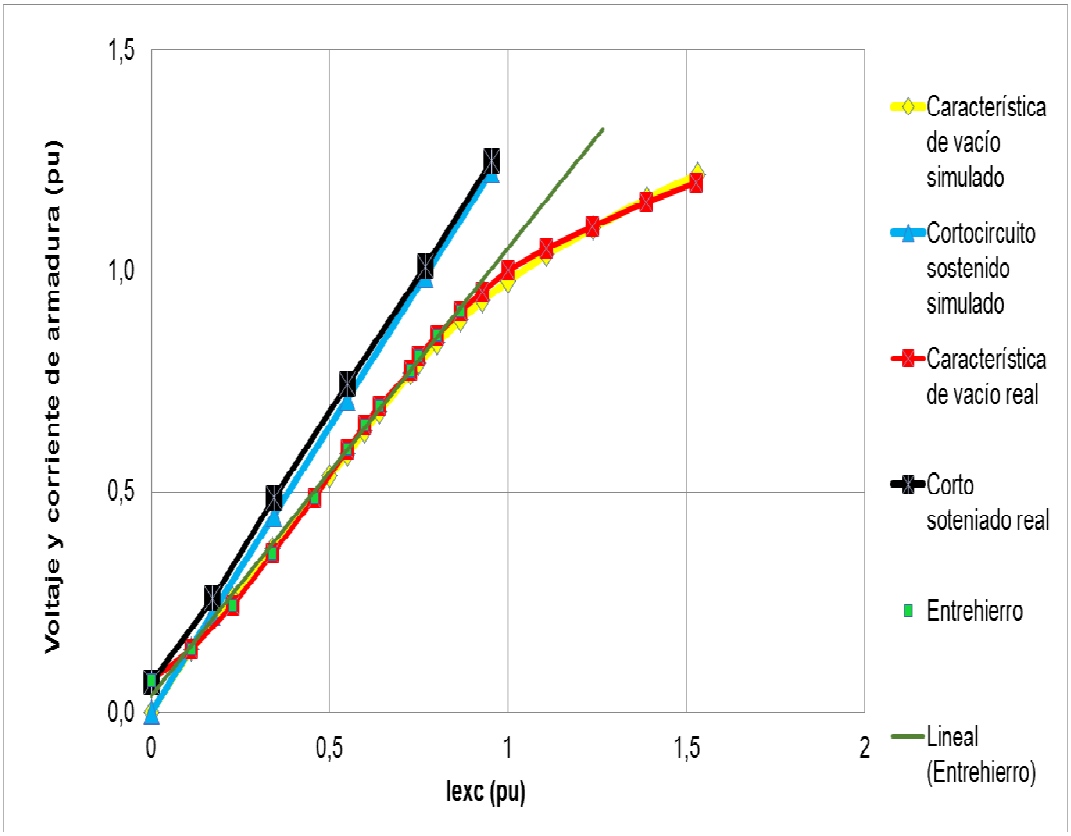



## 3.6 Validación característica vacío y cortocircuito real y simulada

En la figura 10 se muestra la característica de vacío y cortocircuito real y simulada realizada en los apartados 3.3 y 3.4, esto con el fin de comparar las dos características y poder validar el modelo que se realizó en el software flux 2d.

Figura 10. Característica vacío y cortocircuito sostenido, real y simulada.

.




Empleando la ecuación (18), $X_d$ simulada es,

$$X_{ds} = \frac{i_{fk}}{I_{fg}} = \frac{7{,}221}{8{,}798} = 0{,}821\ pu \qquad (19)$$

| | |
|---|---|
| $X_d$ | Reactancia de eje directo |
| $i_{fk}$ | Corriente de excitación resultado de un Pu de corriente del estator. |
| $I_{fg}$ | Corriente de excitación resultado de un Pu de la tensión nominal. |

$X_d$Real resulta,

$$X_{dR} = \frac{i_{fk}}{I_{fg}} = \frac{7{,}048}{8{,}835} = 0{,}797\ pu \qquad (20)$$

Como resultado se da un error total de 3,01% entre el valor simulado y el valor real, se considera una buena aproximación cuando el error es menor al 5%.
Dadas la coincidencia en las curvas de las características en vacío y cortocircuito simuladas con las realizadas en sitio y habiendo obtenido un error de reactancia de eje directo del 3,01%, se puede validar el satisfactoriamente el modelo realizado en Flux 2d [27].

## *3.7 CÁLCULO DEL TIF*

La IEEE Std. 115 de 1995 [26], define al factor de influencia telefónica o TIF (Telephone Intereference Factor), como un elemento que cuantifica la calidad de la onda de F.e.m, y con esto se analiza tanto la forma sinusoidal como la presencia de armónicos en la misma.

### 3.7.1 Cálculo Magnético del Entrehierro [33]:

$$\alpha = 0{,}9938m \qquad (21)$$

$$\varepsilon = 0{,}0979 \qquad (22)$$

$$\gamma = \frac{\delta_{max}}{\delta_{mini}} = 1{,}8479 \qquad (23)$$

Donde

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | Arco polar relativo |
| $\varepsilon$ | Entrehierro relativo en el eje del polo |
| $\gamma$ | Entrehierro relativo bajo el borde del polo |

De acuerdo

$$K_f = K_{f'} + K_{f''} \qquad (24)$$
$$K_{fv} = K_{fv'} + K_{fv''} \qquad (25)$$

Donde

$K_f$ Coeficiente de armónicos de la onda de inducción en el entrehierro

Tabla12. Coeficientes armónicos de la onda de inducción en el entrehierro de la máquina.

| Armónicos | K'f | K''f | Kf |
|---|---|---|---|
| 1 | 1,1 | -0,005412 | 1,0945 |
| 3 | -0,08 | -0,01623 | -0,09623 |
| 5 | 0,02 | 0,03246 | 0,05246 |

El TIF (Telephone Interference Factor) es una medida de la calidad de la onda, esta medida está definida por fase como:

$$TIF = \frac{E_{tifrms}}{E_{rms}} \qquad (26)$$

Donde

$E_{tifrms}$ Valor rms del armónico de la componente de voltaje, en las mismas unidades que el Etif

$E_{rms}$ Valor rms de una onda de voltaje

Los coeficientes de campo de excitación están definidos para el v-ésimo armónico como:

$$Kfv = \frac{B_{mv}}{B_m} \qquad (27)$$

Donde

| | |
|---|---|
| $Kfv$ | Coeficientes de campo de excitación |
| $B_{mv}$ | Amplitud del viésimo armónico del campo de excitación del entrehierro |

Para el V-ésimo armónico de F.e.m:

$$E_v = 2 * \sqrt{2} * \tau_v * l * K_{dev-v} * f_v * K_{fv} * B_m * w \quad (28)$$

Donde

| | |
|---|---|
| $\tau_v$ | Paso polar |
| $l$ | Longitud del entrehierro |
| $K_{dev-v}$ | Factor de devanado del viésimo armónico |
| $f_v$ | Frecuencia del viésimo armónico |
| $K_{fv}$ | Coeficiente de longitud axial del entrehierro |
| $B_m$ | Amplitud del armónico del campo de excitación del entrehierro |
| $w$ | Frecuencia angular |

De acuerdo a los valores de $K_{dis}$ y $K_{red}$ determinamos $K_{dev}$ con $Kv = \frac{K_{dev-v}}{K_{dev-1}}$se obtienen los coeficientes relativos del devanado para el armónico fundamental y los armónicos de tercer y quinto orden. La relación entre la amplitud de los armónicos superiores de inducción con la amplitud de la onda fundamental del inducido es:

Donde

| | |
|---|---|
| $K_{dis}$ | Factor de distribución |
| $K_{red}$ | Factor de reducción |
| $K_{dev}$ | Factor de devanado |

$$K_{Bv} = \frac{B_{mv}}{B_{m1}} = \frac{K_{fv}}{K_{f1}} \quad (29)$$

Tabla 13. Factores para diferentes armónicos.

| Armónicos | Kdis | Kred | Kdev | Kv | KBv |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,9566 | 0,9657 | 0,9237 | 1 | 0,055 |
| 3 | -0,238 | -0,7059 | 0,168 | 0,1818 | -0,0879 |
| 5 | 0,1447 | 0,2562 | 0,037 | 0,0401 | 0,0479 |

Como se tiene el factor de devanado y las relaciones de los armónicos de densidad de flujo, se puede expresar que

$$E_v = E_1 * \frac{K_{dev.v}}{K_{dev.1}} * \frac{B_{m.v}}{B_{m.1}} = E_1 * K_v * K_{B.v} \quad (30)$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (37) tenemos.

$$E_{rms} = \sqrt{E_1^2 + (E_1 * K_3 * K_{B.3})^2 + (E_1 * K_5 * K_{B.5})^2} \quad (31)$$

Resolviendo.

$$E_1 = \frac{E_{rms}}{\sqrt{1 + (K_3 * K_{B.3})^2 + (K_5 * K_{B.5})^2}} \quad (32)$$

$$E_1 = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{\sqrt{1 + (0{,}1818 * (-0{,}08792))^2 + (0{,}0401 * 0{,}04793)^2}} \quad (33)$$

$$E_1 = 127{,}001\, V$$

Ahora reemplazamos en la ecuación (34) para el tercer y quinto armónico.

$$E_3 = E_1 * K_3 * K_{B3} \quad (34)$$

$$E_5 = E_1 * K_5 * K_{B5} \quad (35)$$

$$E_3 = -2.0299 \quad (36)$$

$$E_5 = 0.2440 \quad (37)$$

Luego

$$E_{rms} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2} \quad (38)$$

$$E_{rms} = 126.98\,V \quad (39)$$

### 3.7.2 TIF Balanceado:

Para este cálculo se excluyen los armónicos de orden tercero y sus múltiplos, se hallan los factores de peso $W_{fn}$ tomado de la tabla 4:

$$w_{f1} = 0.5 \quad (40)$$
$$w_{f5} = 225 \quad (41)$$

Donde

$W_{fn}$ Factores de peso

Entonces de acuerdo a la siguiente expresión:

$$TIF_{balanceado} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=1}(W_{fn} * E_n)\right)^2}}{E_{RMS}} \quad (42)$$

$$TIF_{Balanceado} = \frac{\sqrt{(0{,}5 * 127{,}001)^2 + (225 * 0{,}2440)^2}}{126{,}98} = 0{,}6610 \quad (43)$$

Cumpliendo con los valores mostrados en la tabla 5

### 3.7.3 TIF Residual:

Se incluye el tercer armónico:

$$TIF_{residual} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=1}(W_{fn} * E_n)\right)^2}}{E_{RMS}} \quad (44)$$

$$TIF_{residual} = \frac{\sqrt{(0{,}5 * 127{,}001)^2 + (30 * -2{,}0299)^2 + (225 * 0{,}2440)^2}}{126{,}98} \quad (45)$$

$$TIF_{residual} = 0.8167 \quad (46)$$

Cumpliendo con los valores mostrados en la tabla 6

### 3.7.4 TIF Total:

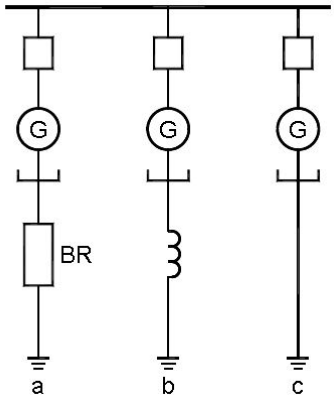
$$TIF_{total} = \sqrt{TIF_{balanceado}{}^2 + TIF_{residual}{}^2} = 1.0506 \quad (47)$$

El nivel de distorsión es de 1,0506 % cumpliendo con los rangos que establece [16], en donde los valores máximos aceptados de TIF balanceado y residual para generadores sincrónicos de más de 20kVA de potencia, no deben exceder 70% y 50% respectivamente.

## 3.8 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [34].

De acuerdo con [34] la configuración de puesta a tierra que se aproxima a la utilizada en el turbogenerador bajo este estudio se muestra en la figura 11 la cual posee una puesta a tierra de baja resistencia.

Figura 11. Puesta a tierra de baja resistencia.




La principal ventaja de la puesta a tierra de baja resistencia, es la capacidad de la resistencia del neutro de limitar la corriente de falla a tierra a un valor moderado, sin exceder 2.5 veces la tensión de línea a tierra. Las sobretensiones transitorias son menores para el funcionamiento de una

puesta a tierra de baja resistencia comparado con la puesta a tierra de alta resistencia mediante un transformador de distribución. La principal desventaja es el costo de la resistencia a tierra.

### 3.8.1 Método de Cálculo:

La resistencia de puesta a tierra debe limitar la corriente de falla a tierra en un rango entre los 200 y600A. La corriente de falla se selecciona para minimizar el daño de la falla, pero al mismo tiempo permite el paso corriente para el disparo selectivo de los dispositivos de protección.

El valor en Ohm de la resistencia de puesta a tierra se determina por la ecuación (48)

$$R_n = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3} * I_R}[\Omega](48)$$

Dónde:

| | |
|---|---|
| $E_{L-L}$ | Es la tensión línea a línea de operación del generador. |
| $I_R$ | Es la corriente de falla a tierra que limita la resistencia que se encuentra entre 200 a 600A. |

Entonces para la validación del modelo se calcula la resistencia de puesta a tierra, de la siguiente manera y suponiendo de $I_R$ una corriente de 400A cuyo valor es típico dado por norma.

$$R_n = \frac{220V}{\sqrt{3} * 400A} = 317.542E^{-3}\Omega \quad (49)$$

Valores base:

$$S_b = \frac{28000VA}{3} = 9{,}33kVA \qquad (50)$$

$$V_b = \frac{220V}{\sqrt{3}} = 127{,}01V \qquad (51)$$

$$I_b = \frac{9{,}33kVA}{127{,}01V} = 73{,}48A \qquad (52)$$

$$Z_b = \frac{127{,}02V^2}{9{,}33kVA} = 1{,}73\Omega \qquad (53)$$

Donde

| | |
|---|---|
| $R_n$ | Resistencia de puesta a tierra |
| $S_b$ | Potencia base |
| $V_b$ | Voltaje base |
| $I_b$ | Corriente base |
| $Z_b$ | Impedancia base |

# 4 ESTUDIO DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA

En el presente capítulo se estudia el comportamiento del turbogenerador en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga, se realizan pruebas con el método de elementos finitos MEF al modelo del turbogenerador realizado y validado en el capítulo 3, adicional a esto se realizaron pruebas al turbogenerador en el laboratorio de máquinas eléctricas rotativas de la universidad del valle, este capítulo se dividirá en dos partes, la presentación de las pruebas realizadas en MEF y las pruebas en sitio, consiguiendo contrastar resultados y estudiar diferentes efectos que no son apreciables en sitio y que mediante el MEF si se logran observar.

## 4.1 ESTUDIO MEF DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico de simulación de fenómenos electromagnéticos. El MEF ha venido usándose desde hace ya varios años en el cálculo de las pérdidas en las máquinas eléctricas. Dems *et al.* (1995) muestran cómo se deben calcular las pérdidas en los devanados del rotor en un motor de inducción de jaula de ardilla, cuando se consideran los armónicos presentes. Chevalier *et al.* (1999) discuten la estimación de las pérdidas en el hierro de un motor de inducción usando el MEF. Driesen (2000) muestra las expresiones para calcular las pérdidas de Joule y las ocurridas en el hierro, incluyendo las pérdidas por histéresis y por corrientes Eddy, en un programa de cálculo numérico con el MEF. Yamasaki (2001) propone una metodología para calcular la eficiencia de motores de inducción para compresores de amoniaco, la cual es contrastada con mediciones en laboratorio. Finalmente, Yamasaki y Haurishi (2004) analizan la estimación de los diversos tipos de pérdidas en el generador de inducción usando el MEF, y cómo estas varían de acuerdo al estado de carga del generador [38].

En este trabajo utilizamos una metodología similar a la usada por los autores mencionados para estudiar el comportamiento del turbogenerador en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga en magnitud para

diferentes niveles de desequilibrio de corriente. Estos estudios se contrastan con pruebas realizadas en el laboratorio al turbogenerador.

### 4.1.1 Estudio de MEF del Turbogenerador en Condiciones Equilibradas

En el siguiente aparatado se estudia mediante MEF el turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga, para diferentes parámetros del turbogenerador bajo condiciones equilibradas y posteriormente comparar la variación de los parámetros iníciales conforme se desequilibra la carga en el turbogenerador.

### 4.1.2 Parámetros Iníciales de Simulación

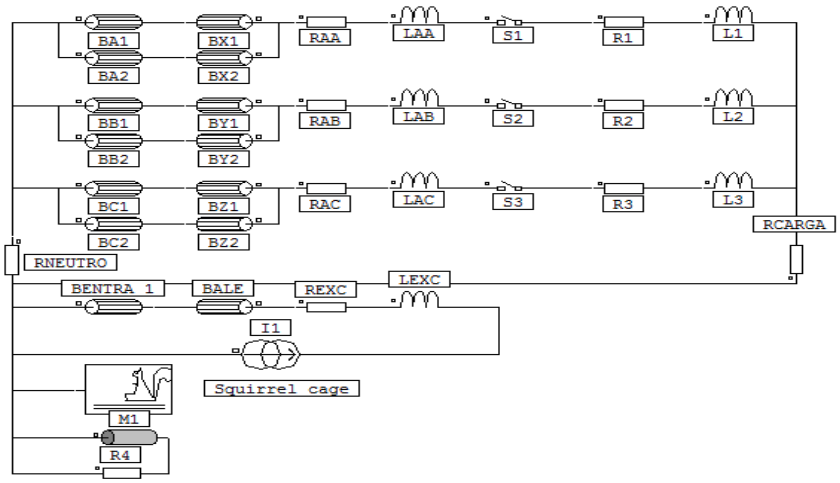
En la tabla 14 se especifican los parámetros nominales del turbogenerador los cuales fueron ingresados en el software flux 2D para su respectiva simulación

Tabla 14. Parámetros para el turbogenerador en condiciones equilibradas.

| | |
|---|---|
| **Voltaje de armadura (V)** | 220 |
| **Corriente de armadura (A)** | 70 |
| **Iexc nominal (A)** | 16 |
| **Fp** | 0.9 atrasado |

El circuito utilizado en esta simulación es similar al usado en el estudio en vacío de la figura 7, con la diferencia de que se agrega por cada fase una rama inductiva de carga (L1, L2, L3) que se muestra en la figura 12.

Figura 12. Circuito asignado para la prueba de operación bajo carga



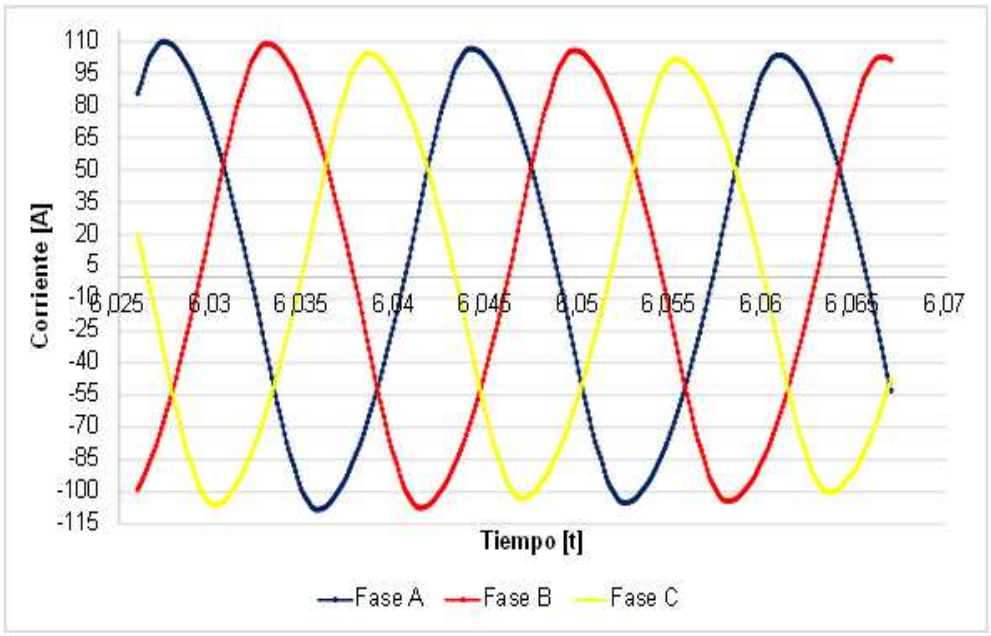

Donde

| | |
|---|---|
| BA, BX, BA1, BX1 | Lados de bobina entrante y saliente de la fase A |
| BB, BY, BB1, BY1 | Lados de bobina entrante y saliente de la fase B |
| BC, BZ, BC1, BZ1 | Lados de bobina entrante y saliente de la fase C |
| RAA, RAB, RAC | Resistencia por fase |
| LAA, LAB, LAC | Inductancia de dispersión de cabezas de bobina del estator |
| R1, R2, R3 | Resistencia infinitamente pequeña que representa la máquina durante el cortocircuito |
| Rcarga | Resistencia que representa la máquina durante situaciones bajo carga |
| RNeutro | Resistencia del neutro a tierra |
| S1,S2,S3 | Interruptores (abiertos tienen la máquina en vacío y cerrados en cortocircuito) |
| Bentra y Bsale | Lados entrante y saliente del devanado de excitación. |
| Lexo | Inductancia de dispersión de cabezas de bobina devanado de excitación |

| | |
|---|---|
| Q1 | Devanado amortiguador |
| M1 | Eje |
| L1,L2,L3 | Rama inductiva de carga |

Para realizar la prueba a plena carga, se generan voltajes y corrientes equilibrados, la carga en cada fase es igual, la velocidad mecánica se mantiene en 1800 rpm con una frecuencia de 60 Hz lo que da como resultado corrientes equilibradas que se aprecian en la figura 13. Se simulan 670 pasos con los cuales se obtuvieron 3 ciclos, donde el transitorio ya ha desaparecido por la acción de los interruptores, se obtienen las corrientes de forma individual y posteriormente se superponen para visualizar las tres corrientes en un mismo tiempo. Es preciso señalar que en la realidad es muy complejo obtener un equilibrio perfecto para las corrientes de fase, no obstante para efectos de la simulación se logró obtener un error de simulación del 0,5% de corriente entre todas las fases teniendo como referencia la corriente nominal (70A).

Figura 13. Corrientes de fase con operación bajo carga nominal

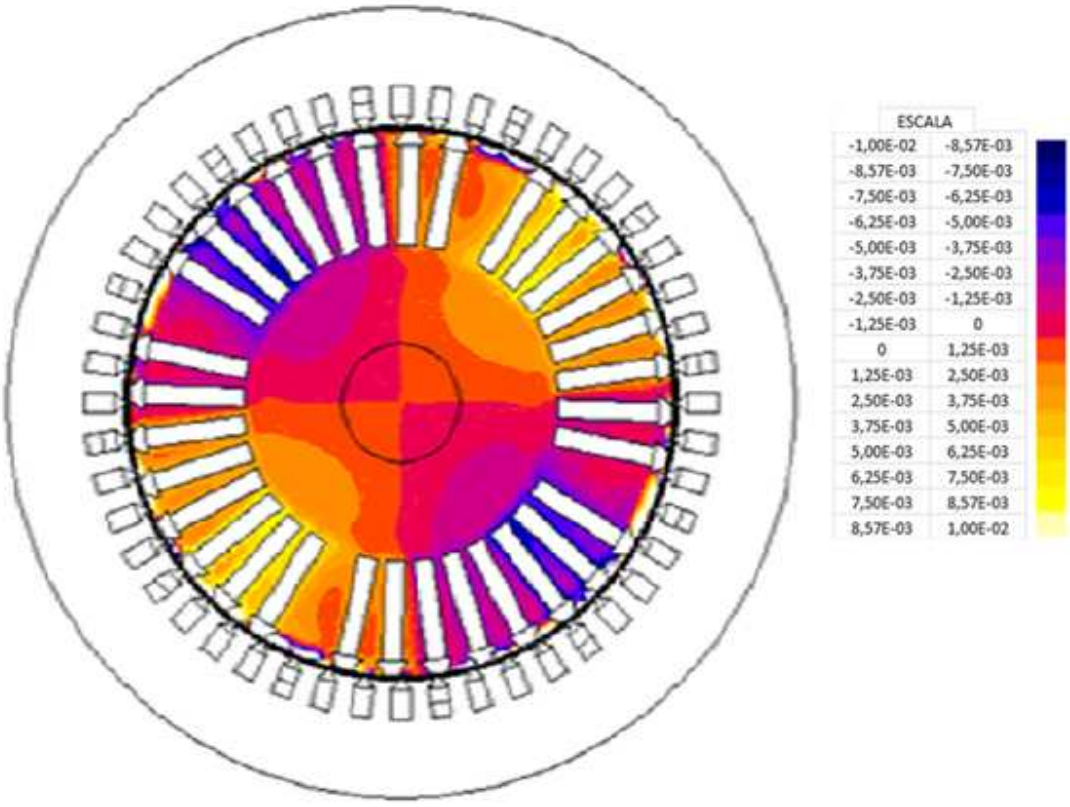


#### 4.1.2.1 Resultados Obtenidos en la Simulación Software flux 2D

##### 4.1.2.1.1 Densidad de Corriente en el Rotor

En la figura 14 se muestra la densidad de corriente en el rotor obtenida de la simulación, cuando el turbogenerador se encuentra bajo condiciones equilibradas de carga en magnitud. Para obtener la densidad de corriente se utiliza el módulo propiedades de color del software flux 2D, se establecen las condiciones para que se exponga de manera apropiada la distribución de la densidad de corriente inducida en el rotor. Para ello se acotó la escala de densidad de corriente de $-1XE-2$ hasta $1XE-2$. Para un tiempo $t = 6{,}0592s$.

Figura14. Densidad de corriente del núcleo del rotor bajo condiciones equilibradas [A/mm$^2$].



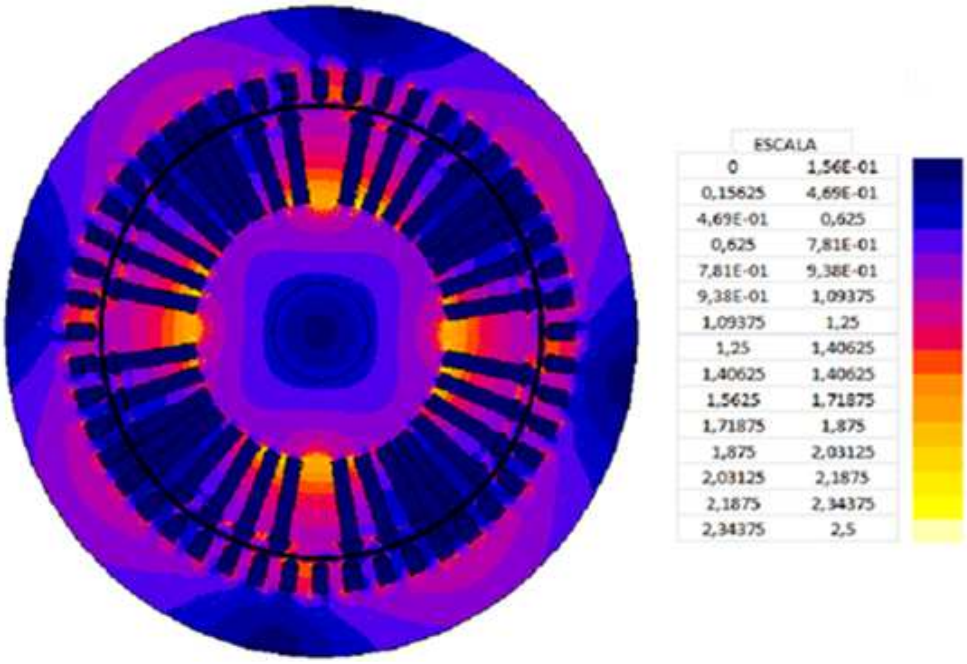
#### 4.1.2.1.2 Densidad de flujo magnético

En la figura 15 se considera la distribución de flujo magnético del turbogenerador cuando es llevado a tensión nominal bajo condiciones estables de equilibrio de carga. En ella se muestra como la distribución de flujo magnético en los dientes se encuentra dentro de los parámetros propuestos por [40] [41] [42] [43], para este tipo de máquina (ver tabla 15). Esta gráfica se obtuvo para un tiempo $t = 6{,}057s$

Tabla 15. Densidad de flujo en los dientes estándar para turbogeneradores refrigerados por aire.

| Autor | Bδ [T] |
|---|---|
| K. Vogt | 0.75-1.05 |
| J. Pyrhonen | 0.8-1.05 |
| J.C. Martín | 0.73 |
| I. Boldea | 0.75-1.05 |

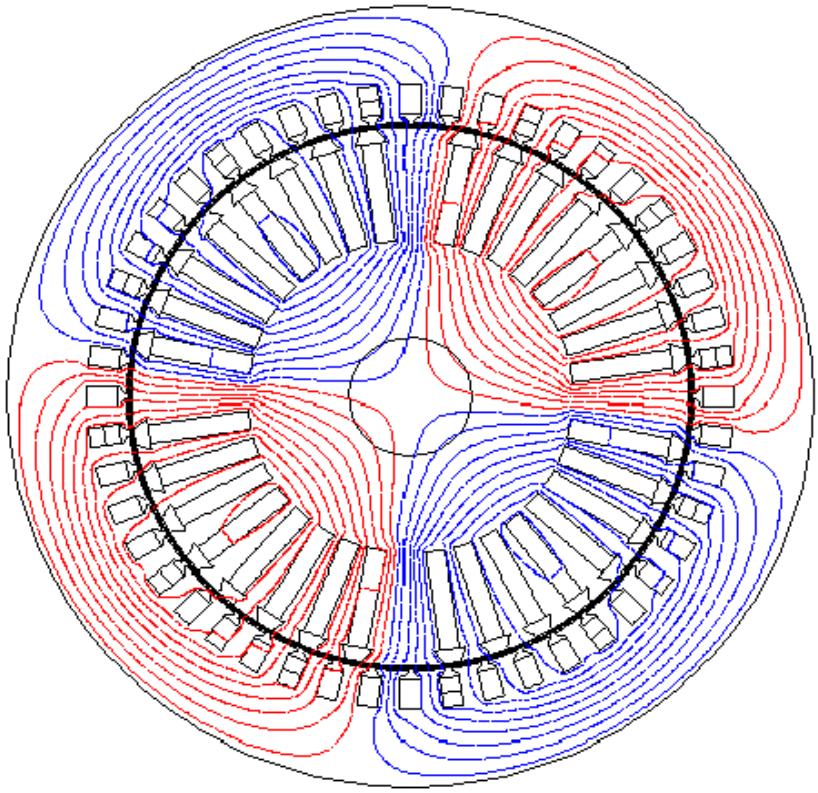
Figura15. Carta de colores para la densidad de flujo bajo condiciones equilibradas.



#### 4.1.2.1.3 Curva de Isovalores Equipotenciales de Densidad de Flujo

Se obtiene la carta de isovalores equipotenciales de densidad de flujo (ver figura 16), se establece la creación de 20 curvas de nivel donde se observa en detalle la densidad de flujo del turbogenerador estando en condiciones de equilibrio. Esta gráfica se obtuvo en el tiempo $t = 6{,}0568$

Figura 16. Carta de isovalores equipotenciales de densidad de flujo bajo condiciones nominales de carga equilibrada.



.

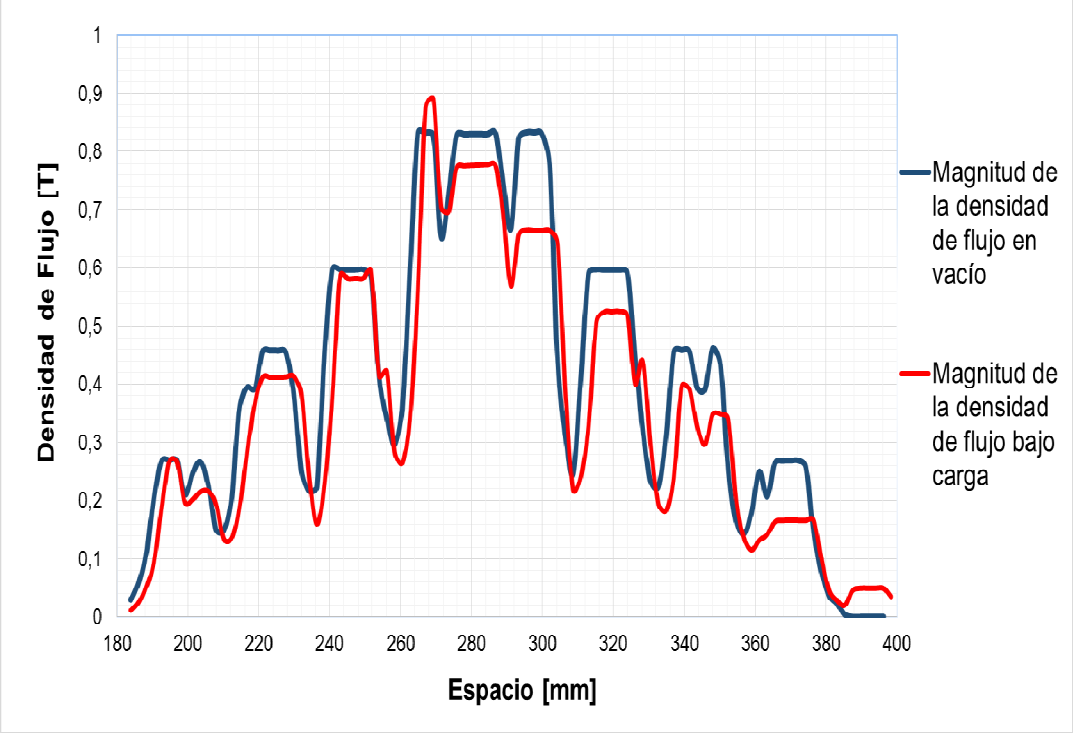
#### 4.1.2.1.4 Densidad de flujo en vacío para condiciones de equilibrio de carga en Magnitud

En la figura 17 se muestran las magnitudes de las densidades de flujo obtenidas en la simulación del turbogenerador en vacío (línea azul) y en condiciones nominales equilibradas de carga (línea roja). Para la elaboración de estas gráficas se usó el módulo “path”, el cual permite

obtener resultados de una variable eléctrica a partir de una línea trazada del objeto en estudio. En este caso se trazó un círculo de radio 138.65mm por todo el entrehierro para un tiempo t=6,013, de tal manera que el eje directo del rotor quede paralelo a la vertical del turbogenerador.

En la figura 17 se muestra el desplazamiento del flujo en la simulación bajo carga y el efecto de la acción magnetizante y desmagnetizante (ver lado derecho e izquierdo figura 17 respectivamente) debido carga resistiva-inductiva.

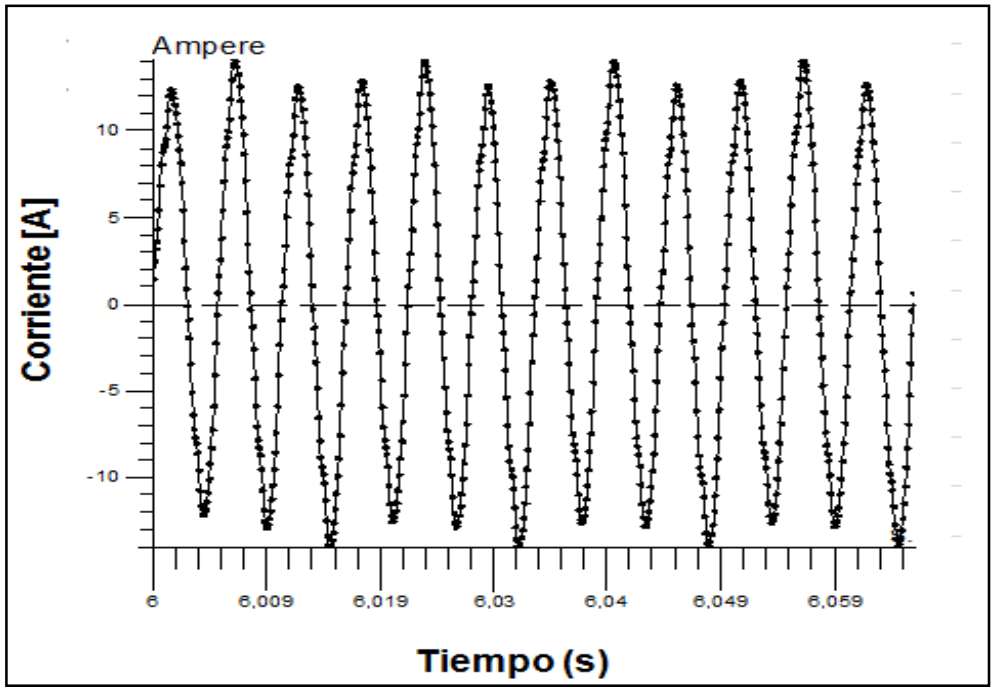
Figura 17. Magnitud de la densidad de flujo para los casos vacío y bajo carga equilibrada.




#### 4.1.2.1.5 Corriente por la puesta a tierra del neutro del estator

En la figura 18 se realiza la medición de la corriente por la puesta a tierra del neutro del estator en condiciones de equilibrio de carga, para esta medición se tomaron 4 periodos con un valor de corriente RMS de 8.98A.

Figura 18. Corriente por el neutro de la puesta a tierra del turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga.




### 4.1.3 Estudio MEF para el turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga

En este apartado se analizan los efectos en el turbogenerador ante la presencia de carga desequilibrada en magnitud, como se mencionó en el capítulo 2 por norma el máximo de corriente no debe exceder el 105% corriente nominal para cualquier fase y un máximo de 10% de corriente de secuencia negativa [25] para máquinas con devanados amortiguadores.

El circuito utilizado para la simulación con carga desequilibrada es el mismo utilizado en el estudio con carga equilibrada (ver figura 12), para la realización de las simulaciones se utilizó el módulo 'Batch' de Flux [27] con pasos de 1E-3. Para obtener 4 ciclos de la onda de corriente se simularon 670 pasos, de esta manera se obtiene una simulación bastante precisa.

En este estudio se analizan 4 casos de desequilibrio de los cuales dos estarán dentro de la norma [15] y dos por fuera de ella. Se plantean porcentajes de desequilibrios del 102%, 104%, 107% y 111% de la corriente de fase de los devanados.

#### 4.1.3.1 Resultados Obtenidos en la Simulación Software flux 2D para Diferentes Casos de Desequilibrio de Carga en Magnitud

##### 4.1.3.1.1 Variación de las Corrientes de Fase, Componentes Simétricas

En la tabla 16 se presentan las corrientes de fase y las corrientes de secuencia positiva negativa y cero para los casos en que el turbogenerador se encuentra en equilibrio y desequilibrio de carga, se muestra en qué porcentaje se va desequilibrando la fase A pudiendo observar como las corrientes de secuencia negativa y cero aumentan su valor conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio de carga por la fase A.

Tabla 16. Variación de las corrientes de fase y las componentes simétricas cuando la maquina se encuentra en equilibrio y desequilibrio de carga

| VARIACIÓN DE $I_a$ | CORRIENTES DE FASE (A) | | | COMPONENTES SIMÉTRICAS FASE A | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % | $I_a$ | $I_b$ | $I_c$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_0$ |
| 100 | 70 <17,22° | 70 <103,22° | 70 <137,22° | 69,999<17,0322° | 0,179 <47° | 0,179 <167° |
| 102 | 71,4<17,22° | 70 <103,22° | 70 <137,22° | 70,466 <17,0743° | 0,628<25,360° | 0,324 <33,35° |
| 104 | 72,8<17,22° | 70 <103,22° | 70 <137,22° | 70,932 <17,0753° | 1,092<21,892° | 0,783<23,828° |
| 107 | 74,9<17,22° | 70 <103,22° | 70 <137,22° | 71,632 <17,0767° | 1,791<20,068° | 1,481<20,710° |
| 111 | 77,7<17,22° | 70 <-103,22° | 70 <137,22° | 72,566<17,0785° | 2,723<19,092° | 2,413<19,361° |

#### 4.1.3.1.2 Corriente de Secuencia Negativa

En la tabla 17 se verifican los valores de corriente de secuencia negativa estén dentro de los rangos establecidos en las tablas 1 y 2, la norma [18] indica que la corriente de secuencia negativa que circule en un turbogenerador, no podrá exceder el 10% (7A) de la corriente nominal, la cual es de 70A.

Tabla 17. Verificación de la corriente de secuencia negativa para desequilibrios del 100%, 102%, 104%, 107% y 111% según los parámetros de norma.

| DESEQUILIBRIO | CORRIENTE | MÀXIMA CORRIENTE $I_2$ [A] |
|---|---|---|
| % | $I_2$ | 10% |
| 100 | 0,089 | 7 |
| 102 | 0,475 | |
| 104 | 0,937 | |
| 107 | 1,635 | |
| 111 | 2,568 | |

#### 4.1.3.1.3 Corriente de Secuencia Cero

En ausencia de una norma que nos indique qué porcentaje de secuencia cero se tiene que limitar, se ha encontrado una base conservadora que permite llevar la corriente de secuencia cero en términos de corriente de secuencia negativa y así poder verificar los rangos establecidos en las tablas 1 y 2para la carga de secuencia negativa.

Como procedimiento se combinan las componentes de corriente de secuencia cero$I_0$, y las componentes de secuencia negativa, $I_2$ según la ecuación (54), y se aplican las mismas limitaciones que existen por norma

en las corrientes de secuencia negativa para las corrientes de secuencia cero [13].

$$I' = \sqrt{(I_2)^2 + 2(I_0)^2} \qquad (54)$$

En la tabla 18 se verifica que la corriente de secuencia cero esté dentro de los rangos mostrados en las tablas 1 y 2, como se indicó en [18]. Este procedimiento es de gran soporte al no existir una normatividad que fije un porcentaje de corrientes de secuencia cero, puesto que solo algunos fabricantes de turbogeneradores presentan límites a estas corrientes.

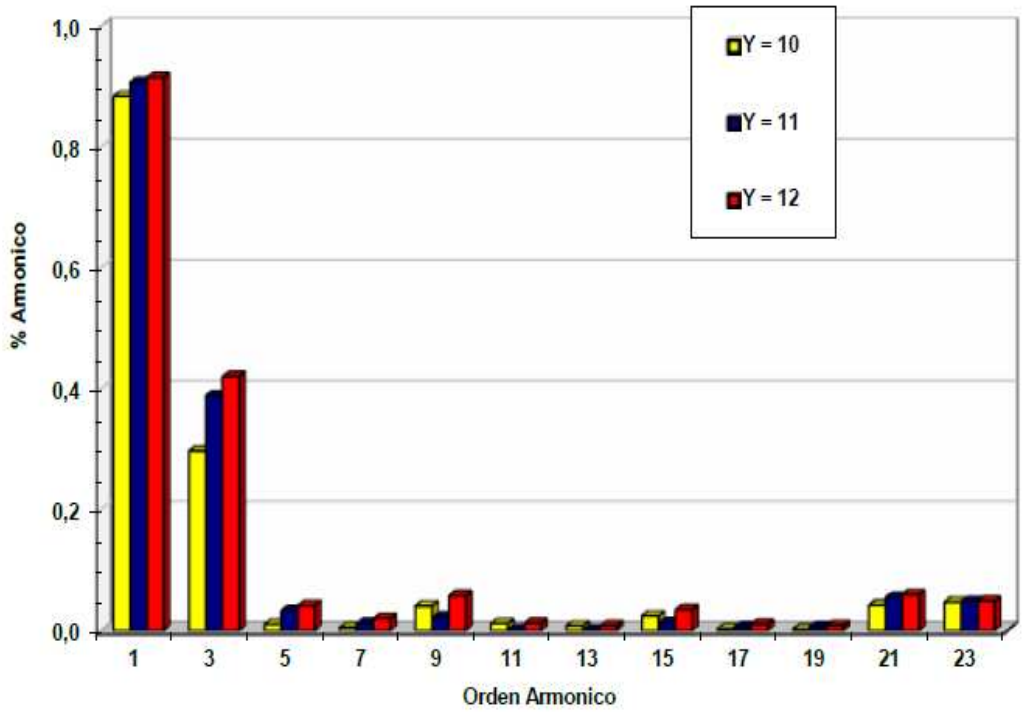
Tabla 18. Verificación de la corriente de secuencia cero para desequilibrios del 100%, 102%, 104%, 107% y 111% según los parámetros de norma.

| DESEQUILIBRIO | CORRIENTE | MAXIMA CORRIENTE $I_0$ [A] |
|---|---|---|
| % | $I_0$ | 10% |
| 100 | 0,154 | 7 |
| 102 | 0,822 | |
| 104 | 1,622 | |
| 107 | 2,831 | |
| 111 | 4,447 | |

#### 4.1.3.1.4 Factor de Devanado del Estator

De acuerdo con [32], en donde se calcula el factor de devanado del turbogenerador con un paso de $y = 10$ como se muestra en la figura 19, en donde podemos apreciar que, para este paso, el turbogenerador permite que aparezcan alrededor del 30% de los armónicos de tercer orden.

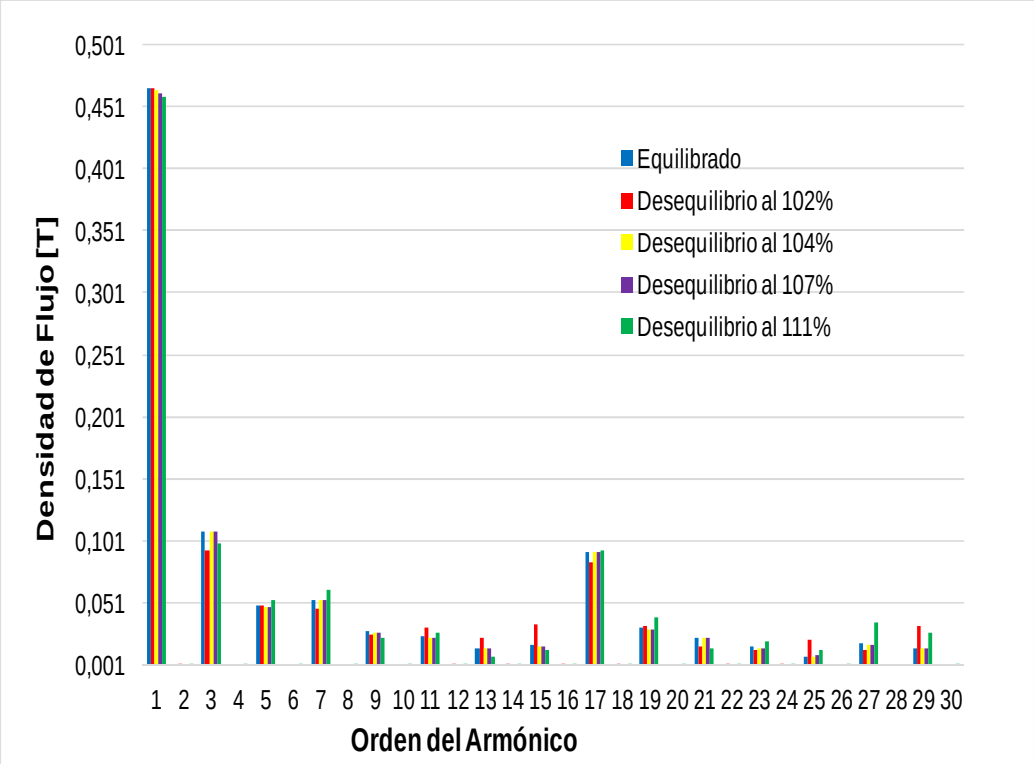
Figura 19. Factor de devanado del estator [32].




#### 4.1.3.1.5 Armónicos de Densidad de Flujo

En la figura 20se graficaron los armónicos de densidad de flujo, se obtuvo la distribución de armónicos cuando el turbogenerador se encuentra en situación de equilibrio y desequilibrio de carga. Se observa que la magnitud de la densidad de flujo en el tercer armónico se encuentra alrededor del 30% del armónico fundamental como se mencionó en (4.1.2.1.4), adicionalmente se aprecia una disminución del armónico fundamental conforme aumenta el desequilibrio, lo que conllevará a que el turbogenerador se desmagnetice.

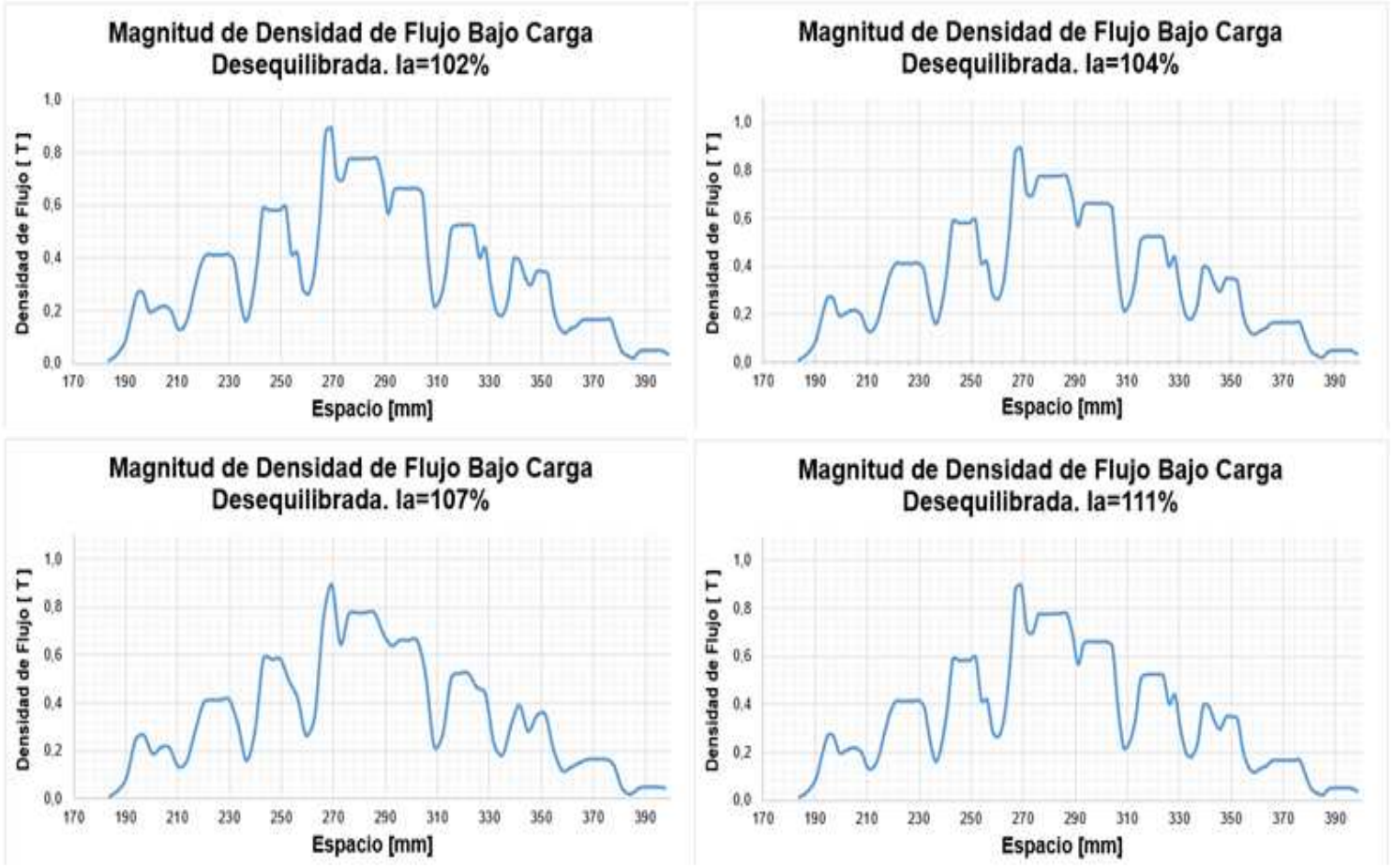
Figura 20. Armónicos de densidad de flujo para los diferentes casos de desequilibrio analizados.




#### 4.1.3.1.6 Densidad de Flujo en el Entrehierro

En la figura 21 se presenta la densidad flujo para los diferentes casos de desequilibrio de carga, si bien no se muestra una importante deformación de la onda, existe una acción desmagnetizante conforme aumenta el desequilibrio.

Figura 21. Densidad de flujo en el entrehierro para el mismo ángulo y tiempo. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%.



#### 4.1.3.1.7 Armónicos de Corriente

En esta sección se muestra la variación de los armónicos de corriente de fase cuando el turbogenerador se encuentra en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga, como se observa en las figuras22, 23, 24, 25 y 26, existe una importante presencia del tercer armónico de corriente, que se mantiene constante estando la máquina en situación de equilibrio y desequilibrio de carga y adicional a esto se puede apreciar que el armónico fundamental tiende a aumentar en la fase A.

Figura 22. Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con equilibrio de carga.

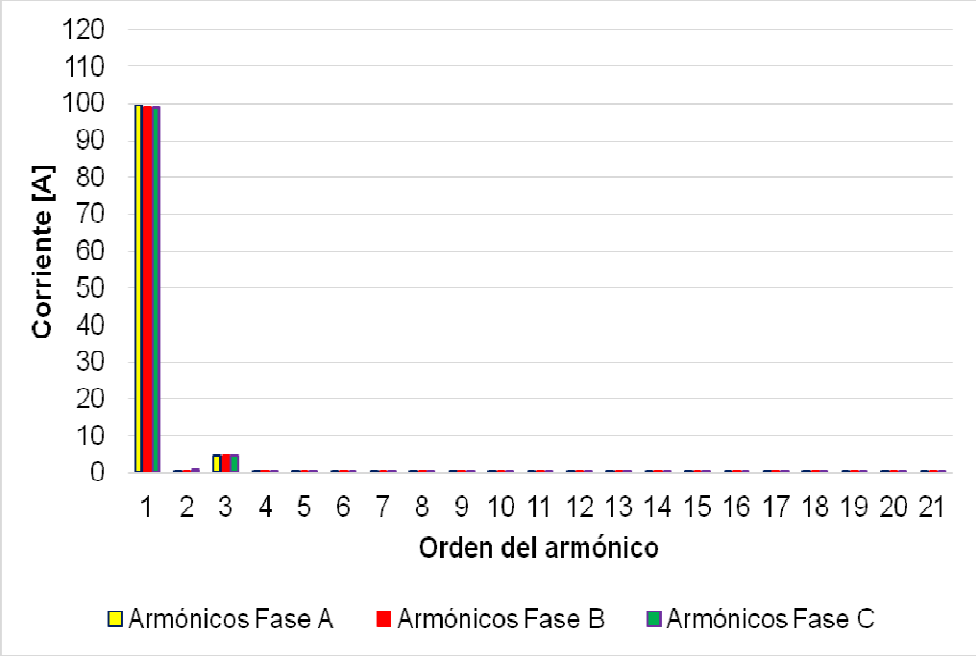


Figura 23. Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con desequilibrio de carga del 102%.

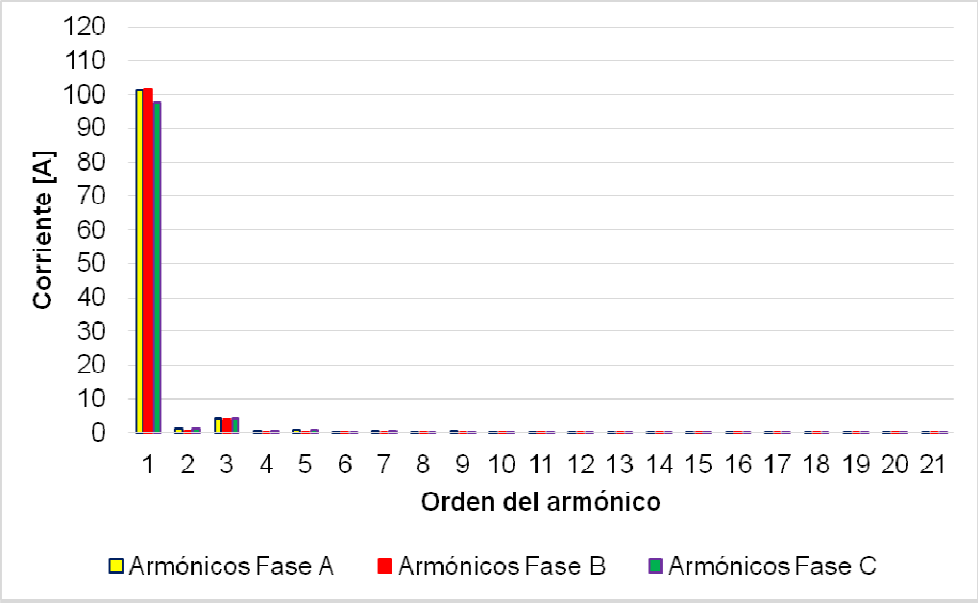



Figura 24. Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con desequilibrio de carga del 104%.

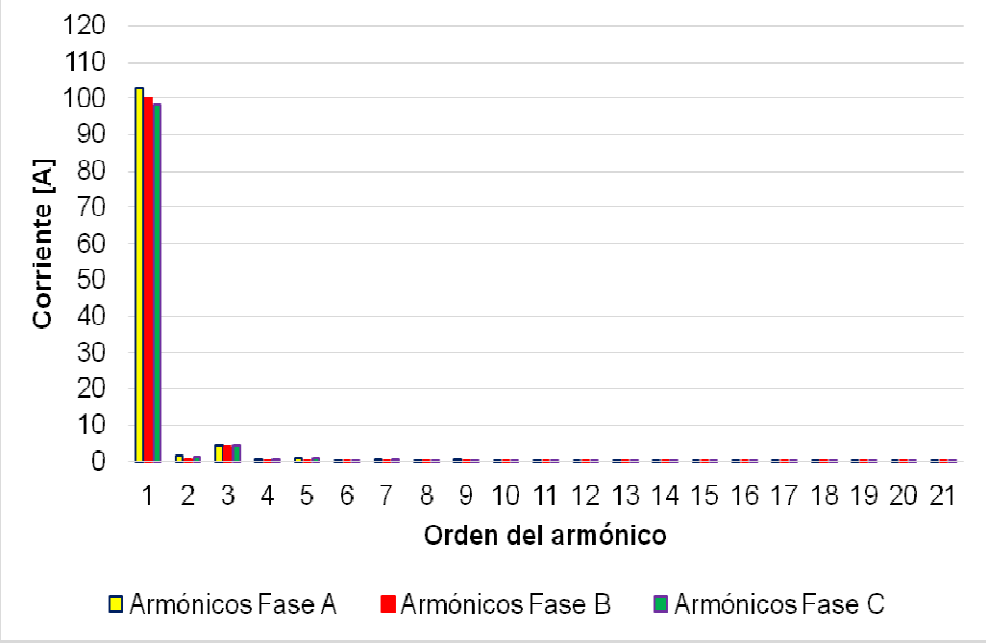


Figura 25. Armónicos de corriente por fase para el turbogenerador con desequilibrio de carga del 107%.

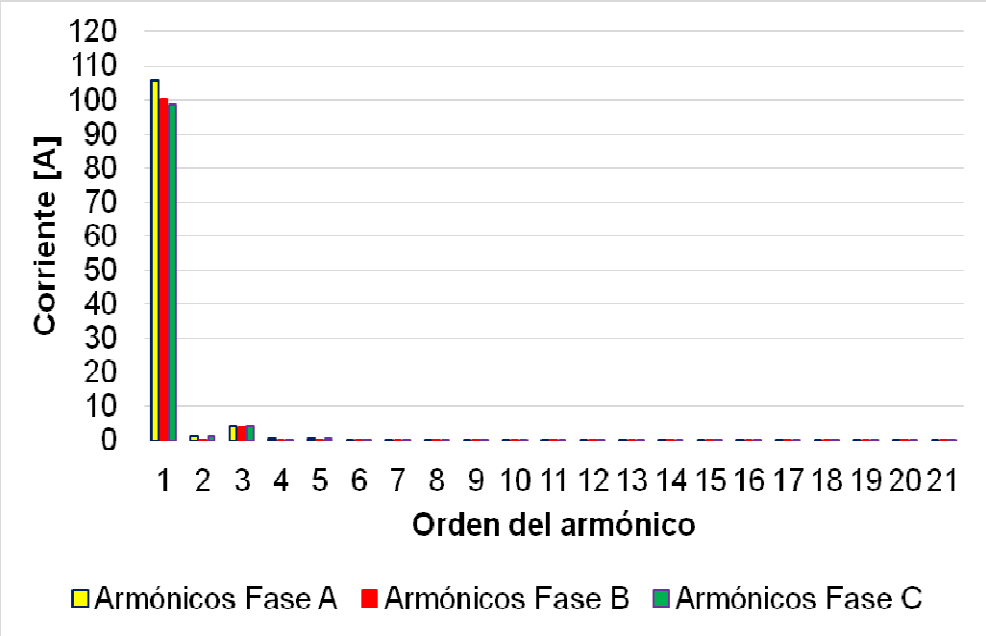
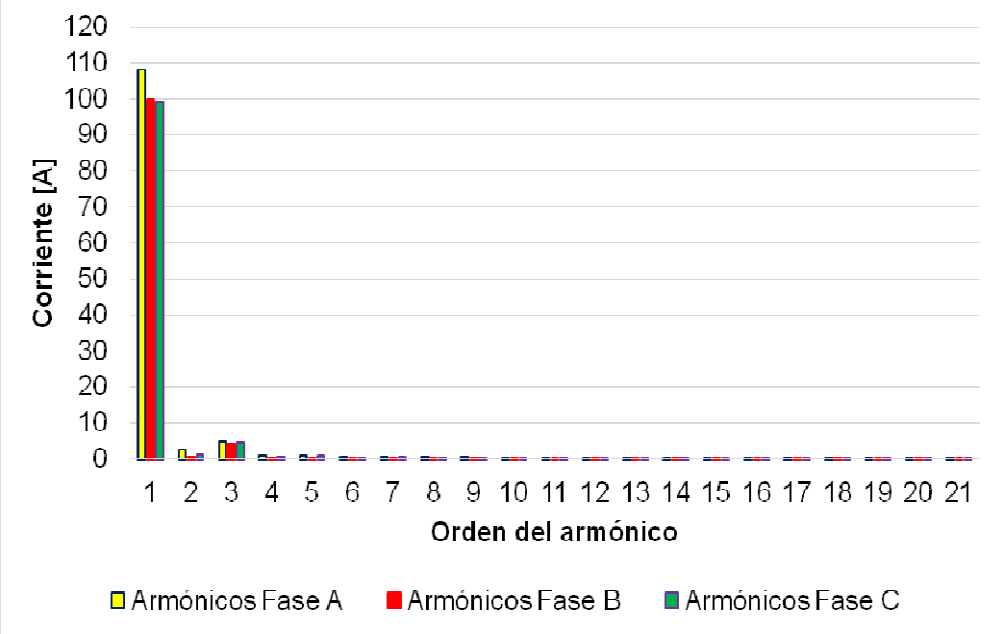



Figura 26. Armónicos de corriente para en el turbogenerador con desequilibrio de carga del111%.



#### 4.1.3.1.8 Armónicos de Corriente por el Neutro

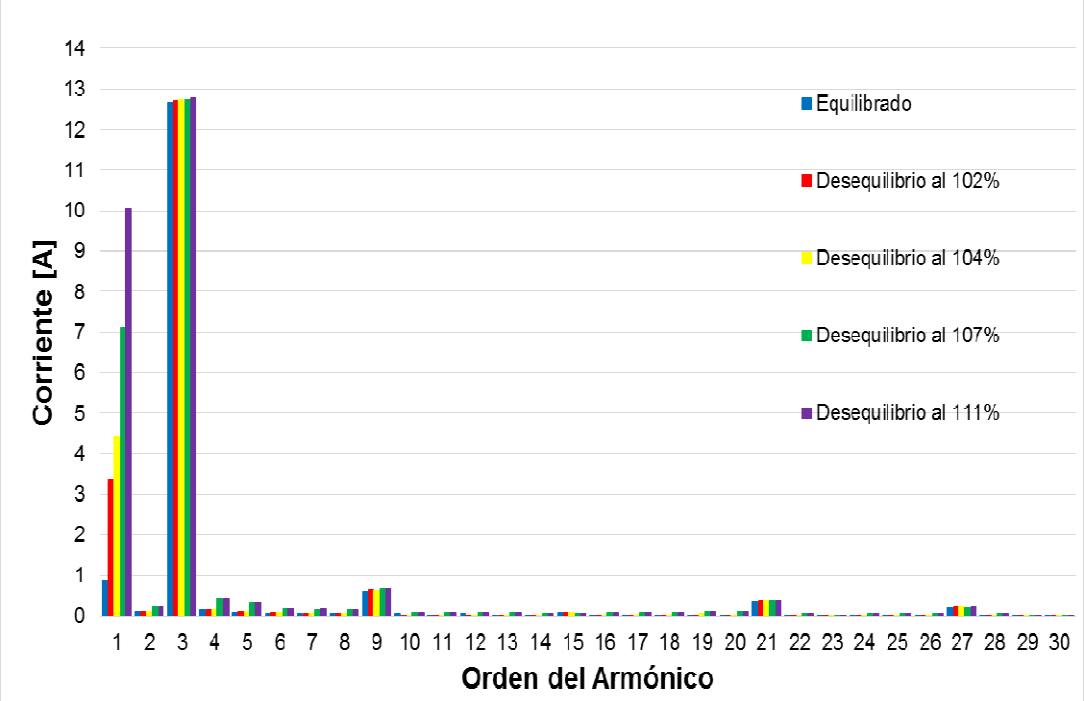
El contenido armónico incrementa con el desequilibrio de carga, debido a la reacción de armadura y varía con el factor de potencia de la máquina, con el incremento de la carga desequilibrada, el turbogenerador desarrolla una componente de tercer armónico de corriente de fase (ver figuras 22-26) y densidad de flujo (ver figura 20),cada armónico posee su propia componente de secuencia positiva, negativa y cero, y por el neutro aparecen corrientes de múltiples frecuencias, las cuales alcanzan niveles considerables mostrados en la tabla 19.
Las componentes de secuencia cero de los armónicos de tercer orden producen corrientes que se suman tres veces en el neutro, (ver figuras 27), el tercer armónico de corriente de fase y corriente en el neutro tienen valores promedios de 4,5 A y 14.8 A respectivamente, con lo cual se comprueba que la corriente en el neutro es alrededor de tres veces la magnitud del tercer armónico de la corriente de fase.

Se observa de los armónicos de corriente por el neutro que conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio se aumenta la magnitud del armónico fundamental y el tercer armónico (ver figura 27), motivo por el cual la forma de onda (ver figura 28), toma una distribución no sinusoidal por estar compuesta de las corrientes de fase, la aparición de una importante magnitud del tercer armónico de corriente por el neutro supone una sumatoria de terceros armónicos de las fases A, B y C para cada caso como se mencionó anteriormente.

Es por ello, se hace necesario tener presente las componentes de secuencia cero de los armónicos de tercer orden en el neutro para el cálculo de la protección de la máquina, puesto que solo se tienen analizadas la componente de secuencia positiva, negativa y cero que crea el armónico fundamental y no la componente de secuencia cero creada por los armónicos de tercer orden.

Si bien es conocido que el efecto de las componentes armónicas de tercer orden de las corrientes que circulan por el neutro a tierra sobre el rotor es similar al del campo de secuencia negativa, el relé 86B (relé auxiliar diferencial) no es sensible a estas corrientes [43] y de no detectarse a tiempo podía producirse daños en el rotor.

Figura 27. Armónicos de corriente por el neutro para los diferentes casos de desequilibrio analizados.

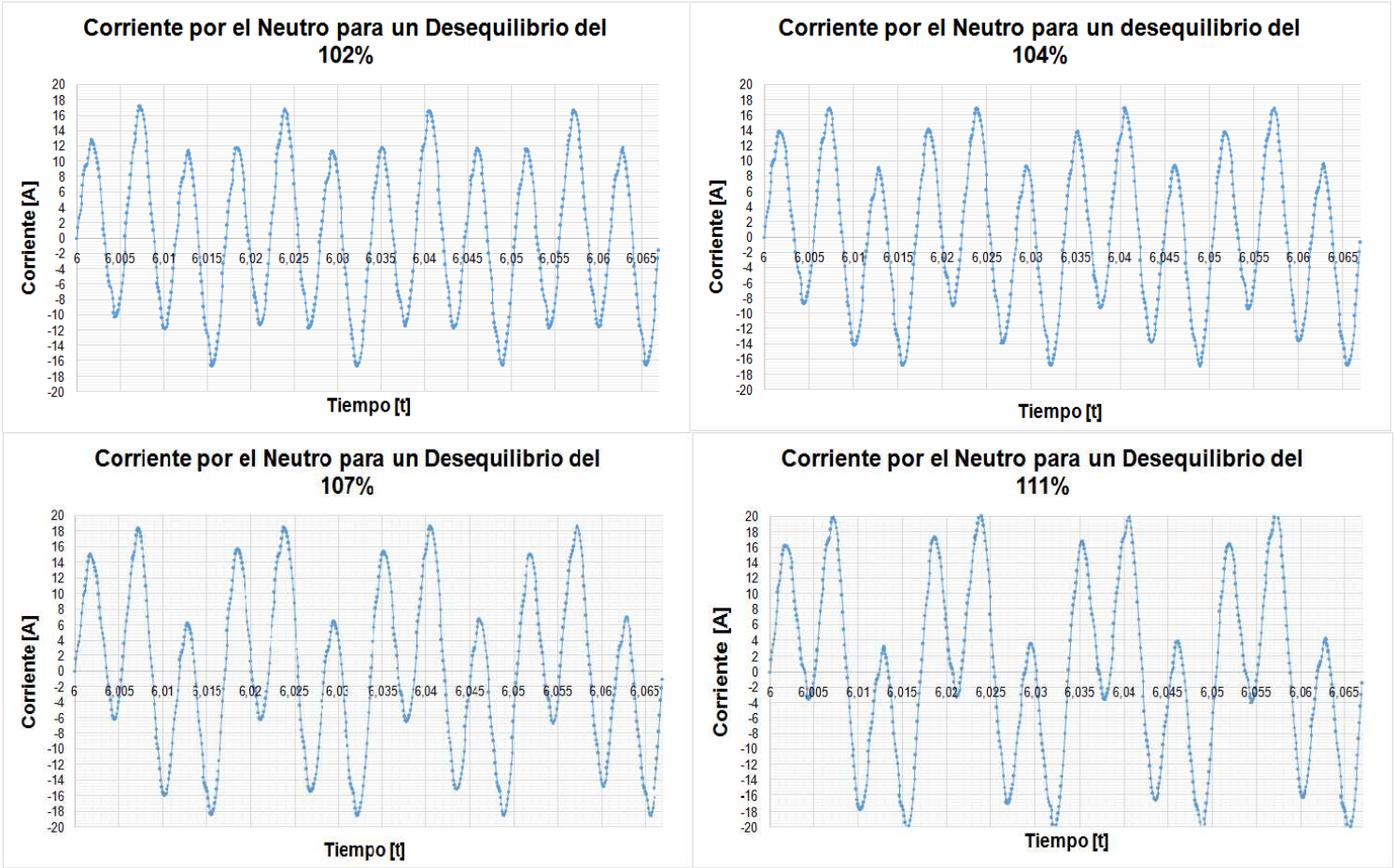



En la tabla 19 y la figura 28 se registra el valor de la corriente que circula por el neutro a tierra del turbogenerador para los diferentes casos de desequilibrio, lo que nos permite observar que conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio el valor de esta corriente aumenta.

Tabla 19. Valores de corriente RMS por el neutro para diferentes casos de desequilibrio de carga en magnitud.

| Caso | Corriente [A] |
|---|---|
| Equilibrado | 8.98 |
| Desequilibrio del 102% | 9.27 |
| Desequilibrio del 104% | 9.58 |
| Desequilibrio del 107% | 10.39 |
| Desequilibrio del 111% | 11.57 |

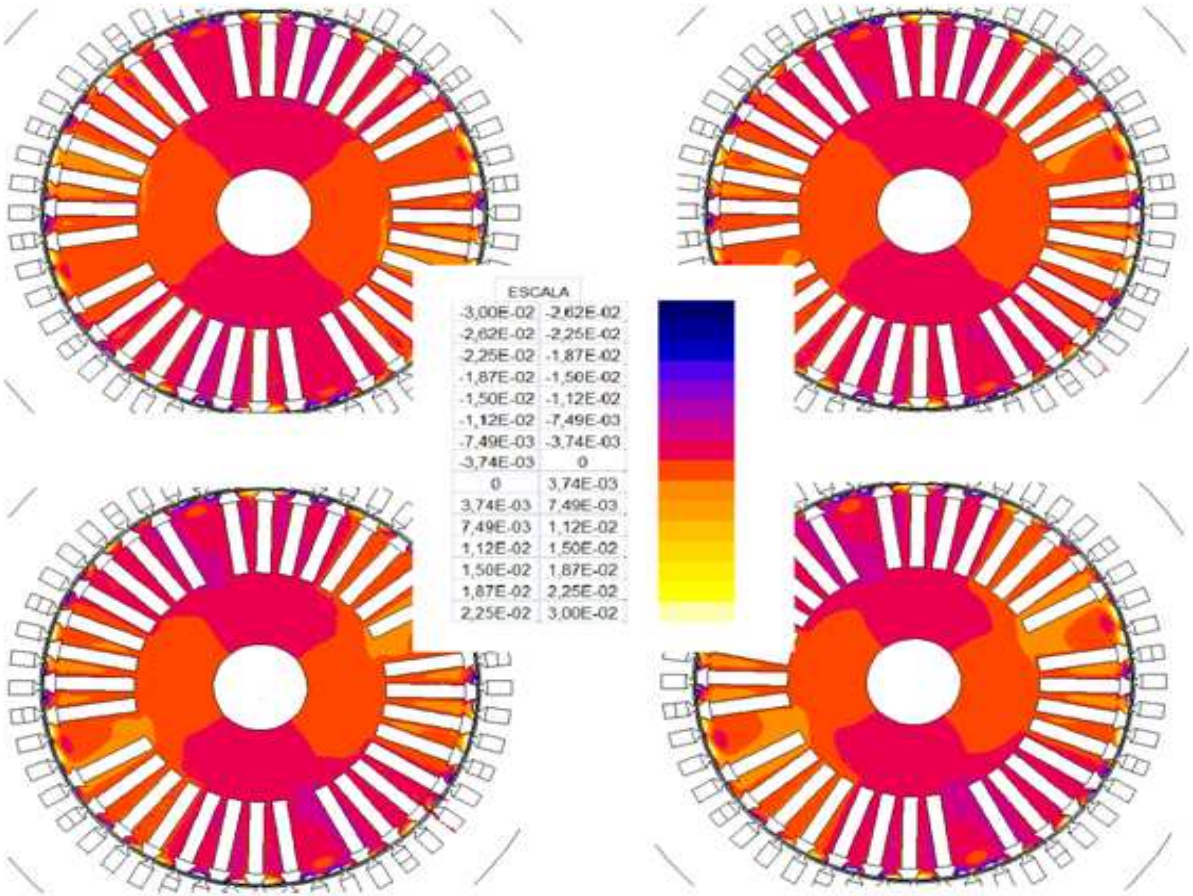
Figura 28. Corriente por hilo neutro. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%.



#### 4.1.3.1.9 Densidad de Corriente en el Rotor

Se extrae las cartas de colores para la densidad de corriente en el rotor, para un mismo tiempo $t = 6.067s$e igual escala (-3X10-2mA y 3X10-2mA.) Con el módulo "cálculo sobre una región" se obtiene la densidad de corriente para los diferentes casos de desequilibrio en ellas se observa el aumento de la densidad de corriente en la cara polar del rotor y en su superficie a causa de las corrientes de secuencia negativa que fluyen por el rotor.

Figura 29. Carta de colores para la densidad de corriente [A/mm$^2$]. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%.



Para efectos de la simulación las pérdidas en el rotor mostradas en la tabla 20 se tomaron de la simulación magnética transitoria, que según recomienda [27], para el estudio de pérdidas en materiales ferromagnéticos se deben usar los siguientes parámetros para obtener un resultado lo más aproximado a la realidad:

The FLUX2D computation of magnetic losses based on the flux density chart uses the following characteristics of laminations:

- hysteresis losses coefficient kh = 306.5 $Ws/T^2m^3$
- classical losses coefficient $\sigma = 4500000\ \Omega^{-1}m^{-1}$
- losses in excess coefficient $k_e = 0.61\ Ws^{1.5}/m^3/T^{1.5}$
- thickness of laminations d = 0.5 mm
- stacking factor $k_f = 0.98$.

En la figura 20 se observa el aumento de las pérdidas del rotor conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio.

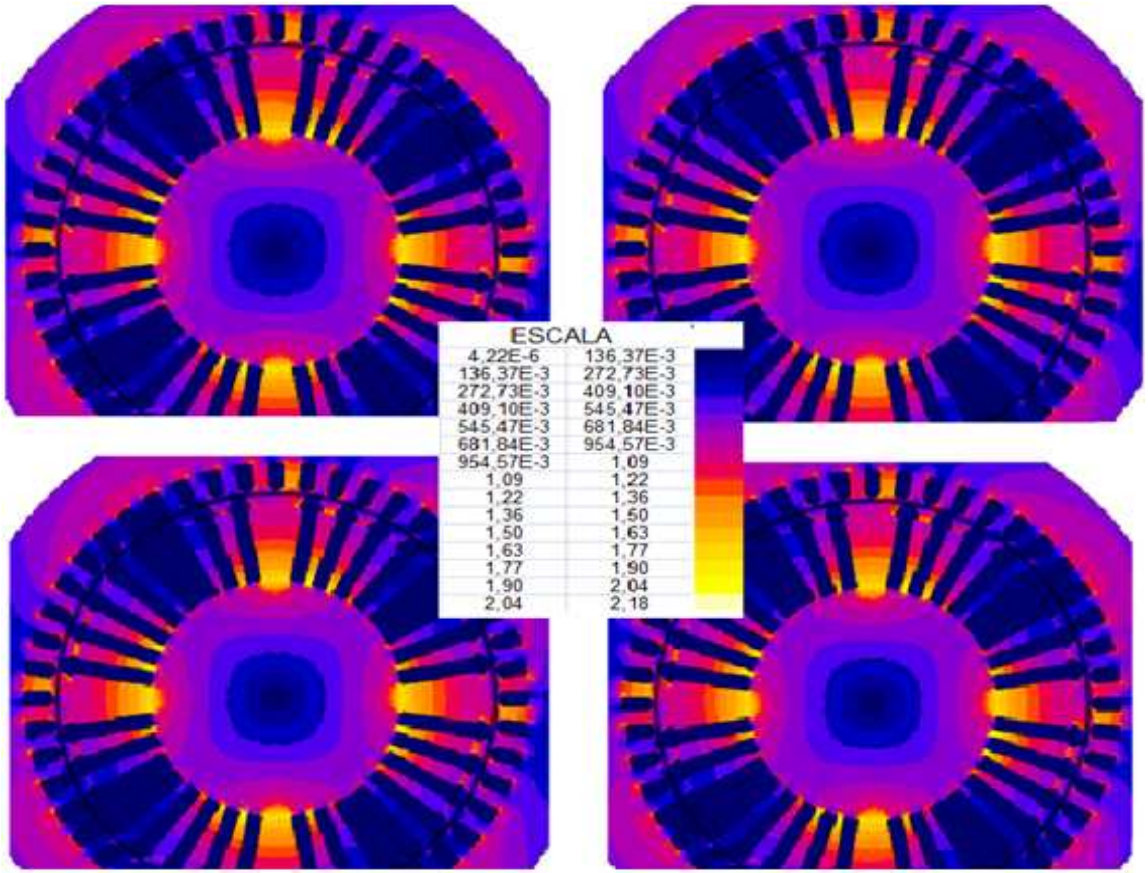
Tabla 20. Pérdidas en el rotor simuladas para los cuatro casos de desequilibrio

| % de Desequilibrio | Pérdidas en el rotor [w] |
|---|---|
| 102 | 4,9693 |
| 104 | 5,0195 |
| 107 | 5,0493 |
| 111 | 5,1764 |

#### 4.1.3.1.10 Densidad de Flujo Magnético

En la figura 30 se presentan las cartas de colores de densidad de flujo magnético para los cuatro casos de desequilibrio en un mismo tiempo t=6,0623s y bajo la misma escala. Se observa que no hay variación apreciable de la densidad de flujo en la máquina conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio.

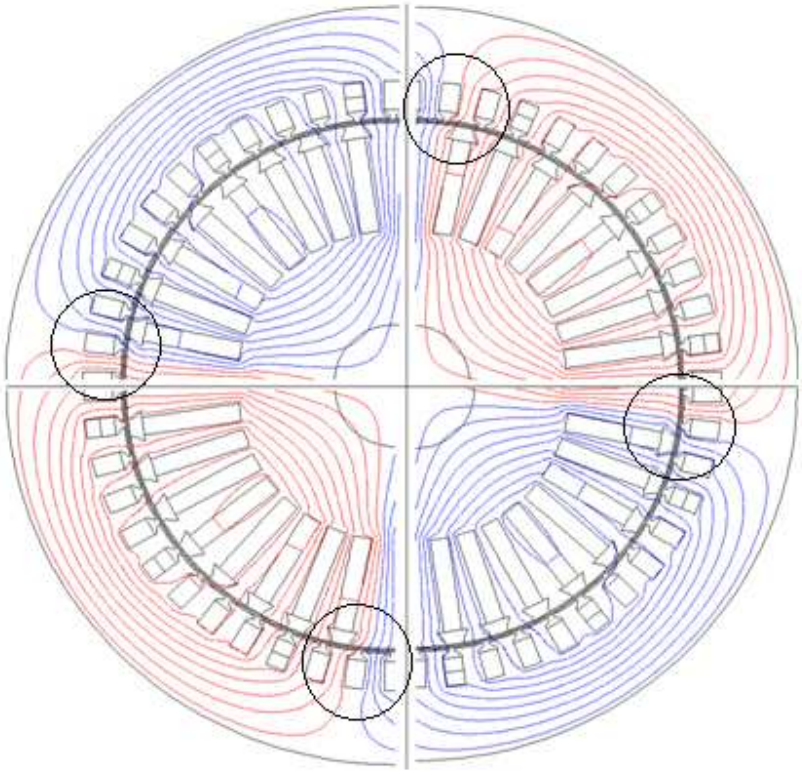
Figura 30. Carta de colores para la densidad de flujo [T]. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%.



#### 4.1.3.1.11 Curva de Isovalores Equipotenciales de densidad de flujo

En la figura 31 se presenta la carta de isovalores del turbogenerador para diferentes casos desequilibrio graficados en cuatro cuadrantes, en ella se puede observar como varía el ángulo del factor de potencia y se desplaza las curvas de isovalores debido del desequilibrio de carga.

Figura 31. Carta de isovalores para el flujo equipotencial [Weber]. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%.Cada cuadrante de la figura corresponde a una misma porción del turbogenerador



#### 4.1.3.1.12 Corrientes Inducidas en el Eje del Turbogenerador [40]

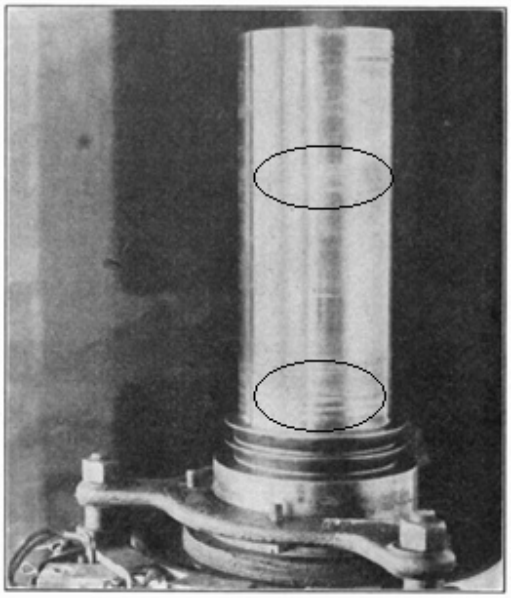
En la figura 32 se muestra el daño que pueden generar las corrientes inducidas en el eje. Todas las corrientes en el eje se deben a una F.e.m entre el eje y el revestimiento del cojinete. Existen tres posibles causas por las cuales la F.e.m puede ser producida:

a) Por un flujo alterno directo a través del eje

b) Por la diferencia de potencial entre el eje y la tierra debido a efectos electrostáticos, o por la puesta a tierra de los conductores del rotor hasta el núcleo de la máquina.

c) Por flujo alterno que une al eje

Figura 32. Efecto de las corrientes inducidas en el eje [40].



En las figuras 33 y 34 se obtiene el voltaje y la corriente inducida en el eje en diferentes condiciones de desequilibrio, no se aprecia un cambio en los voltajes y corrientes conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio debido a que la densidad de flujo en el eje es muy pequeña y el voltaje es proporcional es esta por consiguiente el voltaje y la corriente no es notoria.

Figura 33. Voltaje inducido en el eje. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%

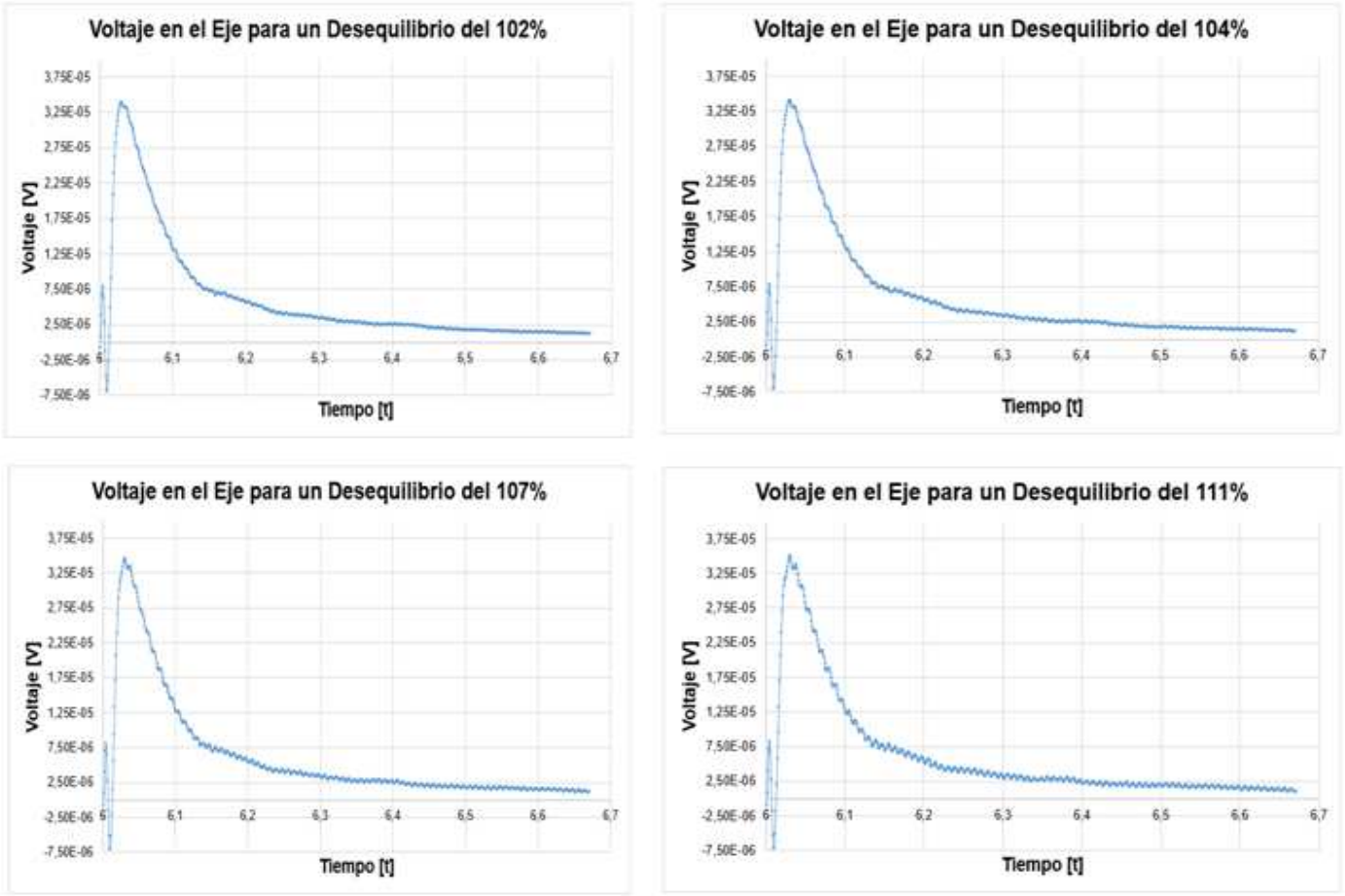
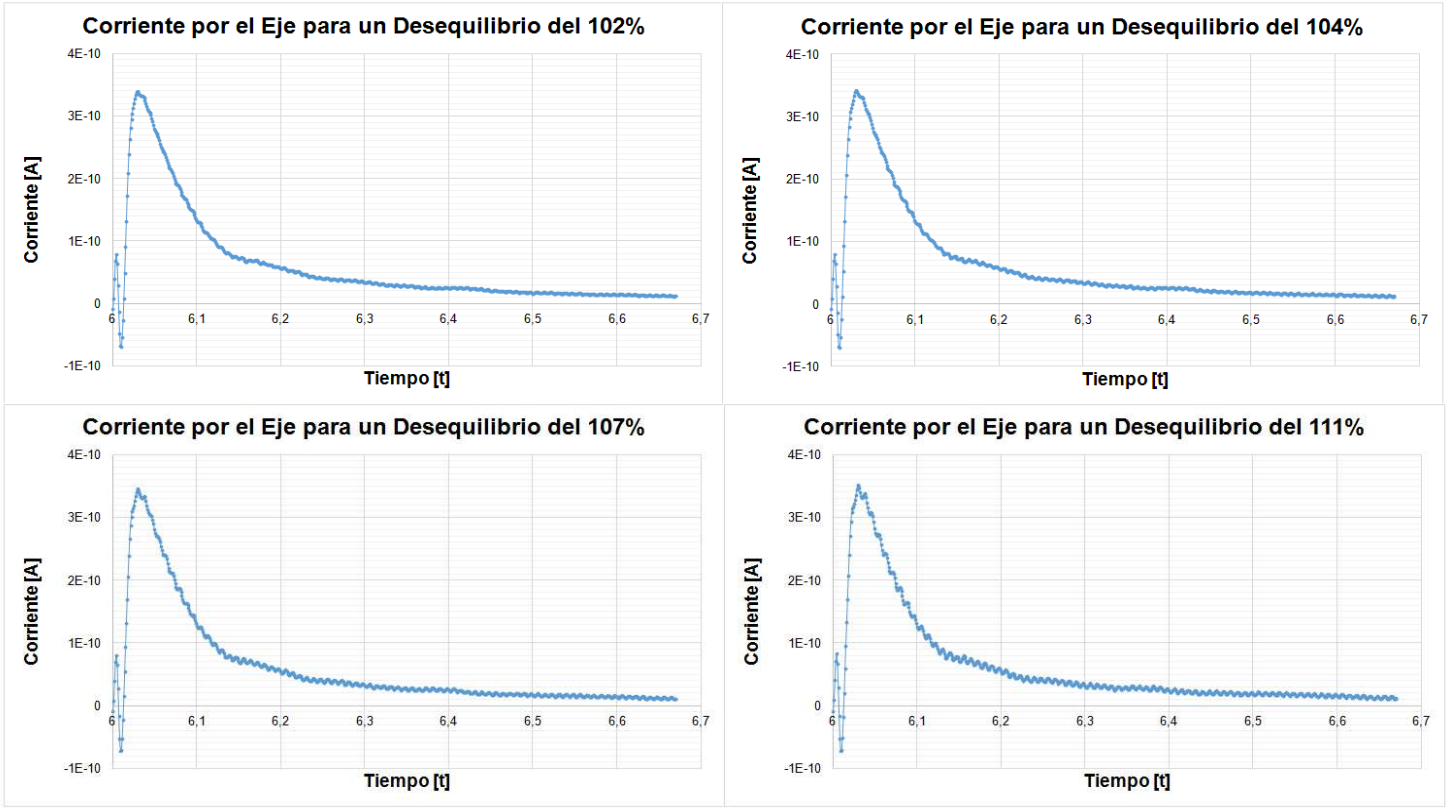


Figura 34. Corriente inducida en el eje. Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%



# 5 ESTUDIO EN SITIO DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA EN MAGNITUD

En este capítulo se analizan las pruebas en sitio realizadasen el laboratorio de máquinas eléctricas rotativas al turbogenerador diseñado por el profesor Harold Díaz en su tesis de doctorado [25].Se realizaron las pruebas al turbogenerador en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga con la ayuda de un analizador de potencia DRANETZ, se tomaron y validaron diferentes parámetros con los cuales concluiremos la presente investigación.

## *5.1 Esquema de Conexión en Sitio*

Se plantea el esquema de conexión de la figura 35 para la realización de las pruebas en el laboratorio, las imágenes del montaje se ven en la figura 36-37 y el anexo A.

Figura 35. Esquema de conexión para la realización de las pruebas en sitio.

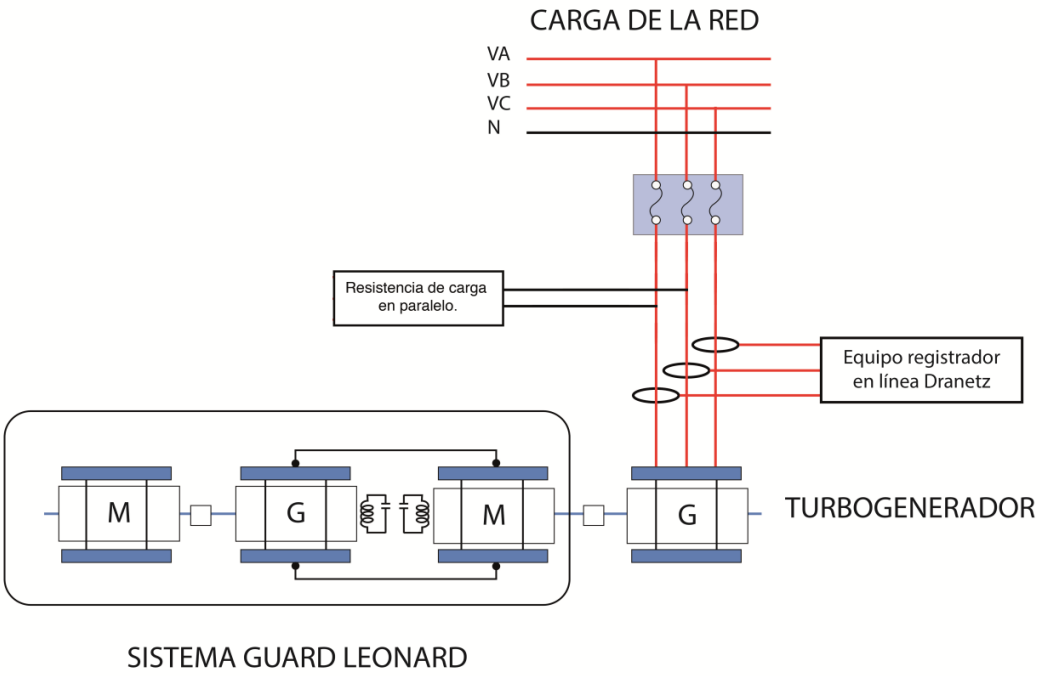


Figura 36. Montaje para la realización de las pruebas en sitio.



Figura 37. Resistencia de carga



## 5.2 Parámetros de la Prueba en Sitio

Una vez realizado el esquema de conexión en el laboratorio mostrado en la figura 35, 36 y 37 se procedió a llevar el turbogenerador a condiciones nominales de carga, se obtuvieron resultados del turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga al 75 % de la corriente nominal, procedimiento que no afecta los resultados, puesto que lo que se busca es observar los parámetros del turbogenerador cuando existe un equilibrio de corrientes.

De igual forma se realizan dos casos de desequilibrio de magnitud: el primer caso con un desequilibrio de aproximadamente 107% en la fase A al 0.81pude corriente nominal y el segundo caso de desequilibrio de110% en la fase A al 1.08pu de la corriente nominal, estos valores son los más aproximados a los valores de las simulaciones puesto que resultó muy difícil llevar el turbogenerador en sitio, a valores exactos como planteados en las simulaciones.

Cómo resistencia de puesta a tierra se usó una resistencia shunt de **25,6mΩ**.

Tabla 21.Corriente y voltaje de excitación del turbogenerador para todos los casos.

| | |
|---|---|
| **Corriente de Excitación** | 10.5 A |
| **Voltaje de Excitación** | 35 V |

### 5.2.1 Voltajes de Fase y Neutro

En la tabla22se muestran los voltajes de fase y neutro en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga obtenidos durante la prueba realizada en el laboratorio

Tabla22.Voltajes de fase y neutro del turbogenerador en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga.

| Voltajes de Fase | | | |
|---|---|---|---|
| **Fase** | **Equilibrado [V]** | **Desequilibrado107% [V]** | **Desequilibrado 110% [V]** |
| A | 131.9 | 132.2 | 132.9 |
| B | 131.7 | 132.0 | 132.8 |
| C | 131.5 | 131.4 | 132.1 |
| Neutro | 13.50 | 13.66 | 15.33 |

## *5.3 Resultados de la Prueba en Sitio*

### 5.3.1 Variación de las Corrientes de Fase, Componentes Simétricas

En la tabla 23 se presentan las corrientes de fase y las corrientes de secuencia positiva negativa y cero para los casos en que el turbogenerador se encuentra en equilibrio y desequilibrio de carga en magnitud, se detalla en qué porcentaje se va desequilibrando la fase A y a partir de ella se puede observar como las corrientes de secuencia negativa y cero aumentan su valor conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio de carga.

Tabla 23.Variación de las corrientes de fase y las componentes simétricas cuando la maquina se encuentra en equilibrio y desequilibrio de carga.

| VARIACIÓN DE $I_a$ | CORRIENTES DE FASE [A] | | | | COMPONENTES SIMÉTRICAS FASE A [A] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | $I_a$ | $I_b$ | $I_c$ | $I_n$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_0$ |
| 100 | 52.97 | 48.17 | 48.50 | 0.226 | 50.76 | 2.799 | 0.044 |
| 107 | 56.67 | 52.54 | 52.09 | 0.227 | 53.27 | 3.123 | 0.048 |
| 110 | 77.61 | 71.83 | 70.90 | 0.302 | 66.32 | 4.163 | 0.102 |

### 5.3.2 Medición de Energía

Se tomaron los datos de energía total y energía en el neutro estando el turbogenerador en situación de equilibrio y desequilibrio de carga. Se observa que cuanto más aumenta el porcentaje de desequilibrio, la potencia total aumenta y la potencia medida en el neutro es mayor como consecuencia del aumento de corriente cero por esta rama.

Tabla 24. Variación de la potencia total del turbogenerador, para condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga del 107% y 110 %.

| Energía | | | |
|---|---|---|---|
| | Equilibrado[W] | Desequilibrado 107% PU [W] | Desequilibrado 1.10% PU [W] |
| Total | 12998 | 13816 | 18533 |
| Neutro | 0.049 | 0,108 | 0,129 |

### 5.3.3 Armónicos de Corriente

En este apartado se muestra la variación de los armónicos de corriente de fase para cada caso de desequilibrio, como se observa en las figuras 38 a la 43, estas imágenes son tomadas del analizador de potencia DRANETZ y corresponden a los datos en línea, para los diferentes casos de desequilibrio, se presenta los resultados cuando el turbogenerador se encuentra en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga definidas en la tabla 23.

Figura 38. Armónicos de corriente para la fase A. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%.

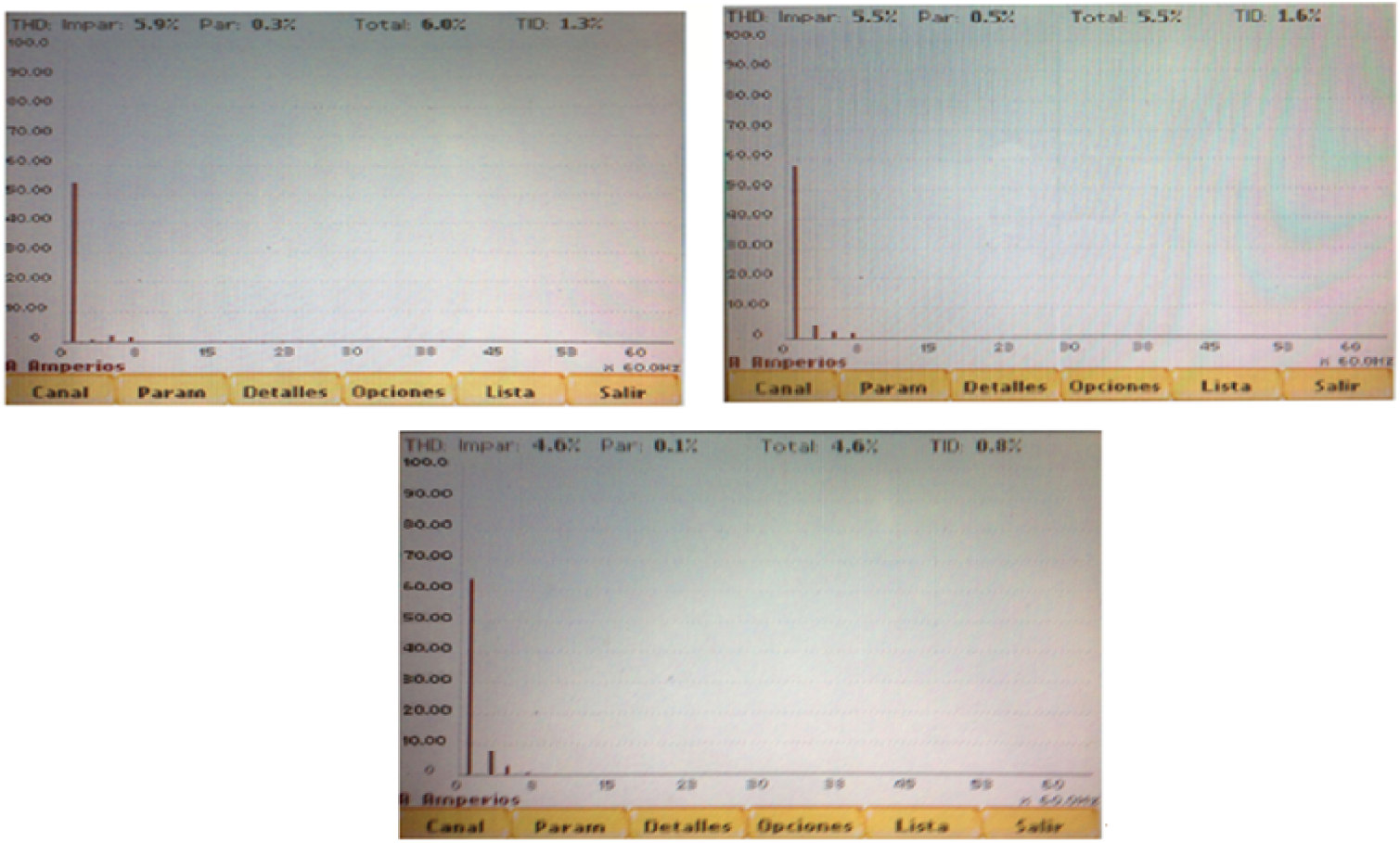


Figura 39. Armónicos de corriente para la fase B. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%.

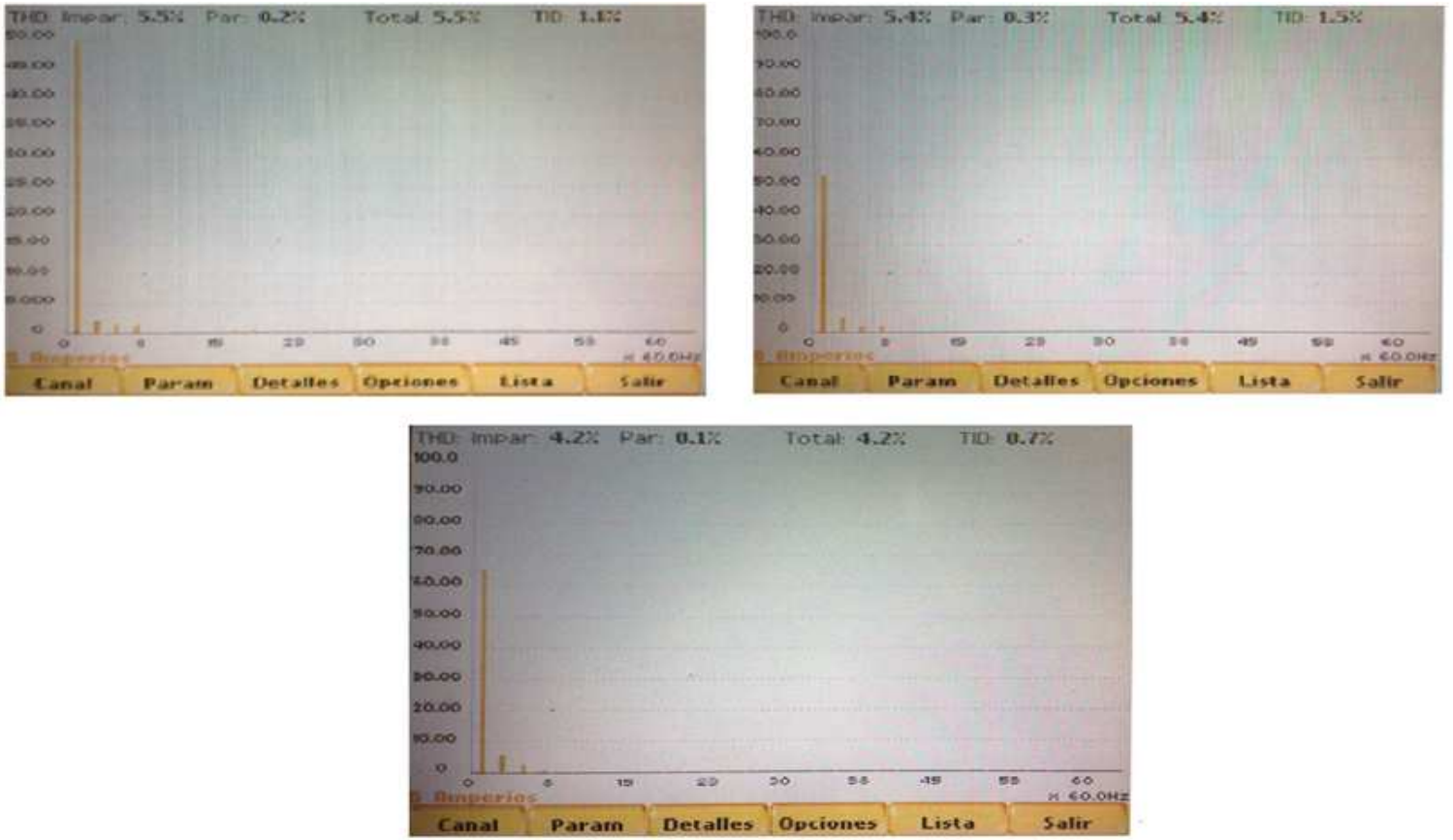


Figura 40.Armónicos de corriente para la fase C. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%.

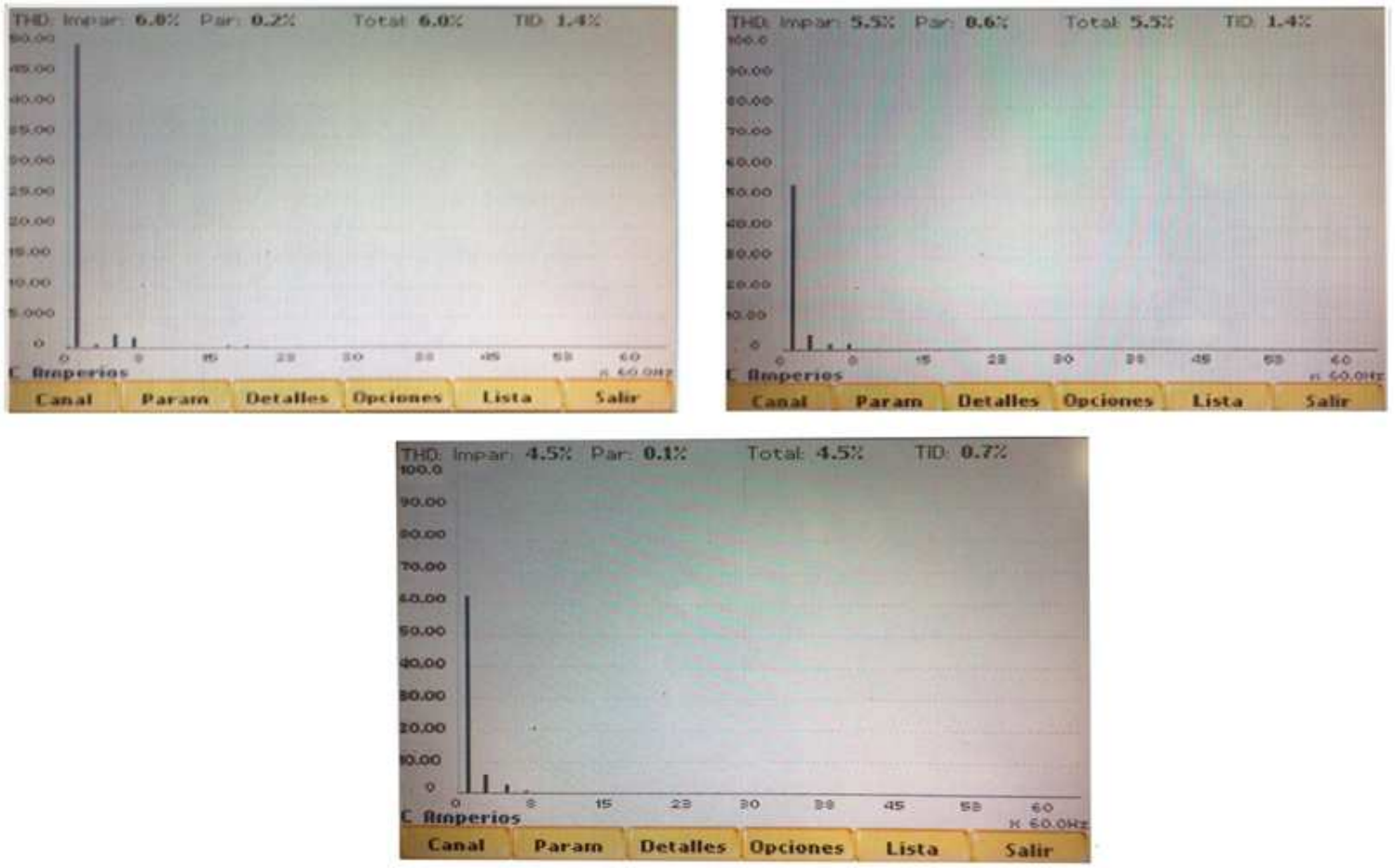
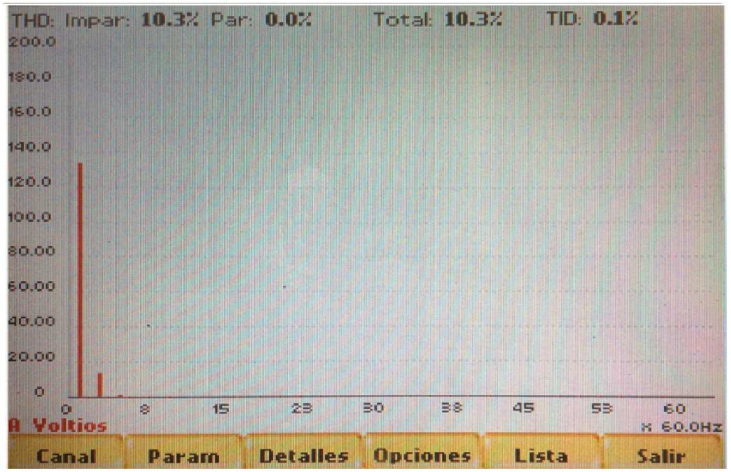
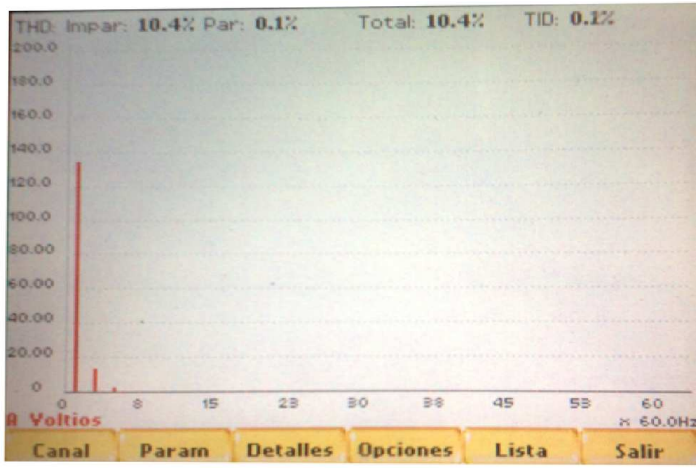


Figura 41.Armónicos de Voltaje para la fase A. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%.

.



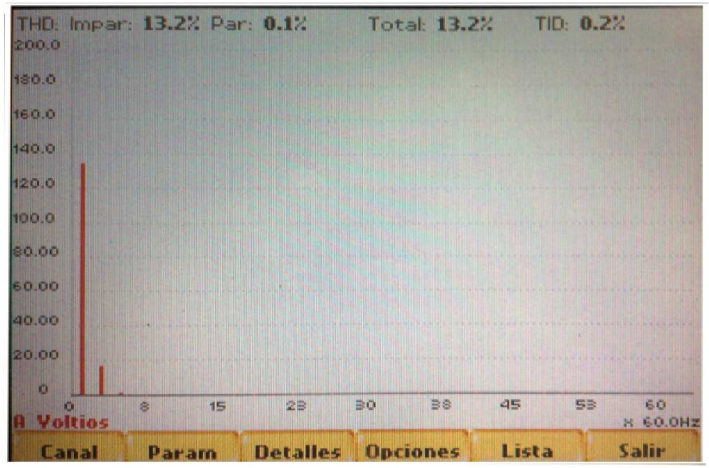



Figura 42.Armónicos de Voltaje para la fase B. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%.

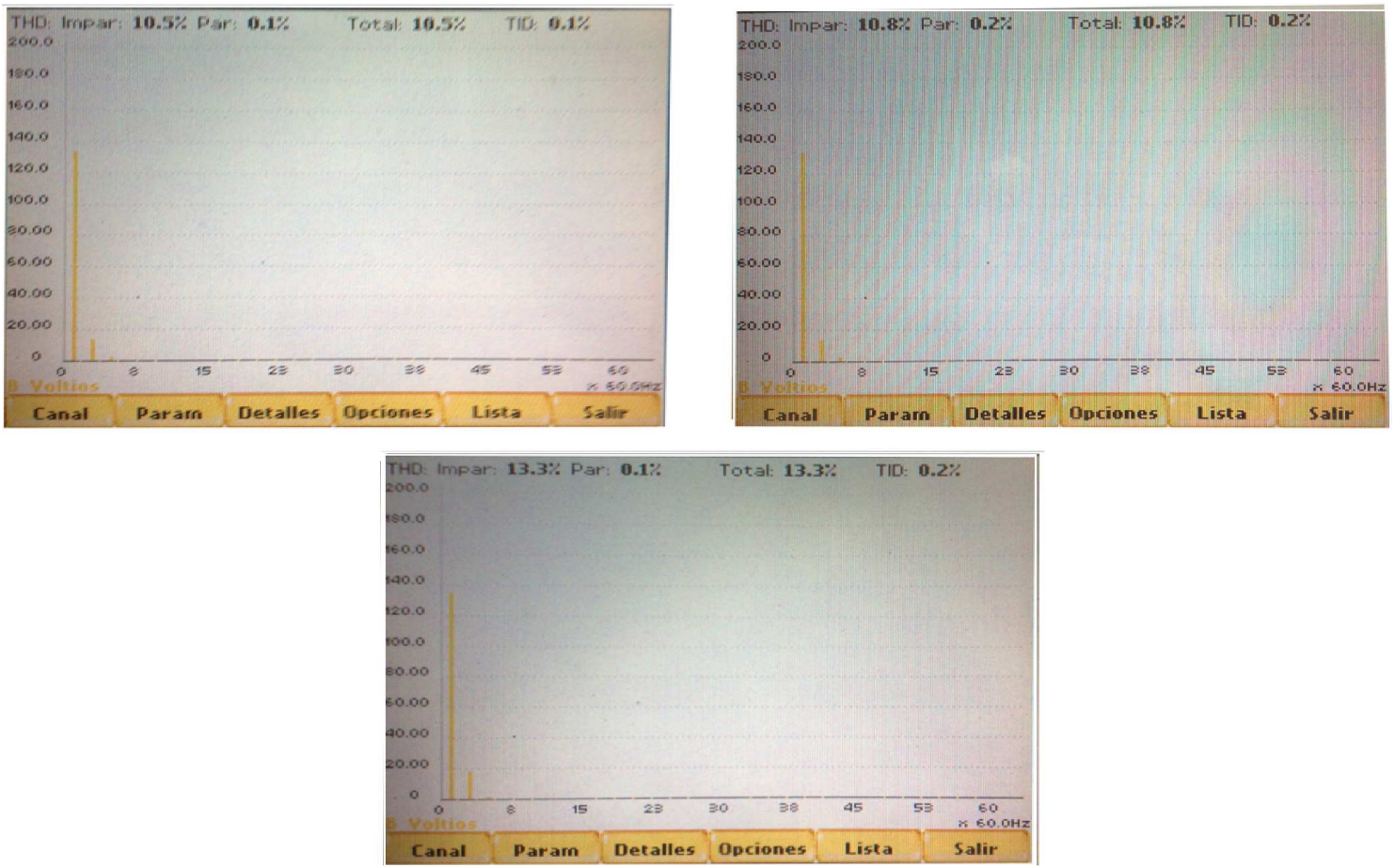
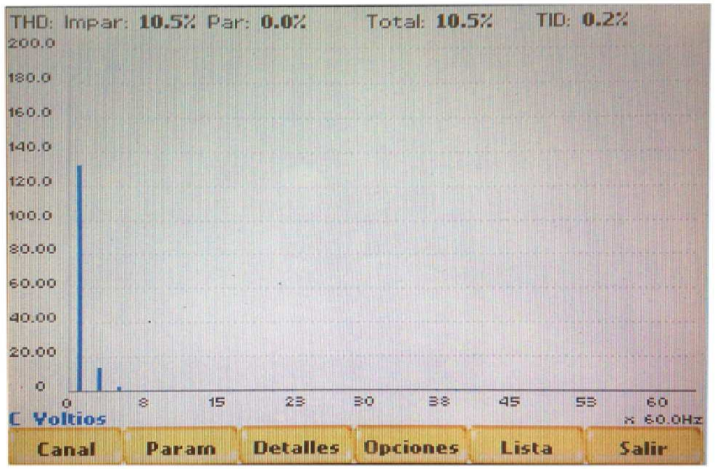
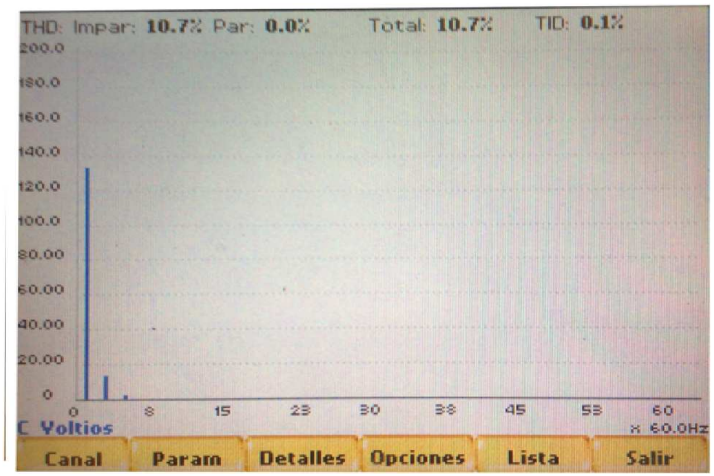
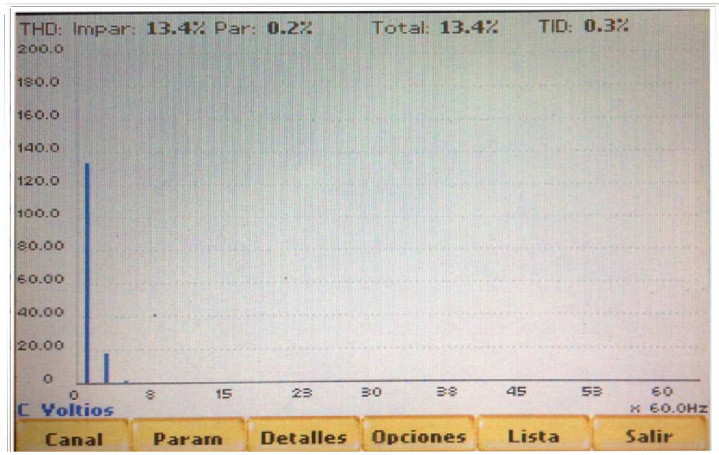


Figura 43. Armónicos de Voltaje para la fase C superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%.



En la tabla25 se agrupan los resultados de los armónicos de corriente de fase mostrados en las figuras 38 a la 40. Se aprecia un aumento en el armónico de corriente fundamental y una importante presencia del tercer armónico de corriente el cual aumenta conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio.

Tabla 25. Armónicos de corriente de fase, cuando el turbogenerador se encuentra en equilibrio de carga 100% y desequilibrio del 107% y 110% de la fase A.

| Armónicos de Corriente | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variación de Ia | Fase A [A] | | Fase B [A] | | Fase C [A] | |
| % | Armónico 1 | Armónico 3 | Armónico 1 | Armónico 3 | Armónico 1 | Armónico 3 |
| 100 | 53 | 2 | 49 | 3 | 49 | 2 |
| 107 | 58 | 3 | 53 | 4 | 53 | 4 |
| 110 | 65 | 6 | 65 | 5 | 62 | 5 |

En la tabla 26 se reúnen los resultados de los armónicos de voltaje de fase mostrados en las figuras 39 a la 43. Se observa que el armónico fundamental se mantiene constante y existe una importante presencia del tercer armónico de voltaje el cual aumenta conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio.

Tabla 26. Armónicos de voltaje de fase, cuando el turbogenerador se encuentra en equilibrio de carga 100% y desequilibrio del 107% y 110% de la fase A.

| Armónicos de Voltaje | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variación de $I_a$ | Fase A [V] | | Fase B [V] | | Fase C [V] | |
| % | Armónico 1 | Armónico 3 | Armónico 1 | Armónico 3 | Armónico 1 | Armónico 3 |
| 100 | 139 | 10.3 | 139 | 10.5 | 139 | 10.5 |
| 107 | 139 | 10.4 | 139 | 10.8 | 139 | 10.7 |
| 110 | 139 | 13.2 | 139 | 13.3 | 139 | 13.4 |

### 5.3.4 Armónicos de Corriente en el Neutro a Tierra del Devanado del Estator

En esta sección se muestra la variación de los armónicos de corriente y voltaje en el neutro a tierra del devanado del estator para cada caso de desequilibrio, como se observa en las figuras 44 a la 45, se presenta los resultados cuando el turbogenerador se encuentra en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga definida en la tabla 23.

Figura 44. Armónicos de corriente por el neutro. Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%

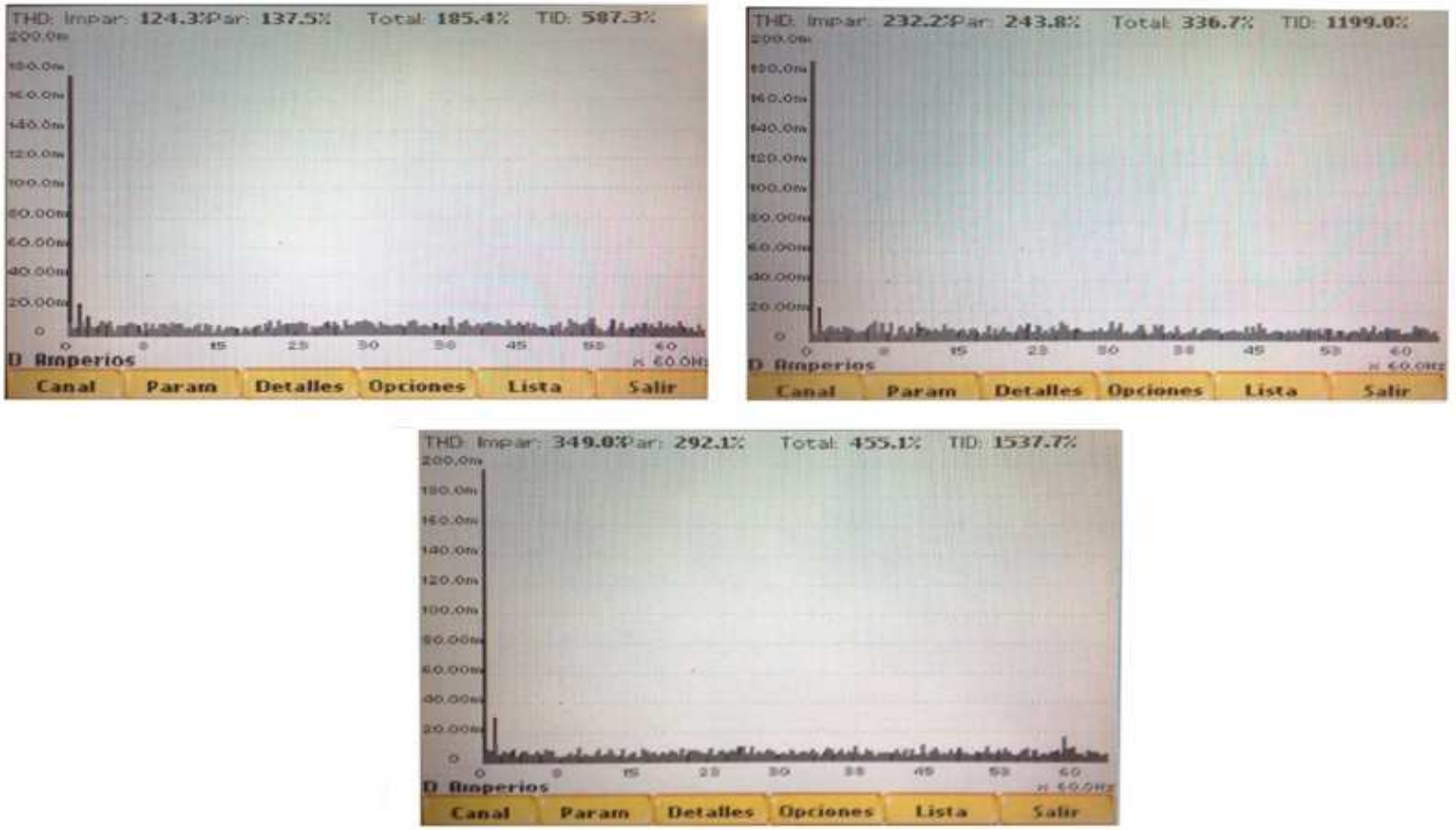
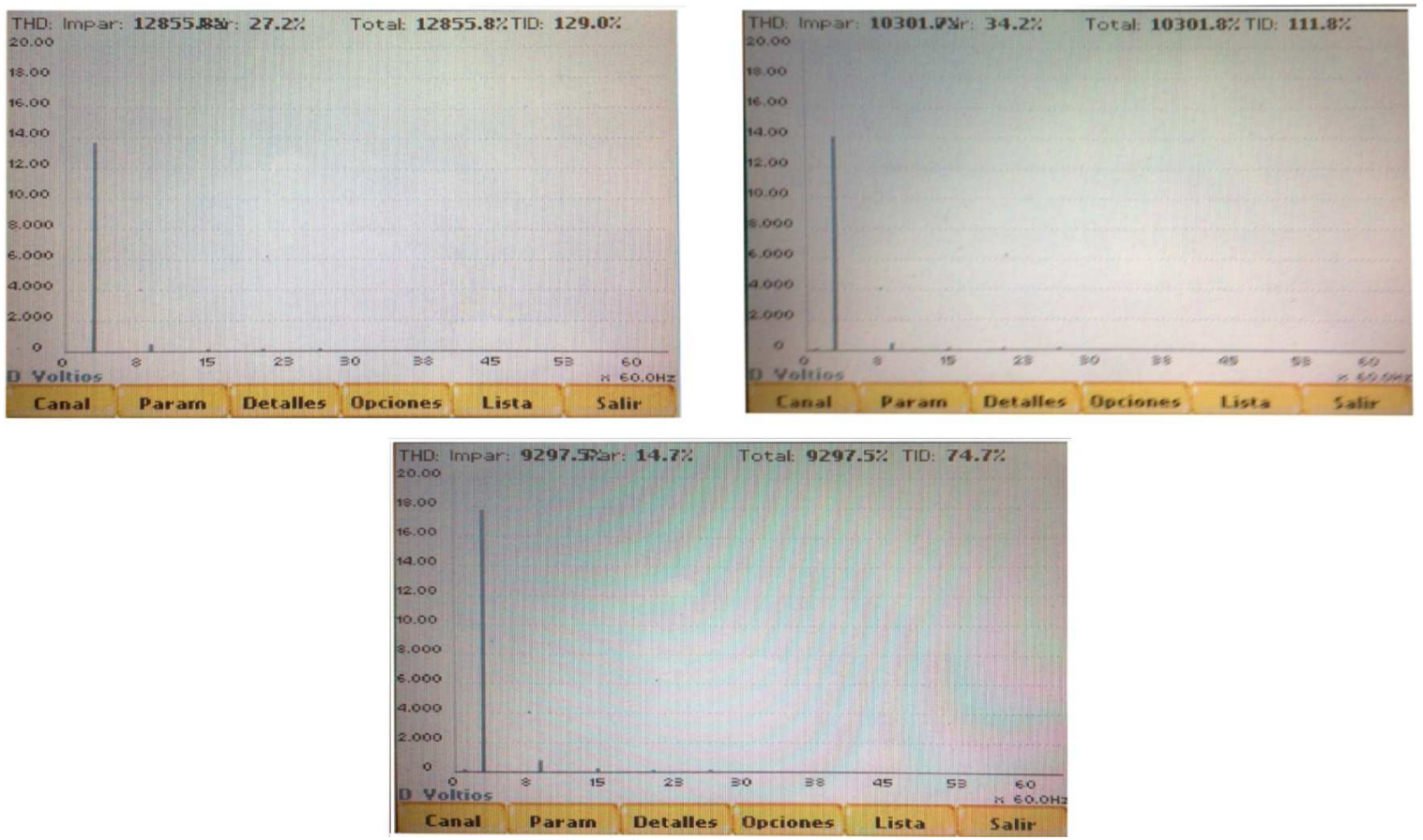


Figura 45.Armónicos de voltaje por el neutro Superior izquierda: equilibrada, superior derecha: desequilibrio al 107%, inferior centro: desequilibrio al 110%



En la tabla 27 se agrupan los resultados de los armónicos de corriente el neutro a tierra del devanado del estator en la figura 44. Se aprecia un aumento en el armónico de corriente fundamental y el tercer armónico de corriente conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio, en donde se comprueba lo expresado en el numeral (4.1.2.1.8), se logra apreciar que para un desequilibrio del 110% el valor del tercer armónico de corriente en el neutro es aproximadamente tres veces los armónicos de corriente de fase (ver tabla 25).

Tabla 27. Armónicos de corriente por el neutro: equilibrio al 100%, desequilibrio al 107 y 110%

| Variación de la | I neutro | |
|---|---|---|
| | Armónico 1 | Armónico 3 |
| % | [mA] | [mA] |
| 100 | 175 | 22 |
| 107 | 185 | 22 |
| 110 | 195 | 25 |

En la tabla 28 se reúnen los resultados de los armónicos de voltaje de fase mostrados en la figura 45. Se observa que el armónico fundamental de voltaje es nulo y existe un aumento del tercer armónico de voltaje, el cual aumenta conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio.

Tabla 28. Armónicos de voltaje por el eje: equilibrio al 100%, desequilibrio al 107 y 110%

| Variación de la | V neutro | |
|---|---|---|
| | Armónico 1 | Armónico 3 |
| % | [V] | [V] |
| 100 | 0 | 13 |
| 107 | 0 | 14 |
| 110 | 0 | 17 |

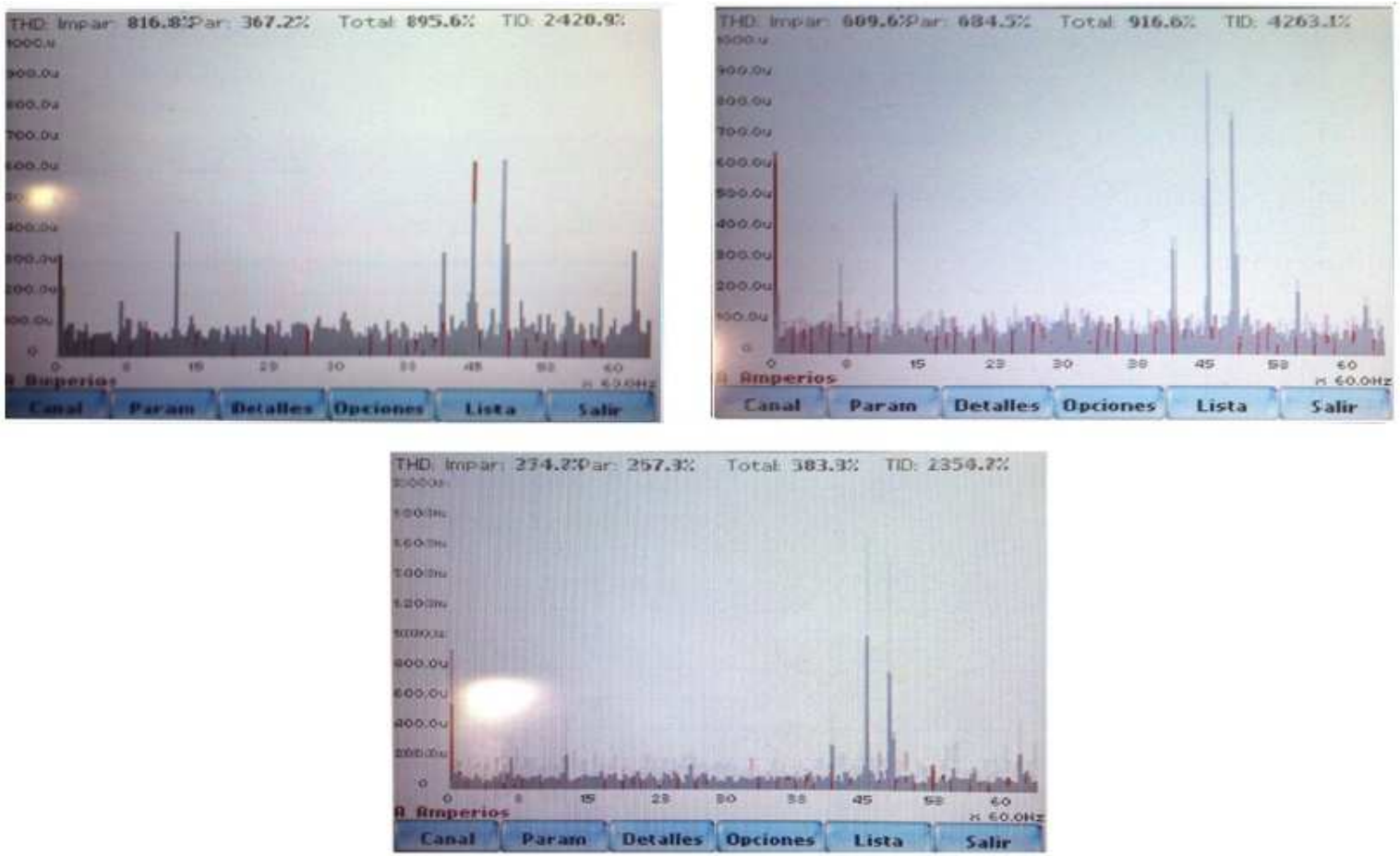
### 5.3.5 Corriente por el Eje

En la tabla 29 se presentan las corrientes inducidas en el eje de la figura 46, en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga. La magnitud de la corriente es del orden de micro Amper, igual al obtenido en las simulaciones, lo que nos permite observar que el aumento en el porcentaje de desequilibrio de carga, representa un importante incremento de corriente que pueda afectar el eje y generar pérdidas considerables. Si bien las corrientes en el eje en este caso de estudio pueden ser consideradas bajas en una máquina de mayor potencia cobrara más importancia.

Tabla 29. Corriente por el eje cuando el turbogenerador se encuentra en equilibrio de carga al 100%, desequilibrio al 107y 110%.

| Variación de la | I eje |
|---|---|
| % | Armónico 1 [uA] |
| 75 | 320 |
| 80 | 650 |
| 107 | 850 |

Figura 46. Corriente por el eje. Superior izquierda: equilibrio al 75%, superior derecha: desequilibrio al 80%, inferior centro: desequilibrio al 107%



### 5.3.6 TIF del turbogenerador para la prueba en sitio

En la tabla30seobserva el TIF del turbogenerador en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga en magnitud, obtenida en las pruebas realizadas en el laboratorio, se observa que el TIF aumenta con conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio sin embargo sigue estando dentro de los parámetros de las tablas 5 y 6.

Tabla 30.TIFdel turbogenerador en condiciones de equilibrio de carga en magnitud.

| TIF | | | |
|---|---|---|---|
| **Fase** | **Equilibrado** | **Desequilibrado 107%** | **Desequilibrado 110%** |
| A | 17.21 | 17.59 | 19.57 |
| B | 18.35 | 18.43 | 19.92 |
| C | 17.6 | 17.64 | 20 |
| Neutro | 17.01 | 19.31 | 13.47 |

# 6 ESTUDIO TÉRMICO DEL TURBOGENERADOR

Es de gran importancia estudiar la capacidad térmica transitoria de grandes turbogeneradores ya sea en la prevención de fallas o en el mejoramiento de su desempeño eléctrico o mecánico puesto que de las condiciones térmicas de operación depende la vida útil del turbogenerador.

En el presente capítulo se estudia el comportamiento térmico del turbogenerador cuando es sometido a desequilibrios de carga en magnitud, y como térmicamente se relaciona con el comportamiento eléctrico y magnético estudiado en los capítulos anteriores.

La corriente de secuencia negativa que surge como consecuencia de un sistema con desequilibrio de carga produce un campo electromagnético giratorio contrario al sentido de rotación del rotor. En vista del marco de referencia del rotor, esta corriente de secuencia negativa en el devanado del estator alimentado por una fuente de alimentación de 60 Hz AC inducirá 120 Hz en los devanados del rotor y en el núcleo. En consecuencia, las corrientes armónicas del doble de frecuencia causarán pérdidas por corrientes parásitas adicionales, aumentando la temperatura de operación del generador, y dando lugar a disminuir su eficiencia y estabilidad [35]. Consecuentemente, se hace necesario entender la aparición de corrientes de secuencia negativa desde el punto de vista de la capacidad térmica transitoria y el funcionamiento seguro del turbogenerador.

Para realizar este estudio, se emplearon dos métodos; simulaciones térmicas en MEF e imágenes termográficas tomadas durante la prueba de desequilibrio de carga realizadas en el laboratorio.

## 6.1 Estudio térmico MEF del Turbogenerador en Condiciones de Equilibrio y Desequilibrio de Carga

Para llevar a cabo el modelo MEF térmico se construyó un modelo magneto térmico, a partir del modelo electromagnético validado del turbogenerador en el capítulo 3, adicionando la conductividad térmica y el calor especifico a los materiales. En este estudio debe ser considerada la variación de la resistencia óhmica del cobre con la temperatura, la resistividad del acero del estator y el rotor se conserva fija como lo define (98), la cual es prácticamente invariable hasta 200 ℃. [32].Como —FLUX 2D® no simula regiones sólidas rodeadas por un fluido, el entrehierro y el exterior del estator se limitan con “line-regions”, y se asigna un coeficiente convectivo equivalente, el cual determina la cantidad de calor que se extrae del rotor y del estator a través del entrehierro.

En la figura 47 y 48 se muestra la simulación térmica en el rotor y estator cuando el turbogenerador se encuentra en condiciones equilibradas de carga

Figura. 47. Perfil térmico del rotor del  en condiciones equilibradas de carga en magnitud [℃]

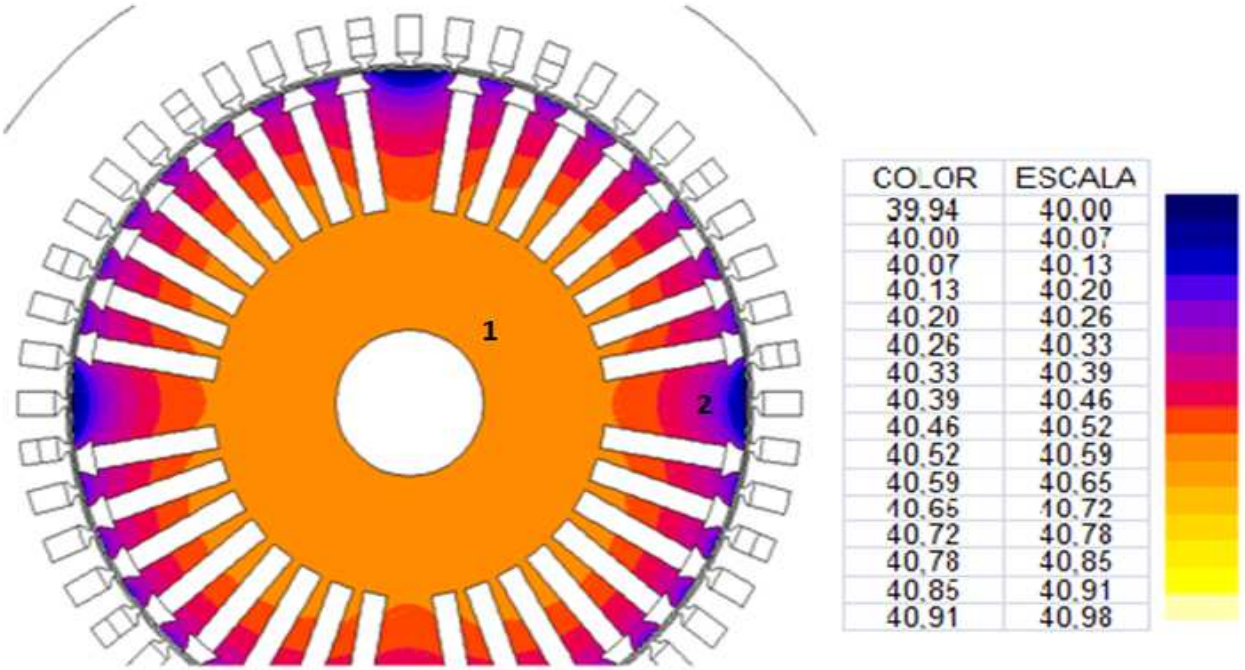
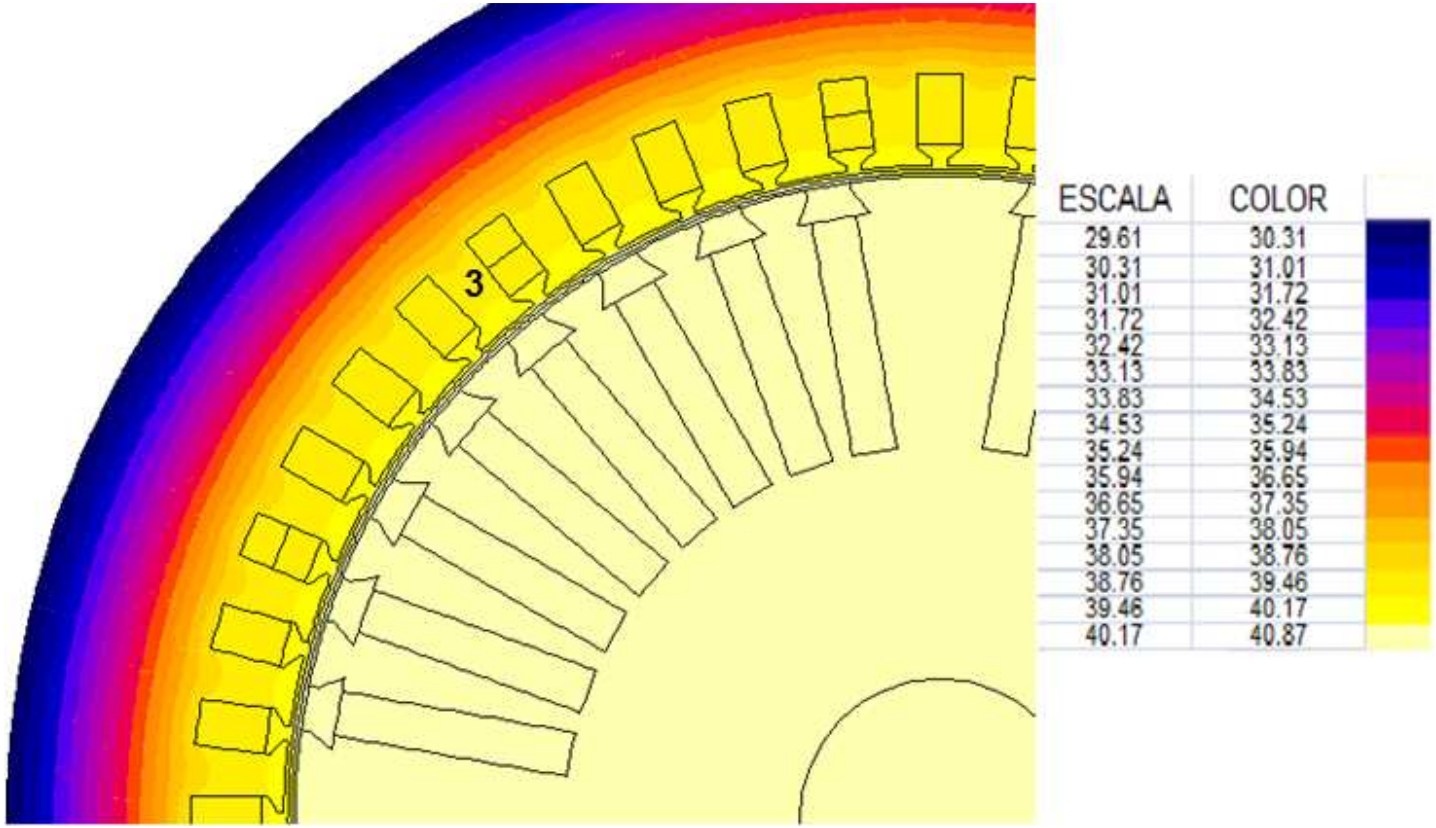


Figura. 48. Perfil térmico del estator del  en condiciones equilibradas de carga en magnitud [℃]



### 6.1.1 Estudio Térmico de MEF para el Turbogenerador en Condiciones de Desequilibrio de Carga

Para este estudio se realizan simulaciones MEF térmicas al turbogenerador para un desequilibrio de carga del 102%, 104%, 107% y 111%.

Debido a que la componente de secuencia negativa del estator, crea campo magnético que gira a la velocidad sincrónica pero en sentido inverso de rotación del rotor, el cual induce sobre éste corrientes parásitas del doble de la frecuencia, creando un par de frenado sobre el rotor, causando pérdidas notables en el devanado de excitación y la cara polar.
El efecto térmico localizado se aprecia en los diferentes perfiles térmicos mostrados en la figura 49 y 50.Debido a la alta densidad de pérdidas se puede llegar a superar temperaturas admisibles en las áreas donde este fenómeno se acentúa (ver numeral 2.1.5.1). Este fenómeno se manifiesta como un incremento de las vibraciones

Para esta simulación magneto-térmica fue necesario establecer iguales condiciones en los diferentes porcentajes de desequilibrio de tal manera que se pudieran analizar las diferencias de calentamiento en el rotor y los devanados del estator. Los parámetros que se dejaron estándar son: tiempo, rango de datos y carta de colores.

Figura49. Perfil térmico rotor del turbogenerador en condiciones desequilibradas de carga en magnitud (Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%).

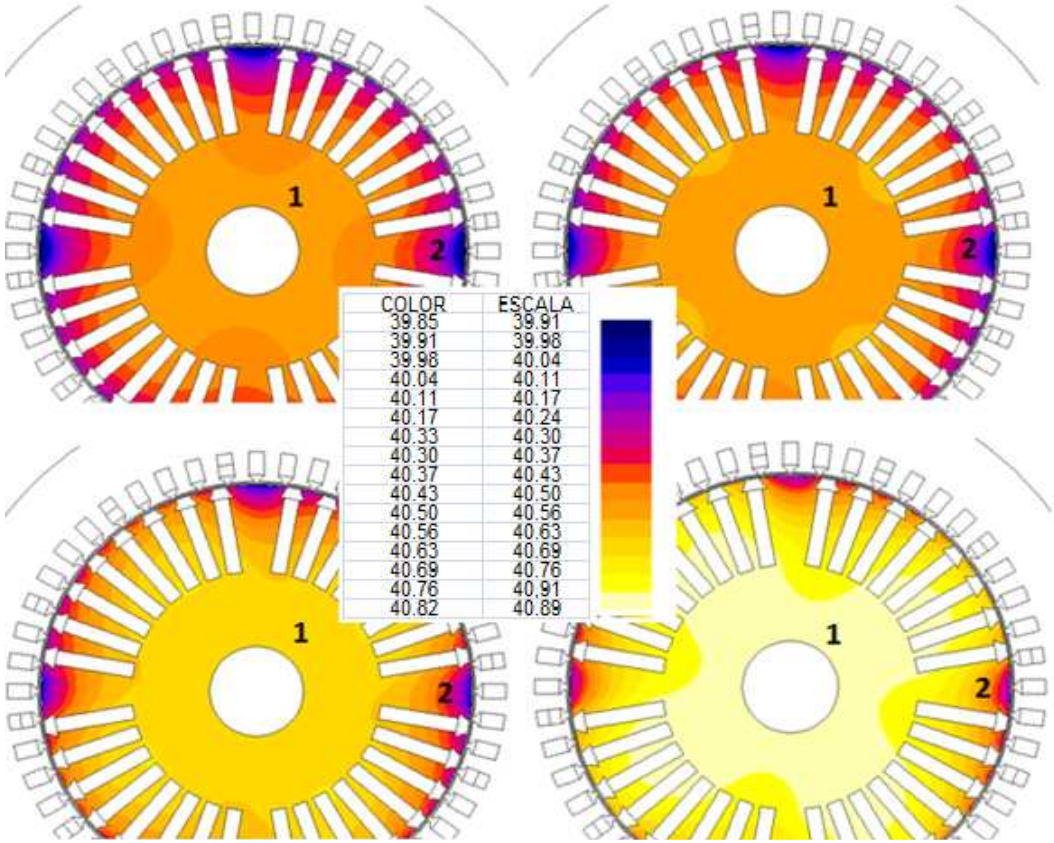
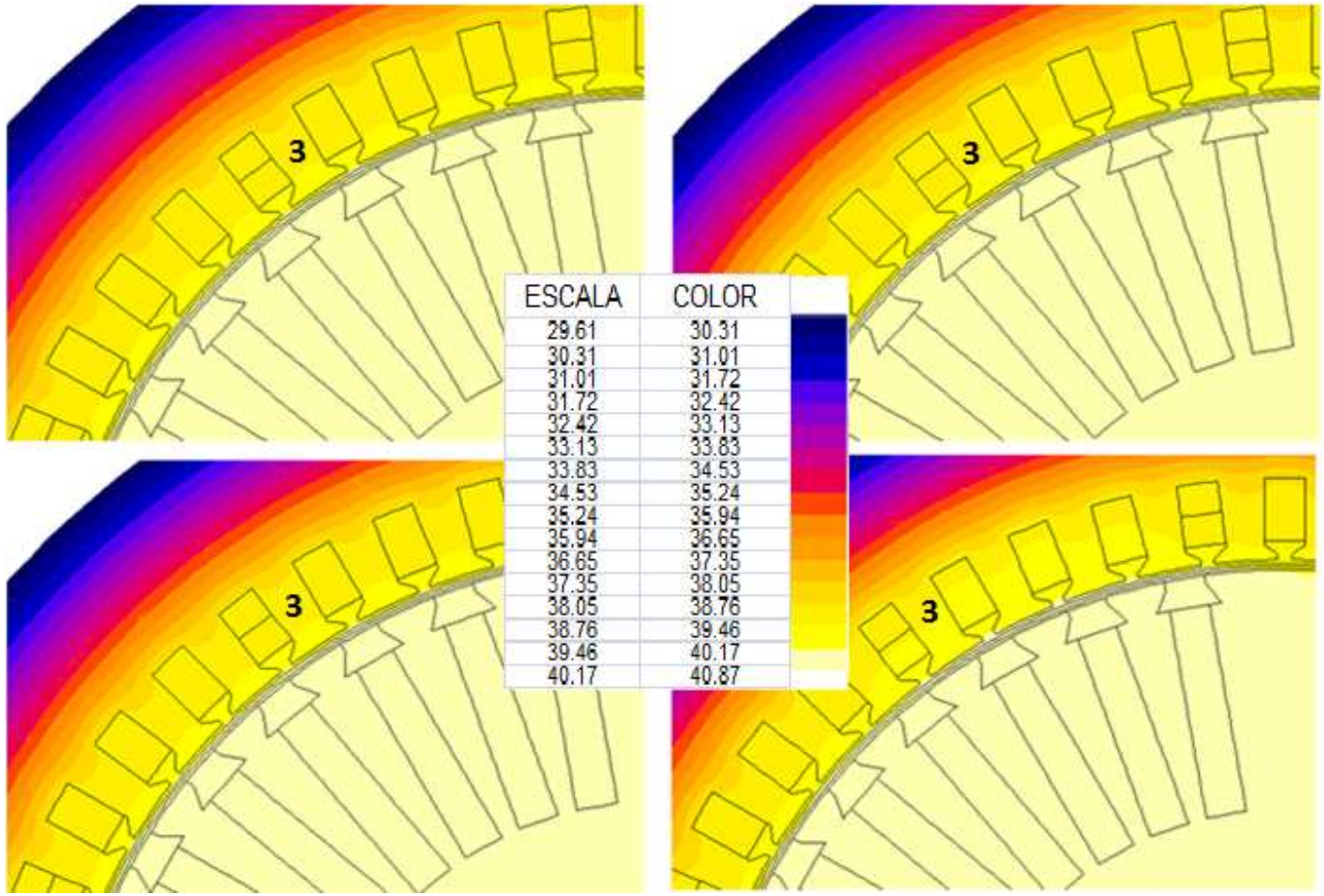


Figura 50. Perfil térmico estator del turbogenerador en condiciones desequilibradas de carga en magnitud (Superior izquierda: desequilibrio al 102%, superior derecha: desequilibrio al 104%, inferior izquierda: desequilibrio al 107%, inferior derecha: desequilibrio al 111%).



#### 6.1.1.1 Variación de la Temperatura en el Rotor y Estator

Se realizó la tabulación de los resultados de las simulaciones térmicas de las figuras 47 a la 50, se resaltan tres puntos importantes en las imágenes, el primer punto corresponde al rotor, el segundo punto a la cara polar del rotor y el tercer punto al devanado del estator. En la tabla 31 se consigna la temperatura en el mismo punto cuando el turbogenerador se encuentra en equilibrio y desequilibrio de carga.

En el análisis térmico en el rotor (punto 1-2 figuras 47-49) del turbogenerador, se observa un aumento de la temperatura conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio, este aumento en la temperatura en el rotor amplía las pérdidas en la superficie y podría llegar a reducir la dureza superficial del núcleo del rotor aumentando las probabilidades de grietas o rupturas, adicional a esto, se da un calentamiento en las cuñas y el cobre, ocasionando esfuerzo sobre los anillos de retención como se mencionó en el numeral 2.1.1.2.

En devanado del estator (punto 3 figura 48 -50) se puede observar un incremento de aproximadamente 1℃ conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio lo que genera pérdidas por calentamiento y deterioro del aislamiento del cobre reduciendo la vida útil de la máquina.

Tabla 31. Variación de la temperatura en el rotor y estator para los diferentes casos de desequilibrio.

| Desequilibrio de carga | (1)Rotor | (2) Cara polar rotor | (3) Devanado del estator |
|---|---|---|---|
| | Temperatura (℃) | Temperatura (℃) | Temperatura (℃) |
| 100% | 40.5 | 39.85 | 37.66 |
| 102% | 40.5 | 39.85 | 38.76 |
| 104% | 40.56 | 39.98 | 38.76 |
| 107% | 40.76 | 40.17 | 39.46 |
| 111% | 40.89 | 40.31 | 40.17 |

## *6.2 ESTUDIO TÉRMICO EN SITIO DEL TURBOGENERADOR EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y DESEQUILIBRIO DE CARGA*

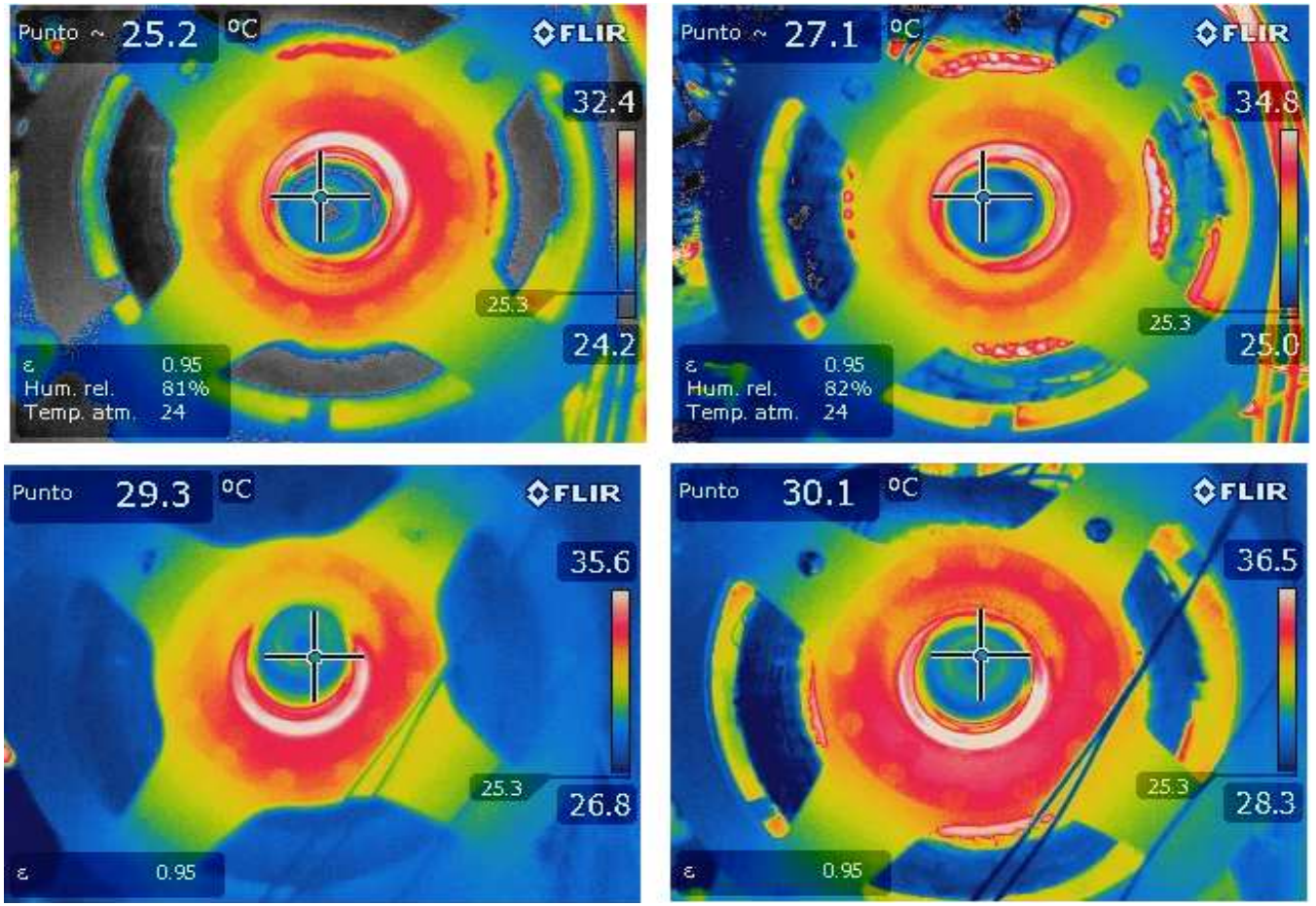
La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el turbogenerador. Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras termográficas, se puede convertir la energía radiada en imágenes lo que proporciona información sobre la temperatura de las diferentes partes del turbogenerador, y es de gran ayuda para detectar puntos calientes o fríos. Para este caso de estudio, la termografía permite observar los cambios de temperatura en diferentes puntos del turbogenerador conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio de carga.

La obtención de las termografías se realizó en el laboratorio a la par con las pruebas de equilibrio y desequilibrio de carga, se tomaron diferentes imágenes termográficas para cada caso de estudio tratando de conservar igual distancia y posición en la toma de las imágenes, con tiempos de 20 minutos entre los diferentes casos para la estabilización de los parámetros.

Se dividió el estudio en 4 momentos mostrados en la figura 51, el primero cuando el turbogenerador se encuentra en vacío y se ha estabilizado térmicamente, luego se procedió a colocar carga y llevarlo a condiciones de equilibrio de carga, posteriormente se tomaron imágenes termográficas para los dos casos de desequilibrio.

Cuando se encuentra en estado de equilibrio se registra un máximo de temperatura de32.4℃ y a medida que se va desequili brando la carga del turbogenerador produce un aumento de dos grados en la temperatura del rotor. Para el devanado del estator no se muestra cambio importante.

Figura 51. Perfil térmico rotor del turbogenerador: vacío superior izquierda, en condición de equilibrio de carga superior derecha, desequilibrio al 107% inferior izquierda, desequilibrio al 110%).inferior derecha.



Se realiza la tabulación de los resultados térmicos de la figura 51 y se exponen en la tabla 32, donde se detallan las diferentes condiciones a las que es sometido el turbogenerador, registrando la temperatura de entrada y de salida tomadas con la cámara termográfica y el porcentaje de corriente de secuencia negativa que se genera para las diferentes condiciones a la que es llevada la máquina.

Para efectos de evaluación de la norma [18] listados en la tabla 1 se realizó la proyección agregando dos casos de desequilibrio de carga para observar cuánto aumentaría la temperatura del turbogenerador en el caso que se llevara la máquina a condiciones cercanas de $I_2 = 10\%$ que es el rango permitido por norma

Tabla 32. Temperaturas del rotor y porcentaje de corriente de secuencia negativa cuando el turbogenerador se encuentra en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga.

| Condición | Temperatura en el rotor Entrada [℃] | Temperatura en el rotor Salida [℃] | % $I_2$ |
|---|---|---|---|
| Vacío sin excitación | 28 | 29 | - |
| Vacío con excitación | 30 | 30 | - |
| Equilibrado | 32 | 34 | 5,81 |
| Desequilibrio 107% | 34 | 35 | 5,94 |
| Desequilibrio 110% | 35 | 36 | 6,42 |
| Proyección 1 | **41** | **43** | **8,34** |
| Proyección 2 | **46** | **49** | **9,78** |

En la figura 52 se observa la relación entre la variación de la temperatura en el rotor y las pérdidas asociadas a la máquina a medida que al turbogenerador se desequilibra la carga, se aprecia el aumento en 3℃ cuando el turbogenerador pasa de la condición de vacío a carga con un desequilibrio del 110% en la fase A. Se toman los deltas de temperatura y corriente de secuencia inversa entre el caso con carga al 107% respecto al caso equilibrado (ΔT=2℃) y entre el caso con carga al 110% con respecto al caso con carga al 107% (ΔT=1℃), y se proyectan estos aumentos de temperatura de manera tal que la corriente de secuencia negativa alcance el 9,78% de la corriente nominal (estando dentro de los límites de la norma), la temperatura en el rotor alcanzaría los 46℃ lo cual representa un

aumento bastante significativo de temperatura comparado con las condiciones de equilibrio de carga.
Observando la regla que dice que por cada 10℃ de temperatura de operación, la vida útil de la maquina se reduce a la mitad. Entonces para el caso la maquina operando con el porcentaje de corriente de secuencia negativa permitido por norma la vida útil de la maquina se reducirá más de la mitad del tiempo de acuerdo con la tabla 32

Figura 52. Variación de la temperatura respecto de la potencia para las diferentes condiciones de operación del turbogenerador en sitio.

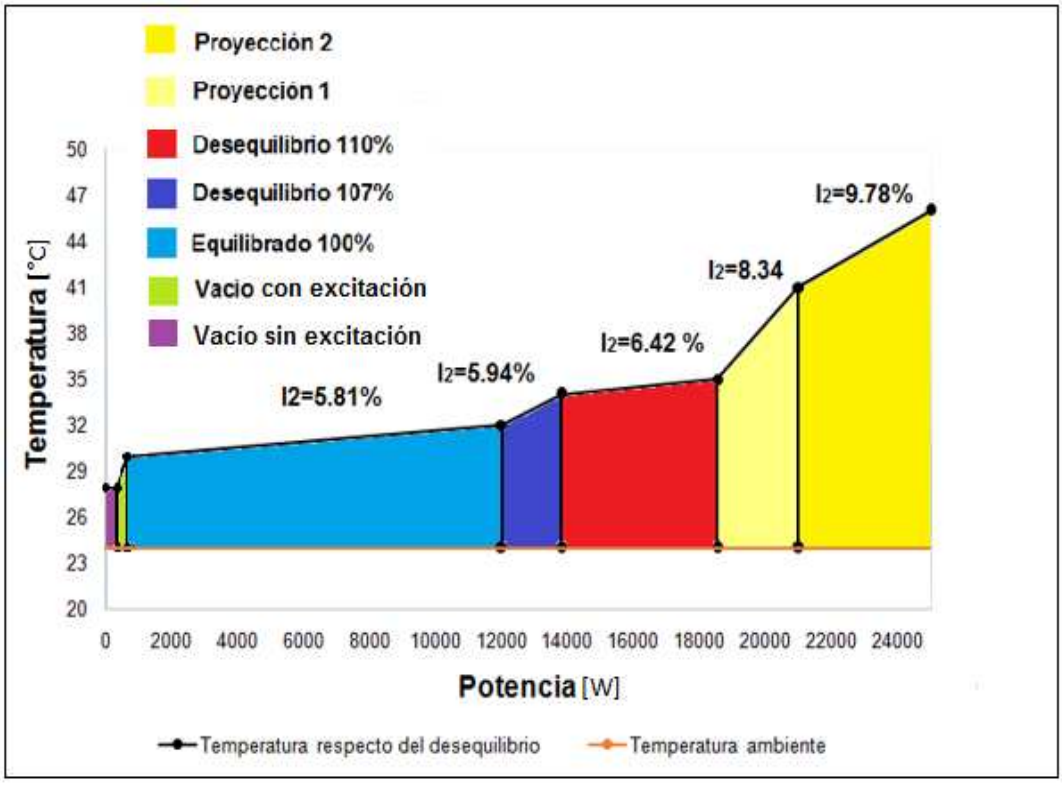
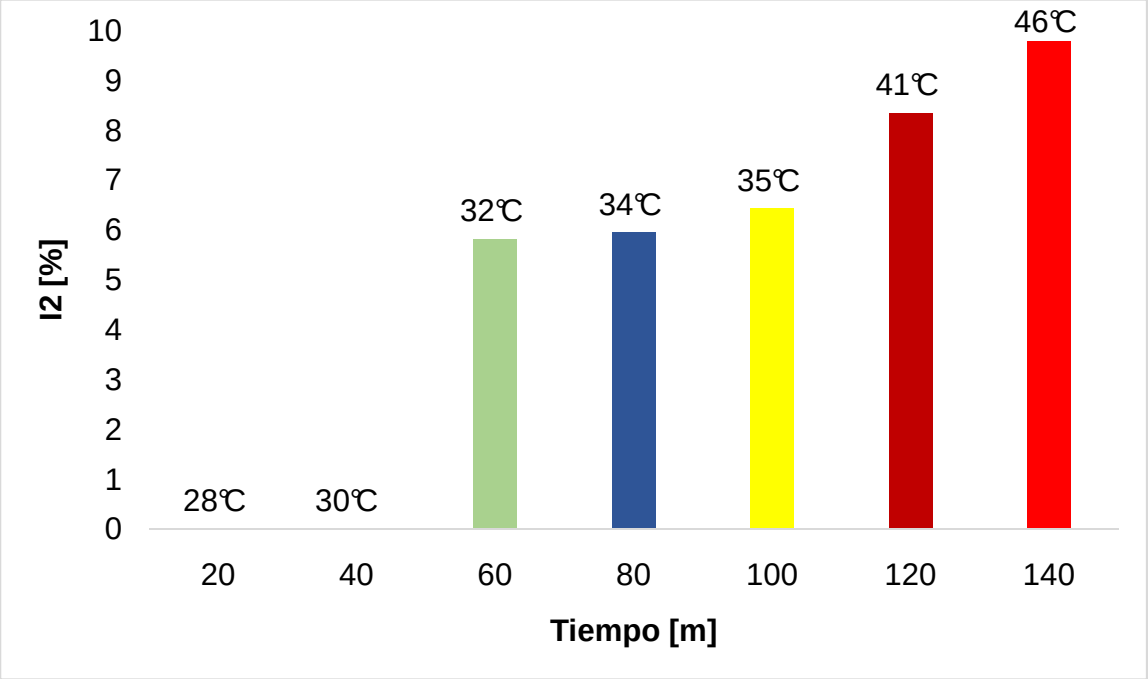


Figura 53. Variación de la temperatura respecto de la corriente de secuencia negativa y el tiempo de estabilización de la prueba.



# 7 CONCLUSIONES

- Cuando existe un desequilibrio de carga en el turbogenerador, se observa un incremento de la componente de secuencia negativa, la cual crea un campo magnético de secuencia inversa, que a su vez induce una F.e.m en el rotor y un torque de frenado sobre este.

- Se observó que conforme se desequilibra la carga en el turbogenerador, se incrementa la densidad de corriente en el rotor y esto se hace más notorio en la cara polar. conduciendo al aumento de temperatura del rotor.

- La densidad de flujo del entrehierro cuando se desequilibra la máquina no varía considerablemente en magnitud ni forma.

- Los generadores pequeños poseen una distorsión armónica de voltaje y corriente que aunque estén dentro de los parámetros de norma potencialmente crean distorsiones y generaran corrientes armónicas, de las cuales las de orden n*m se van por el neutro.

- Los límites existentes en la circulación de corriente de secuencia negativa en turbogeneradores, establecidos en la normatividad, se quedan cortos en considerar el aumento de temperatura debido a la corriente de secuencia negativa.

- El contenido armónico en los turbogeneradores incrementa con el desequilibrio de carga, debido a la reacción de armadura y la saturación, variando con el factor de potencia de la máquina

- El aumento de la corriente de secuencia cero y negativa debido al incremento de desequilibrios de carga en el turbogenerador aumenta las perdidas y reduciendo la eficiencia de la maquina

- Cada armónico de corriente posee componentes de secuencia positiva, negativa y cero, ocasionando que por el neutro aparezcan corrientes de múltiples frecuencias

- Las componentes de secuencia cero de los armónicos de tercer orden se suman por el neutro, efecto que no es considerado en coordinación de protecciones de la máquina.

- Se identificó que aún no existe una normatividad vigente referente a las corrientes de secuencia cero por el neutro a tierra en turbogeneradores así como información clara sobre la misma.

- Se observa la aparición de armónicos de quinto orden que inducen un par de frenado en la maquina conforme aumenta en desequilibrio de carga.

- El desequilibrio de carga, representa un incremento en la corriente y el voltaje en el eje, lo cual no es muy notorio en máquinas de bajas potencia pero si puede llegar a ser relevante en máquinas de grandes potencias, causando deterioro en rodamientos y núcleo.

- A partir de las simulaciones térmicas para los diferentes casos de desequilibrios se pudo apreciar que: conforme aumenta el porcentaje de desequilibrio aumenta la temperatura del estator, lo cual equivale a la reducción de la vida útil del aislamiento del devanado del estator y un riesgo en el daño de la misma.

- La valoración del comportamiento térmico del rotor de un generador sincrónico, realizada mediante la aparición de corriente de secuencia negativa resulta ser conservadora. Su apreciación es mayor conforme aumenta el desequilibrio y aumenta la circulación de corrientes

- La evaluación térmica del comportamiento de la máquina frente a la corriente de secuencia negativa es más fácil hacerse comparando las potencias disipadas en los devanados con las pérdidas producidas en condiciones de equilibrio y desequilibrio de carga

- El límite del 10% de corriente de secuencia negativa permitido por norma, se queda corto dado que se comprobó, que el aumento de temperatura en el rotor es considerable cuando la corriente de secuencia negativa de la maquina es del 10% de la corriente nominal razón por la cual se debe considerar reducir el porcentaje permitido en la norma.

- Se comprobó mediante pruebas en sitio y simulaciones MEF que esta herramienta de simulación es muy precisa en el diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas.

## TRABAJOS FUTUROS

El estudio de las corrientes circulantes en la puesta a tierra del neutro de los turbogeneradores sincrónicos ante la presencia de carga desequilibrada en magnitudtiene un gran potencial de estudio en la medida en que se desee una profundización de los diversos problemas que estos ocasionan en la máquina. Como trabajo futuro se podría cuantificar cuánto es el porcentaje de secuencia inversa recomendado en comparación con la normatividad existente, teniendo una máquina a la cual se le realice el respectivo modelo de simulación.

Realizar un estudio de la operación de la protección de corriente de secuencia cero ante los terceros armónicos que por el circulan, pues en la actualidad sólo son analizados con base en el primer armónico.

# 8 BIBLIOGRAFIA


[1]. COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS. Rehabilitación de generadores síncronos de polos lisos. Web: http://www.pemex.com/files/content/NRF-052-PEMEX-2004.pd].

[2] Mc FADDEN, Richard H. Grounding of generators connected to industrial plant distribution buses. IEEE Transactions on industry application. V. 1A-17, Nº 6, November/December 1981. p. 553-556.

[3] G. Pesse, R. Alves, C. Candela, J. Aller. Impacto de Cargas con Elevado Contenido Armónico Sobre los generadores Sincrónicos. CS-98, Universidad Simón Bolívar, Caracas Venezuela. 2002].

[4] Desbalance de Tensiones en sistemas trifásicos [citado mayo del 2013] web: http://www.ecamec.com/newsletter/bajarnotaa0909.pdf

[5] Díaz Harold J. Obtención de Parámetros y Estudio del Desbalance de Carga en Turbogeneradores por Medio del Método de Elementos Finitos MEF [Tesis maestría]. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería; 2005. p 38-39

[6] Meneses J. Palechor J. Propuesta práctica de cálculo y selección para la puesta a tierra de generadores en plantas industriales [Tesis de pregrado]. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería; 2008

[7] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma. Sistemas de potencia: estudio y diseño, 3ra edición

[8] Nippes P.I. “Generator Unbalance Load Capability”. EPRIGS – 7393, Project 2591 –1, Final Report July 1991.

[9] José L. Osliger G, Harold J. Díaz M, Metodología para la determinación de pérdidas en un turbogenerador de 22,2 MVA. P.20-21.

[10] I.M. Canay, Calculation of Negative-Sequence Losses and Negative-Sequence Resistance of Turbogenerator, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, Pág. 764-773, No.3, May/Jun 1975.

[11] José L. Osliger G, Harold J. Díaz M, Metodología para la determinación de pérdidas en un turbogenerador de 22,2 MVA pág. 4 figura 4

[12] J. Driesen & T. V. Craenenbrocke. “Voltage Disturbances. Introduction to Unbalanced” Copper Development Association. May 2002.p .3.

[13] Manual General Electric. GEK-46080. Operation Lynn Air-Cooled Turbine Generator. April 1977, ANSI/IEEE C62.92.2-1989. Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems, Part II: Grounding of Synchronous Generator Systems. p.14.

[14] IEC-1000-3-2 Current harmonics (Classification of equipment). Balance three-phase equipment

[15] J. Driesen& T. V. Craenenbrocke. “Voltage Disturbances. Introduction to Unbalanced” Copper Development Association. May 2002.p.5

[16] ANSI C50.12-1982 Requirements for Salient Pole Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Application

[17] ANSI C50.14-1977 (reaffirmed 1989) American National Standard Requirements for Cylindrical-Rotor Synchronous Generators

[18] ANSI C50.13-2005 American National Standard Requirements for Cylindrical-Rotor Synchronous Generators, reaffirmed 1989,

[19] ARCILA, José Dariel. Armónicos en Sistemas Eléctricos. IEB S.A. p. 1-26.

[20] GRADY, W. Mack. SANTOSO, Surya. Understanding Power System Harmonics. Grady/Santoso, September 1 2001. p. 1-5.

[21] FERRACCI, Philippe. Cahier technique.No.199.Power Quality. October 2001. p. 8-10, 13-15

[22] GRADY, W. Mack. SANTOSO, Surya. Understanding Power System Harmonics. Grady/Santoso, September 1 2001. p. 7-12

[23] FERRACCI, Philippe. Cahier technique.No.199.PowerQuality. October 2001. p. 13-15.

[24] Gonzales J., Romero F. Diseño construcción e implementación de un filtro de baja tensión para el mejoramiento de la calidad de la calidad del suministro eléctrico [Tesis de pregrado]. Cuenca: Universidad politécnica salesiana. Facultad de Ingeniería; 2008.p.6-7.

[25] Díaz Harold J. Diagnóstico de corto entre espiras en el devanado de excitación de turbogeneradores mediante el voltaje inducido en el eje por el método de elementos finitos (M.E.F.). [Tesis Doctorado]. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería; 2011. p 71

[26] IEEE Std 115-1995 Guide Test Procedures for Synchronous Machines

[27] Cedrat, Users guide FLUX2D 7.6 1990-1995

[28] IEC 34-4, Rotating electrical machines, 1985

[29] NTC 1515, Máquinas eléctricas rotatorias. Métodos para determinar mediante ensayos las magnitudes de máquinas sincrónicas. 1999.

[30] KOSTENKO, M .P, PIOTROVSKY, L. M. Máquinas Eléctricas. Segunda Edición. Editorial MIR. Tomo II ,1983.]

[31] Tesis Doctoral: Etude des courants et tensionsd´arbre et de phases dans les grands alternateurs, Jean-EricTorlay, Grenoble (Francia), 1999.3

[32] Díaz Harold J. Diagnóstico de corto entre espiras en el devanado de excitación de turbogeneradores mediante el voltaje inducido en el eje por el método de elementos finitos (M.E.F.). [Tesis Doctorado]. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería; 2011. p 99

[33] Díaz Harold J. Obtención de Parámetros y Estudio del Desbalance de Carga en Turbogeneradores por Medio del Método de Elementos Finitos

[34] MEF [Tesis maestría]. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería; 2005.p 79

[35] NTC-947-1 Guía práctica para el cálculo y. selección de la puesta a tierra, 2011

[36] S. J. Salon, M. R. Shah, "Analysis and Testing of Negative Sequence Heating of Turbine Generator Rotors", presented at Scorld Users Conference, 1992.

[37] Tudela Óscar R. Estudio del efecto producido por el devanado del inducido en los armónicos de campo de excitación en vacio de un alternador de 28, 8 MVA

[38] Marcos A. de Armas Teyra Corrientes armónicas en el circuito de secuencia cero de generadores independientes sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional. Caso Elpidio Gómez. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad de Cienfuegos, Cuba

[39] Camilo A Cortés. Determinación de pérdidas eléctricas en motores de inducción modelados electromagnéticamente con el método de los elementos finitos Universidad Nacional de Colombia

[40] P. l. Alger, Shaft Currents In Electric Machines Both of the General Electric Company.

[41] K. Vogt. *Berech nung elektrischer Maschinen.* Weinheim, Alemania. : VCH Verlagsgesellschaft, 1996.

[42] J. Pyrhonen, T Jokinen, V. Hrabovcová. *Design of rotating electrical machines.* Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2009.

[43] J. C. Martín. *Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas Tomo II.* Barcelona: Marcombo S.A., 1982. 84-267-0438-7.

[44] S.H Marinel. Evaluación de los ajustes de protección de sobrecorriente asociados a los circuitos de planta eléctrica en 13.8 kV de la refinería puerto la cruz. Barcelona, abril de 2010

[45] Castellanos H. Daniel.Mantenimiento predictivo de turbinas de gas. Universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior departamento de ingeniería térmica y de fluido.Madrid, Julio de 2011

**ANEXO A**

**Fotos realización pruebas en el laboratorio**



