



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Análisis de falla, rotor a tierra en generadores sincrónicos auto excitados, empleando técnicas de diagnóstico y relación con parámetros físicos del devanado**

**Gilbert Leonard Bothia Vargas**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática  
Medellín, Colombia  
2023



# **Análisis de falla, rotor a tierra en generadores sincrónicos auto excitados, empleando técnicas de diagnóstico y relación con parámetros físicos del devanado**

**Gilbert Leonard Bothia Vargas**

Tesis de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Maestría en Ingeniería Eléctrica**

Directora:

Ph.D., Rosa Elvira Correa Gutiérrez

Línea de Investigación:

Mantenimiento y gestión de activos

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Tecnologías Aplicadas (GITA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2023



*Especial agradecimiento y dedicatoria a mi madre  
María, mi tío Pedro, mi tía Socorro y a mi tutora Rosa  
Elvira, por su apoyo y confianza en mi formación  
académica, profesional y humana.*

## **Agradecimientos**

En agradecimiento a mi tía María del Socorro Vargas Botia, quien me apoyó a lo largo de toda mi formación como ingeniero electricista, así mismo a mi madre, María de los Ángeles Vargas Botia y tío Pedro Vargas Botia, quienes siempre me ha orientado oportunamente en mi vida. Gracias a la paciencia y conocimiento de mi Tutora Rosa Elvira Correa, destaco, además, mi formación en el grupo de investigación GITA de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, donde he crecido como investigador y profesional, finalmente a la fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres, que gracias a su beca pude realizar este estudio, así como su apoyo durante la finalización de este proceso universitario.

## Resumen

Se analiza el fenómeno de fugas a tierra en devanado de rotor para generadores síncronos, con el fin de caracterizar la condición de falla a partir de sus parámetros físicos, principalmente resistencia de aislamiento del devanado a tierra. Se parte de una comprensión física de la falla, para ir seleccionando el modelo matemático descriptivo de la misma, reconociendo en sus planteamientos iniciales la necesidad de describir circuitos de rotor a tierra, esto es, considerando esquemas de protección de fugas a tierra, hasta incluir la realimentación propia desde el sistema regulador de tensión, posteriormente se implementan técnicas diagnósticas, tales como análisis de Fourier y transformada de Hilbert-Huang, entre otras, tomando como base los modelos de generador y su inclusión de la componente fallada, los resultados del análisis se contrastan con resultados de simulación sobre la condición con y sin fuga a tierra, finalmente se presenta una metodología de diagnóstico que integra las técnicas y modelos descritos en esta investigación.

**Palabras clave:** Falla a tierra en polos, falla a tierra en rotor, fuga a tierra, falla en rotor, falla eléctrica en rotor.

## Abstract

**Failure analysis, rotor to ground in self-excited synchronous generators, using diagnostic techniques and relationship with physical parameters of the winding**

The ground leakage phenomenon in the rotor winding of synchronous generators is analyzed in order to characterize the fault condition based on its physical parameters, mainly the insulation resistance of the winding to ground. It starts from a physical understanding of the fault, to select the mathematical model that describes it, recognizing in its initial approaches the need to describe rotor-ground circuits, that is, considering differential protection schemes, up to including its own. feedback from the voltage regulator system, diagnostic techniques such as Fourier analysis and the Hilbert-Huang transform, among others, are subsequently implemented, based on the generator models and their inclusion of the failed component, the results of the analysis are contrasted with the results of the simulation on the condition with and without ground leakage, finally a diagnostic methodology is presented that integrates the techniques and models described in this research.

**Keywords: Ground fault in poles, ground fault in rotor, ground leakage, fault in rotor, electrical fault in rotor.**

# Contenido

	Pág.
<b>1. Generador sincrónico y fuga rotor a tierra.....</b>	<b>5</b>
1.1 Componentes de generador sincrónico.....	5
1.2 Fenomenología de fuga a tierra.....	9
1.2.1 Análisis de componentes del rotor involucrados en una fuga a tierra.....	12
1.2.2 Sistemas de protecciones típicos de fuga a tierra.....	15
<b>2. Modelos de rotor con fuga a tierra.....</b>	<b>19</b>
2.1.1 Modelo de fuga a tierra base.....	19
2.1.2 Modelo accionamiento del sistema de excitación.....	22
2.1.3 Rectificación trifásica del AVR, control por diodos.....	25
2.1.4 Rectificación monofásica controlada por tiristores.....	26
2.1.5 Rectificación monofásica controlada con carga inductiva (tiristores).....	27
2.1.6 Rectificación controlada por tiristor trifásica con carga RL.....	29
2.1.7 Modelo de fuga a tierra con modelo de excitación.....	32
2.1.8 Modelo polos rotor y fuga a tierra con modelo de excitación.....	33
<b>3. Ajustes a modelos y generación de datos sintéticos.....</b>	<b>39</b>
3.1 Simulación y sensibilidad de parámetros en el estudio de fugas a tierra.....	43
3.1.1 Modelo rotor con impedancia fraccionada y derivación a tierra (modelo 1)....	44
3.1.2 Modelo polos-rotor con falla en polo (modelo 2).....	50
3.1.3 Modelo rotor polos en PI con falla entre polos (modelo 3).....	51
3.1.4 Modelo polos rotor con modelo LC (modelo 4).....	53
3.1.5 Modelo polo rotor predominantemente resistivo (modelo 5).....	54
3.1.6 Consideraciones finales para generación de datos sintéticos.....	55
<b>4. Diagnósticos basados en señal y datos.....</b>	<b>58</b>
4.1 Implementación transformada de Fourier.....	59
4.2 Implementación transformada Hilbert-Huang.....	66
4.2.1 Transformada de Hilbert.....	67
4.2.2 Modo de descomposición empírico.....	68
4.2.3 Análisis HHT para señales de fugas a tierra sintéticas.....	71
4.3 Implementación modelos de datos.....	72
4.3.1 Algoritmo k-vecinos cercanos.....	73
4.3.2 Implementación k-vecinos cercanos como clasificador.....	75
4.3.3 Implementación k-vecinos cercanos como regresor.....	76
4.3.4 Red neuronal simple.....	78
4.3.5 Implementación de red neuronal simple, clasificador y regresor.....	83
<b>5. Metodología de diagnóstico.....</b>	<b>85</b>

<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>97</b>
6.1 Conclusiones.....	97
6.2 Recomendaciones.....	99

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Componentes de un sistema de generación-red de potencia (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008) .....	6
<b>Figura 1-2.</b> Elementos típicos en la instalación de un generador (modificado de (Nevada, n.d.)) .....	7
<b>Figura 1-3.</b> Elementos rotor generador sincrónico, polos lisos ( Zawoysky & Tornroos, 2001) .....	8
<b>Figura 1-4.</b> Elementos rotor generador sincrónico, polos salientes (Tcheslavxki, 2008), foto de PDMA Corporation.....	8
<b>Figura 1-5.</b> Circuito simplificado, fuga a tierra en rotor .....	9
<b>Figura 1-6.</b> Efectos y consideraciones de medida de resistencia por material y tipo de excitación .....	10
<b>Figura 1-7.</b> Conducción de corriente ( $i(t)$ ) en devanado rotor (azul: sin fuga a tierra, rojo: con fuga a tierra).....	11
<b>Figura 1-8.</b> Algunos registros de fugas a tierra en rotores de generadores. ....	11
<b>Figura 1-9.</b> Representación circuital de una doble falla a tierra.....	12
<b>Figura 1-10.</b> Disposición del aislamiento entre espiras de un mismo polo.....	12
<b>Figura 1-11.</b> Espiras apiladas y confinadas por el anillo de retención y las cuñas para el polo respectivo, se destaca el aislamiento entre espiras.....	13
<b>Figura 1-12.</b> Corte del generador para esquematizar el contacto de espiras, con el cuerpo del polo, el eje y la zapata o extensión del polo superior (Hartmann, 2016).....	13
<b>Figura 1-13.</b> Esquema de placas plano paralelo, representando el aislante entre espiras con una zona deteriorada .....	14
<b>Figura 1-14.</b> Ductos de refrigeración para los cuerpos del polo, esquematizado para un polo liso pero aplicable también para polos salientes (Siemens, 2015) (el mayor espacio acoge las bobinas).....	14
<b>Figura 1-15.</b> Varillas en zapata polar y laminación del cuerpo polar, para interactuar en condiciones transitorias como circuitos de amortiguamiento electromagnético .....	15
<b>Figura 1-16.</b> Configuraciones de medida, para protecciones de fugas a tierra en rotores. ....	16
<b>Figura 1-17.</b> Esquemas de medida, fugas a tierra, esquemas modificados de (Eleschova, Belan, & Gasparovsky, 2005).....	16
<b>Figura 2-1.</b> Modelo rotor y fuga a tierra simple.....	19
<b>Figura 2-2.</b> Modelo rotor y fuga a tierra simple con fuente adicional .....	20
<b>Figura 2-3.</b> Modelo rotor y fuga a tierra simple con fuente adicional .....	21

<b>Figura 2-4.</b> Esquema de control de un generador conectado a la red (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008) .....	22
<b>Figura 2-5.</b> Sistemas de excitación típicos para sistemas de generación .....	23
<b>Figura 2-6.</b> Esquemas o topologías de sistema de excitación con rectificación controlada. ....	24
<b>Figura 2-7.</b> Modelo generador sincrónico auto excitado con modelo de aislamiento para emulación de fugas a tierra .....	24
<b>Figura 2-8.</b> Sistema de rectificación trifásico de media onda con diodos (Rashid, 2001). ....	25
<b>Figura 2-9.</b> Ondas de tensión del sistema de rectificación de media onda con diodos (Rashid, 2001) .....	25
<b>Figura 2-10.</b> Rectificador controlador monofásico circuito y señales eléctricas representativas (Rashid, 2001) .....	27
<b>Figura 2-11.</b> Curva característica de un tiristor (curva tensión-corriente) (Rashid, 2001) .....	27
<b>Figura 2-12.</b> Rectificación controlada por tiristor para fuente monofásica con carga RL, circuito y comportamiento de señales principales (Rashid, 2001).....	28
<b>Figura 2-13.</b> Diagrama experimental de emulación de fallas a tierra entre polos de generador sincrónico, tomado de (Blánquez, Aranda, Rebollo, & Platero, 2015).....	29
<b>Figura 2-14.</b> Topología general de un convertidor en puente trifásico totalmente controlado (Rashid, 2001) .....	29
<b>Figura 2-15.</b> Convertidor en puente trifásico totalmente controlado (gráfico derecha) cuando los tiristores T1 y T6 se encuentran en conducción (gráfico izquierda).....	30
<b>Figura 2-16.</b> Comportamiento de conducción fases A, B, C en la carga RL ( $V_o$ ), bajo ángulo de disparo ( $\alpha$ ).....	31
<b>Figura 2-17.</b> Modelo rotor con detalle de excitación y modelo de aislamiento rotor a tierra. ....	32
<b>Figura 2-18.</b> Modelo fuga a tierra rotor, simplificando rectificación por su resultante DC. ....	33
<b>Figura 2-19.</b> Modelo fuga a tierra rotor, considerando capacitancia a tierra. ....	34
<b>Figura 2-20.</b> Modelo fuga rotor a tierra, falla en lado AC (entrada al rectificador) o lado DC (devanado campo) del sistema de excitación.....	34
<b>Figura 2-21.</b> Modelo fuga rotor a tierra, con modelo PI por polo. ....	35
<b>Figura 2-22.</b> Modelo fuga rotor a tierra, con modelo PI por polo, evaluando variaciones de capacitancia a punto de falla. ....	36
<b>Figura 2-23.</b> Modelo fuga rotor a tierra, con modelo PI por polo, analizado experimentalmente como si fuese un SFRA.....	36
<b>Figura 2-24.</b> Modelo fuga rotor a tierra, para generador sin escobillas, implementación de algoritmo de ubicación y cálculo de fuga a tierra en generadores síncronos auto excitados (Pardo , Mahtani, Platero, & Fernández, 2023).....	37
<b>Figura 2-25.</b> Modelo PI para polo en rotor.....	38
<b>Figura 2-26.</b> Modelo polos rotor, con fuga a tierra y circuito de auto excitación .....	38
<b>Figura 3-1.</b> Datos Generador usado por. (Palanisamy, 2016), para validación experimental .....	39

**Figura 3-2.** Datos de Generador #2 usado para pruebas en investigación de (Platero, Blázquez, Frías, & Pardo, 2011) ..... 40

**Figura 3-3.** Circuito de campo implementado con excitación rectificadora..... 42

**Figura 3-4.** Comprobación de desempeño circuito genérico con generador #1, ante variaciones de ángulo de disparo en tiristores ..... 43

**Figura 3-5.** Modelo de rotor fuga a tierra simplificado (configuración con Generador #1)44

**Figura 3-6.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga, para fallas a diferentes parámetros del circuito en Figura 3-5, variación de  $\alpha$  y  $R_i$ ..... 45

**Figura 3-7.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del diagrama, Figura 3-5, variación de  $a$  y  $R_i$ ..... 46

**Figura 3-8.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del diagrama Figura 3-5, variación de  $C_i$  y  $R_i$ ..... 47

**Figura 3-9.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del diagrama Figura 3-5, variación amplia de  $a$  con parámetros estables de  $C_i$  ..... 48

**Figura 3-10.** Modelo de rotor fuga a tierra con modelo n por polo (configuración con Generador 1)..... 50

**Figura 3-11.** Corriente fuga a tierra generador #1 con modelo n por polo, con y sin falla. .... 51

**Figura 3-12.** Modelo rotor con doble fuga a tierra, con modelo n por polo y sus variantes. .... 52

**Figura 3-13.** Tensión de campo y corriente fuga a tierra generador #1 con modelo n por polo, simulando doble falla a tierra (perfil característico de casos simulados)..... 52

**Figura 3-14.** Modelo de rotor y fuga a tierra con parámetros LC ..... 53

**Figura 3-15.** Tensión de campo y corriente de fuga en modelo predominante LC ..... 53

**Figura 3-16.** Modelo de rotor y fuga a tierra, con parámetros resistivos únicamente ..... 54

**Figura 3-17.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del modelo rotor-fugas a tierra puramente resistivo (aislamiento a  $1M\Omega$ ) ..... 55

**Figura 3-18.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del modelo rotor-fugas a tierra puramente resistivo (aislamiento a  $5k\Omega$ )..... 55

**Figura 3-19.** Respuestas de tensión de campo para generador #2, modelo rotor fuga a tierra base. .... 56

**Figura 3-20.** Respuestas de corriente de fuga a tierra para generador #2, modelo rotor fuga a tierra base. .... 56

**Figura 4-1.** Análisis por superposición de fuentes tomando descomposición de análisis de Fourier (Sadiku & Alexander, 2006) ..... 60

**Figura 4-2.** Impedancias equivalentes modelo PI rotor y modelo RC de aislamiento para la falla a tierra..... 64

**Figura 4-3.** Ejemplo señal original y suavizado mediante promedio de envolventes de máximos y mínimos (Huang & Shen, 2005)..... 69

**Figura 4-4.** Suavizado sucesivo de la señal “Data” número 11, siendo la primera IMF (Huang & Shen, 2005) ..... 69

**Figura 4-5.** Ejemplo de Señal original y señal residuo posterior primera IMF encontrada (Huang & Shen, 2005) ..... 70

<b>Figura 4-6.</b> Descomposición de modo intrínseco a señal de tensión de campo, empleando librería “emd” en lenguaje Python (aislamiento a $R_i = 50k\Omega$ ) .....	71
<b>Figura 4-7.</b> Histogramas de frecuencias por IMF para una señal de tensión de campo..	72
<b>Figura 4-8.</b> Interpretación visual del algoritmo k-vecinos cercanos ( (Andreas, M., & Guido, 2017)). .....	73
<b>Figura 4-9.</b> Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos, para modelo de regresión para la clase “a” .....	77
<b>Figura 4-10.</b> Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos para modelo de regresión de resistencia de aislamiento (número de vecinos cercanos) .....	78
<b>Figura 4-11.</b> Flujo de datos en una red neuronal, (Hagan M. T. et al, 2014).....	78
<b>Figura 4-12.</b> Función de activación Sigmoide y su derivada (Panneerselvam, 2023) .....	79
<b>Figura 4-13.</b> Función de activación Relu y variantes (Xu, Wang, Chen, & Li, 2015) .....	79
<b>Figura 4-14.</b> Esquema de red neuronal ejemplo, para desarrollar su flujo de datos y cuantificación de los pesos de matrices que ajustan mejor los resultados entrada-salida. ....	80
<b>Figura 5-1.</b> Metodología de diagnóstico resumen, con notas de procesamiento (p1).....	85
<b>Figura 5-2.</b> Metodología de diagnóstico resumen, con notas de procesamiento (p2).....	86
<b>Figura 5-3.</b> Verificación de estado estable de la señal, fragmento de la misma entre 0.19s y 0.2.....	87
<b>Figura 5-4.</b> Verificación frecuencia de muestreo y datos uniformemente muestreados... ..	87
<b>Figura 5-5.</b> Diagrama circuital y ecuaciones de análisis de Fourier genérico. ....	88
<b>Figura 5-6.</b> Fragmento de metodología, correspondiente al cálculo de FFT y solución de ecuaciones para “a” y “ $R_i$ ” .....	88
<b>Figura 5-7.</b> Histogramas de aciertos para diferentes frecuencias de la DFT. ....	91
<b>Figura 5-8.</b> Descomposición de modo intrínseco a corriente de fuga a tierra (aislamiento a $R_i = 50k\Omega$ )(modelo #1) .....	91
<b>Figura 5-9.</b> Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos, para modelo de clasificación con datos de FFT .....	92
<b>Figura 5-10.</b> Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos, para modelo de clasificación con datos de HHT. ....	92
<b>Figura 5-11.</b> Matriz de confusión modelo clasificador k-vecinos cercanos seleccionado para datos de FFT, Modelo 1 y 5 de fugas a tierra. ....	93
<b>Figura 5-12.</b> Fragmento de metodología, correspondiente al análisis de resultados de la FFT.....	95
<b>Figura 5-13.</b> Fragmento de metodología, correspondiente al reporte de resultados e interpretación .....	96

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Tipo rotor, velocidad y potencia de generadores sincrónicos (construcción propia basado en (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008)).	6
<b>Tabla 2-1:</b> Secuencia de disparo de convertidor en puente trifásico controlado complemente.	30
<b>Tabla 3-1:</b> Datos Generador #1 para simulación de fallas (Palanisamy, 2016)	39
<b>Tabla 3-2:</b> Datos Generador #2 para simulación de fallas (Platero, Blánquez, Frías, & Pardo, 2011)	41
<b>Tabla 3-3:</b> Valores para análisis de sensibilidad de parámetros (Palanisamy, 2016)	42
<b>Tabla 3-4:</b> Valores para análisis de sensibilidad de parámetros (Palanisamy, 2016)	49
<b>Tabla 3-5:</b> Valores para generación de datos sintéticos con modelo de generador #1.	56
<b>Tabla 4-1.</b> Resultados modelo 1 para estimación de parámetros, resaltando resultados no coherentes físicamente.	65
<b>Tabla 4-2.</b> Comparativo del alcance de otros modelos de señal y Hilbert-Huang (traducido de (Huang & Shen, 2005)).	71
<b>Tabla 4-3.</b> Estructura de modelo clasificador para k vecinos cercanos con datos de FFT y HHT	76
<b>Tabla 4-4.</b> Estructura de modelo regresor o estimador para k vecinos cercanos con datos de FFT y HHT	76
<b>Tabla 4-5.</b> Estructura de modelo red neuronal simple con datos de FFT y HHT	83
<b>Tabla 5-1.</b> Fragmento de resultados de cálculo de parámetros para ángulo de disparo $60^\circ$ y $R_i$ , denotando falla u deterioro de aislamiento (modelo #1)	89
<b>Tabla 5-2.</b> Fragmento de resultados modelo 5 ( $5\Omega$ - $5k\Omega$ y $\alpha=60^\circ$ ), correspondientes a valores a y $R_i$ esperados.	89
<b>Tabla 5-3.</b> Fragmento de resultados, cálculo parámetros a diferentes frecuencias	90
<b>Tabla 5-4.</b> Resultados red neuronal simple con datos de FFT y HHT	94



# Introducción

Las fallas a tierra en máquinas eléctricas, corresponden al deterioro del aislamiento entre espiras de un devanado, al punto de formarse un camino conductor no deseado entre las espiras y un elemento conectado a la tierra del sistema, esta fuga de corriente genera un calentamiento en la zona afectada, que poco a poco deteriora la condición de aislamiento cercana e incrementa la corriente de fuga (Stone, Boulter, Culbert, & Dhirani, 2004). En máquinas rotativas como generadores, al deteriorarse el aislamiento, por ejemplo en el devanado de campo, parte de la corriente de excitación fluye por el eje del rotor, no obstante, esta falla aún no representa un peligro para la operación de la máquina, es crítica cuando se presenta una doble falla a tierra que termina cortocircuitando el devanado, generando un desbalance de fuerza magneto motriz y por ende, incremento en vibraciones, siendo representativas, pues se trata de un desbalance en un cuerpo de más de 1 ton girando a 300 rpm para el caso de generadores síncronos de polos salientes, por ende, representa una operación de trabajo potencialmente destructiva para la máquina en general.

Cuando hay desbalances de campo como en espiras cortocircuitadas o doble falla a tierra, se experimentan fuerzas proporcionales al cuadrado del flujo, sumado a ello la inercia del rotor genera desbalances del orden de 50 ton a 100 ton, lo cual tiene como efecto deformaciones en los cuerpos de la máquina y tiempos de indisponibilidad de semanas. Estos eventos de fugas a tierra, suelen ser identificados en labores de mantenimiento, donde según el tipo de mantenimiento, pueden realizarse pruebas de alta energía, evidenciando la falla o no, dejando al devanado expuesto a un deterioro mayor. Colombia tiene más de 30 hidroeléctricas despachadas centralmente (PARATEC, 2023), donde por central, pueden encontrarse desde un generador hasta ocho generadores. La generación hidráulica representa desde su capacidad efectiva por tipo de generación, el 66% de la capacidad del País (despachadas centralmente y no centralmente), por ende, esfuerzos alrededor de diagnósticos en generadores bajo pruebas de baja energía, representan

alternativas de diagnóstico que salvaguardan la salud de dichos activos de generación (PARATEC, 2023). (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008).

El diagnóstico de fugas a tierra en generadores sincrónicos, inicialmente fue abordado empleando varios tipos de protecciones tales como sobre corriente, sobretensión y baja tensión, empleando señales de tipo DC o AC según el esquema de medida empleado, estos sistemas identifican desbalances de resistencia en el devanado del rotor o bien, incremento en la magnitud de la señal medida conductor-aislamiento y tierra, tal como corriente de fuga a tierra (Eleschova, Belan, & Gasparovsky, 2005). Este análisis se ha venido complementando, empleando técnicas de diagnóstico a estos esquemas de medida y protección, tales como análisis de firma de corriente, análisis de armónicos y otras técnicas de medida, como distorsión de flujo en el entrehierro.

Existen múltiples diagnósticos de fugas a tierra que emplean señales de vibración mecánica, medida de temperatura, ruido acústico, infrarrojo, análisis de gases, entre otros, el alcance de este documento reside únicamente en diagnóstico de rotor a tierra, a partir de señales eléctricas.

Si bien existen diversas técnicas en la detección de fugas a tierra del rotor en generadores sincrónicos, las brechas en su diagnóstico residen en la localización del deterioro, consideraciones de diagnóstico por punto de trabajo de la máquina y particularidad por tipo de sistema de excitación. La presente investigación contempla el diagnóstico desde la base abordada por sistemas previos, buscando complementar cerrar las brechas existentes en el diagnóstico o bien complementarlas, iniciando con la localización de la falla y consideraciones de diagnóstico según punto de operación de la máquina.

Con el propósito de proponer una estrategia que identifique la evolución de fugas a tierra en rotores de generadores síncronos auto excitados, se relacionarán parámetros físicos, tales como resistencias, inductancias o capacitancias de la máquina a partir de un análisis circuital del rotor, incluyendo un modelo de falla, posteriormente, la estrategia se apoyará en modelos de diagnóstico de señales y basados en datos, para evaluar la evolución o rangos de magnitud de la falla misma. En esta dirección, esta investigación explora técnicas tales como análisis circuital de Fourier, transformada corta de Fourier,

transformada de Hilbert-Huang, análisis de clasificación y solución de sus parámetros físicos para cada técnica empleada.

Entre las limitaciones de este trabajo, se encuentra la validación experimental, ya que su comprobación exige diseño de hardware en el sistema de medida, adquisición de datos y procesamiento, con el fin de evidenciar los espectros de señal válidos para concluir con los modelos y metodología propuestos, así mismo, la generalización de la metodología para otros esquemas de instalación de generadores sincrónicos, sin olvidar la importancia de probar varios esquemas de modelos de datos, para lo cual se sugiere técnicas como Estimador Parzen de árbol estructurado, en la búsqueda de hiperparámetros que mejoren el desempeño de los modelos (Heijden, Lago, Palensky, & Abraham, 2021). No obstante, la investigación se apoya en los resultados experimentales sobre fugas a tierra, principalmente del grupo de investigación del profesor Blaquez y Platero.

La investigación se expone iniciando con un capítulo descriptor del generador sincrónico, desde su constitución física, hasta su representación en modelo matemático para diferentes tipos de análisis, detallando en componentes fundamentales para esta investigación, tales como el sistema de excitación, modelo de rotor y fenomenología de la fuga a tierra y su medida, con el fin de seleccionar, al menos dos modelos descriptores de fugas a tierra en rotor.

Posteriormente, se presenta la fundamentación de técnicas de análisis basados en señales y modelos, destacando frecuencia y modelos de clasificación de acuerdo a resultados de simulaciones de operación con y sin falla, buscando seleccionar, al menos dos candidatos de técnicas de diagnóstico, que permitan cuantificar la ubicación y magnitud de la fuga a tierra.

El último capítulo, presenta una metodología de diagnóstico, mediante la aplicación de modelos de fugas a tierra combinado, y la aplicación de las principales técnicas de diagnósticos empleados con mejor desempeño, a fin de exponer la metodología con un caso de ejemplo.



# 1. Generador sincrónico y fuga rotor a tierra

Este capítulo expone la generalidad física de un generador sincrónico y sus principales partes, destacando elementos conectados a tierra y aislados de las partes activas (donde circulan corrientes), con el fin de evidenciar algunos caminos de fugas a tierra, así como caminos de ingreso o circulación de contaminantes, tal como los orificios usados en el sistema de refrigeración, posteriormente se presenta la fenomenología de una fuga a tierra, indicando, como algunos sistemas de protecciones cuantifican la magnitud de la falla, a partir de la medida del deterioro de aislamiento entre la parte activa y una parte conectada a tierra.

## 1.1 Componentes de generador sincrónico

Un generador sincrónico es una máquina que transforma energía mecánica en energía eléctrica, a partir del fenómeno de inducción eléctrica entre dos devanados separados eléctricamente, pero acoplados magnéticamente (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008).

Físicamente es una máquina que se compone de dos partes principales (tipo de señal):

- Campo o rotor (señal DC)
- Armadura o estator (señal AC)

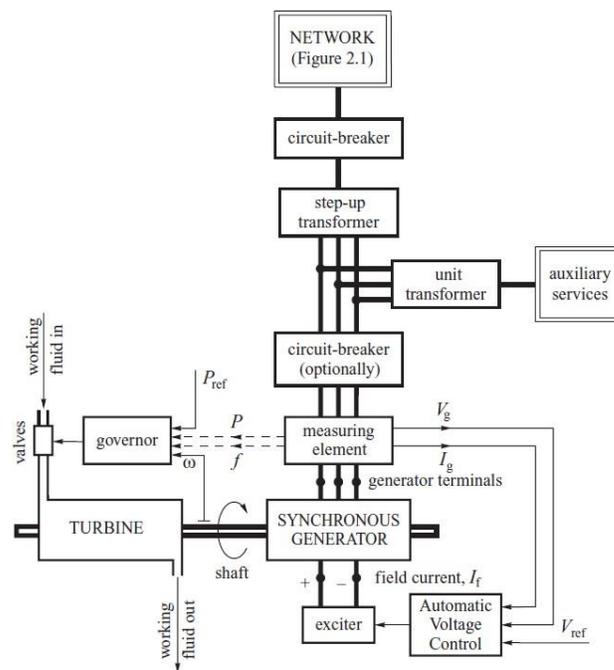
Los generadores sincrónicos se suelen clasificar por velocidad de rotación y potencia, encontrando principalmente variaciones en su rotor Tabla 1-1.

La instalación de un sistema generador, lo componen elementos como turbinas, sistema de excitación, protecciones, entre otros, como esquematiza (Machowski et al., 2008) para una unidad de generación y su conexión al sistema de potencia (Figura 1-1).

**Tabla 1-1:** Tipo rotor, velocidad y potencia de generadores síncronos (construcción propia basado en (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008)).

Tipo rotor	Velocidad de rotación	Tensión y potencia	Instalación
Polos salientes	Menor a 500 rpm	Rangos hasta 100MW y mayores hasta 1.300MW.	Vertical
Polos lisos	50Hz - 1500rpm a 3000rpm	Tensiones de operación entre 10kV a 32kV.	Horizontal

**Figura 1-1.** Componentes de un sistema de generación-red de potencia (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008)



Un detalle de disposición física típica del generador, se presenta en la Figura 1-2, donde se destacan los diferentes elementos cercanos al rotor y estator (partes activas de la máquina) (esquema modificado de (Nevada, n.d.)).

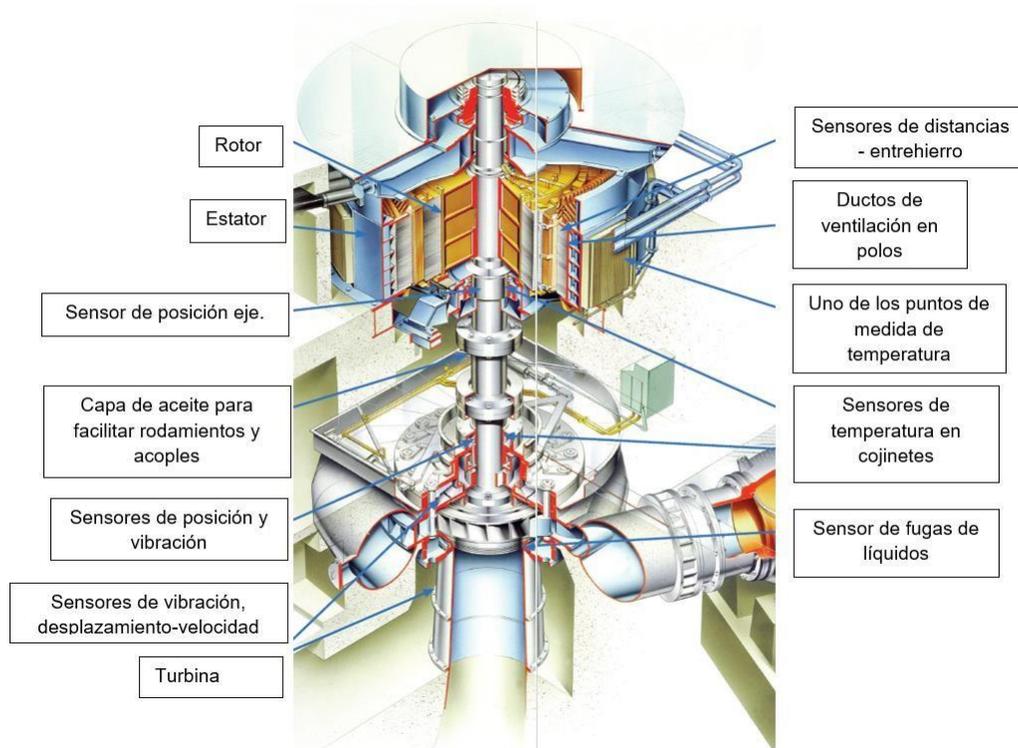
La tierra del sistema o potencial de referencia, está presente en la carcasa y dispositivos metálicos en la instalación de la unidad, donde el aislamiento separa eléctricamente el rotor y estator de elementos como:

- Eje del rotor
- Estructura de soporte de los polos
- Carcasa del estator

Otros elementos indirectos que interactúan con las partes activas son:

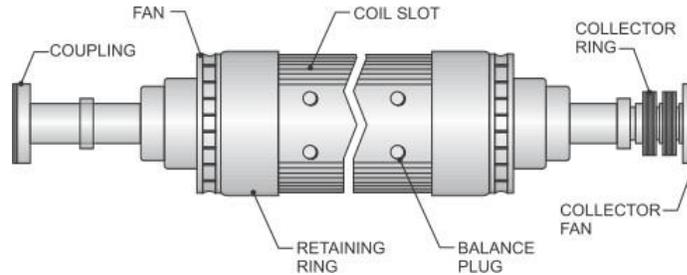
- Sistema de ventilación, ya que el gas refrigerante atraviesa los devanados por ductos dispuestos para estos.
- Sistemas de sensores, en cercanías al eje o devanados
- Rodamientos
- Anillos de retención

**Figura 1-2.** Elementos típicos en la instalación de un generador (modificado de (Nevada, n.d.)).

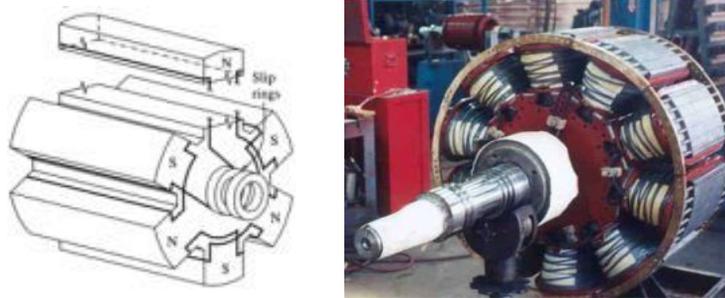


Un detalle del rotor de polos lisos y posterior rotor de polos salientes, se presentan en las siguientes figuras:

**Figura 1-3.** Elementos rotor generador síncrono, polos lisos ( Zawoysky & Tornroos, 2001)



**Figura 1-4.** Elementos rotor generador síncrono, polos salientes (Tcheslavski, 2008), foto de PDMA Corporation.



El ventilador suele ser una pieza adicional que se ubica concéntrica al cuerpo del rotor, de manera que cuando gira la unidad, esta ingresa aire para circulación en el cuerpo del rotor internamente.

Los anillos de retención son piezas de anclaje para mantener los cabezales de espiras en su posición, esta pieza es fundamental, pues son estos los terminales de las espiras quienes soportan las fuerzas centrífugas y transitorias debido al giro del rotor, por ende, se suelen desgastar, desajustar y hasta reventar más frecuentemente.

Las ranuras de bobinas permiten disponer el devanado de manera más uniforme, adicionalmente permite caminos de refrigeración para cada bobina o polo. Los anillos de colector o anillos deslizantes, son quienes facilitan el contacto eléctrico de los terminales de bobina del rotor y la excitación.

A nivel de polos salientes, estos son anclados por pernos en cuñas de milano al cuerpo principal del rotor, no obstante, las conexiones del devanado entre polo y polo, suelen hacerse mediante conexión rígida (láminas pernadas), o con conexión flexible (láminas de conexión flexible), siendo estas conexiones las principales partes deterioradas por su estrés mecánico y acumulación de contaminantes.

## 1.2 Fenomenología de fuga a tierra

El término fuga a tierra, alude a la pérdida de aislamiento entre el conductor y la estructura que lo contiene, por ejemplo, estructuras como: anillos de retención, cuerpo del polo fijado al eje del rotor, entre otros elementos que se suelen aterrizar a tierra por seguridad operativa, pero que, al deteriorarse su aislante, presentan paso de corriente entre conductor y tierra.

Entre los parámetros que caracterizan la condición del aislamiento se encuentra la resistencia de aislamiento, que al igual que cualquier resistencia, su valor es susceptible a variaciones de temperatura, presión atmosférica, humedad y corrosión química o biológica. No obstante, dependiendo del material y la forma de excitarlo, se presentan algunos fenómenos que incluyen dinámicas diferentes de conducción de energía eléctrica. Estos fenómenos o efectos se resumen en la Figura 1-6. No obstante, apoyado en el esfuerzo de los fabricantes en disminuir estos efectos, se considera igual la resistencia en AC que en DC.

La Figura 1-5, presenta un circuito RC paralelo (subíndice fu), representando el deterioro de aislamiento en el devanado de rotor con la resistencia esquematizada en rojo.

**Figura 1-5.** Circuito simplificado, fuga a tierra en rotor.

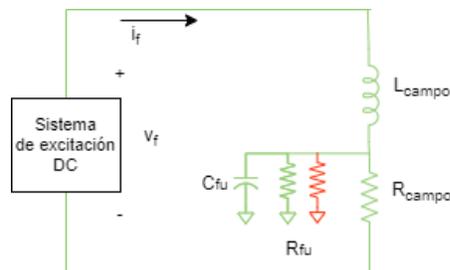
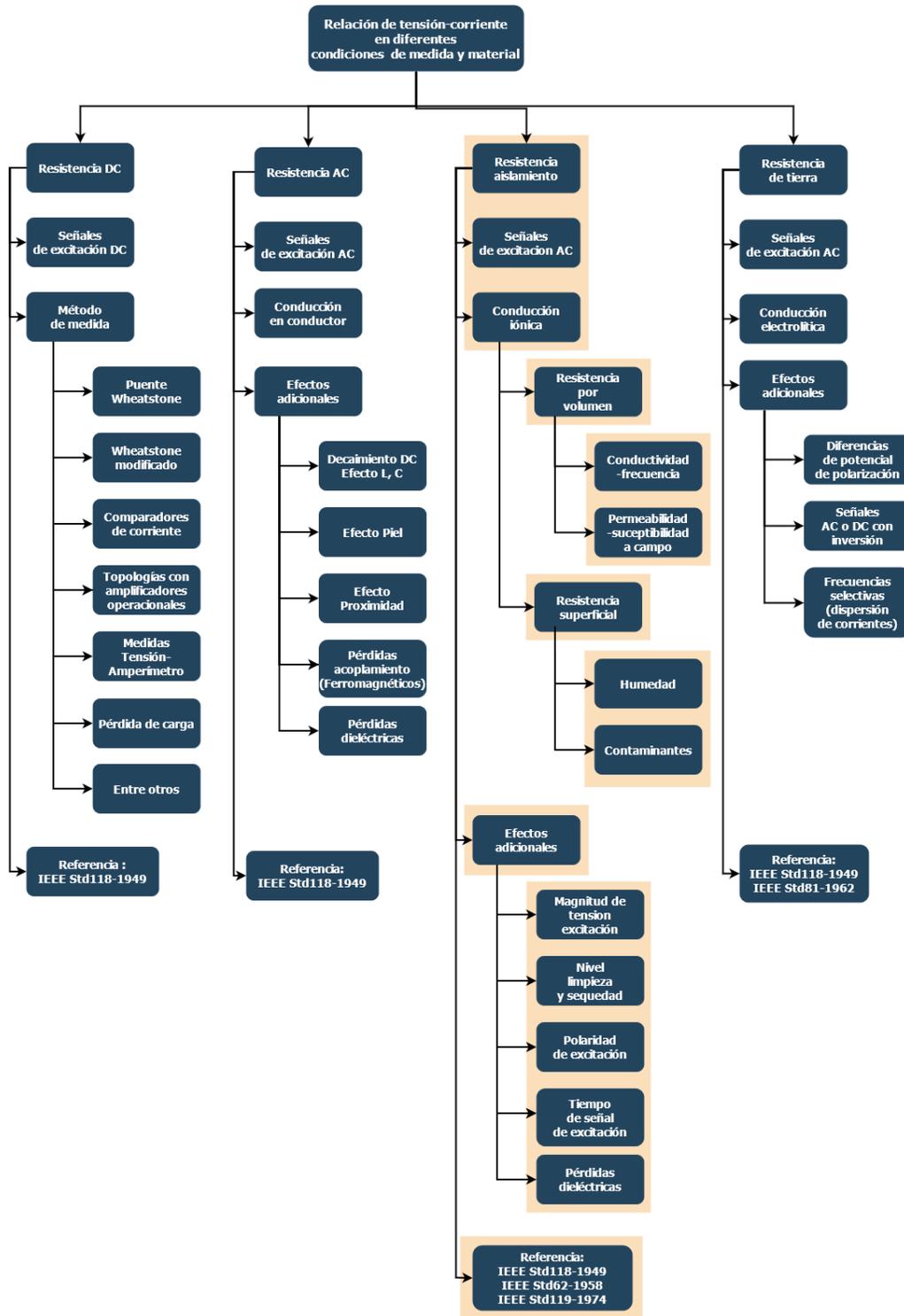
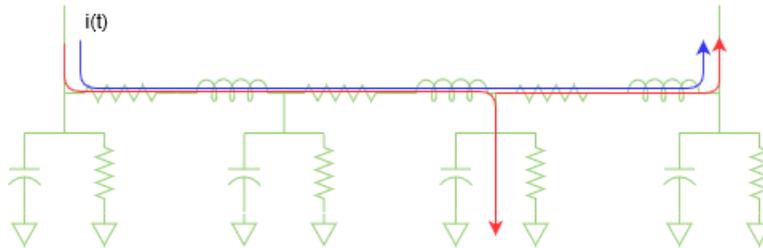


Figura 1-6. Efectos y consideraciones de medida de resistencia por material y tipo de excitación.



Cuando se presenta la fuga a tierra en un polo del rotor, una corriente se deriva sobre dicho circuito de aislamiento, tal como se representa en la siguiente figura

**Figura 1-7.** Conducción de corriente ( $i(t)$ ) en devanado rotor (azul: sin fuga a tierra, rojo: con fuga a tierra)



En el contexto de resistencia de aislamiento se diferencian dos resistencias según el camino de conducción (Kruesi, Howell, & Easton, 1978).

- Resistencia de volumen
- Resistencia superficial

La resistencia de volumen, alude a la pérdida de características aislantes por sobrecalentamiento, frecuencia (saturación), sobretensión (polarización), fricción (desplazamiento de partes, diferencias de temperatura) y exceso de humedad. La resistencia superficial, alude a pérdida de aislamiento principalmente por contaminantes que se depositan y acumulan en la capa externa del material aislante. (Stone, Boulter, Culbert, & Dhirani, 2004). La Figura 1-8 presenta algunos registros:

**Figura 1-8.** Algunos registros de fugas a tierra en rotores de generadores.



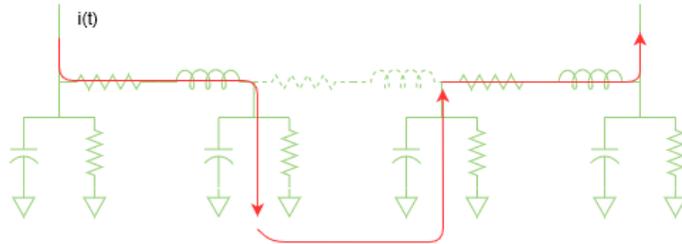
a) Fuga a tierra por suciedad



b) Fuga a tierra por envejecimiento térmico de resina

Una falla a tierra no es alarmante, sin embargo una doble falla a tierra genera un desequilibrio en corriente por polo y con ello inestabilidad mecánica, lo cual deriva en vibraciones excesivas (Michalec & et al, 1990) (ver Figura 1-9)

**Figura 1-9.** Representación circuital de una doble falla a tierra.

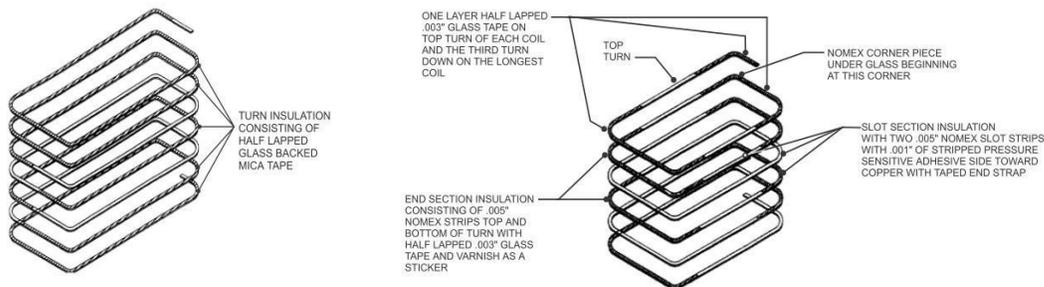


La doble fuga a tierra puede ser clasificada como falla entre espiras, considerando camino conductor la tierra de la máquina.

### 1.2.1 Análisis de componentes del rotor involucrados en una fuga a tierra

Existen varios tipos de aislantes como el papel NOMEX, vidrio epoxi, MICA, entre otros, con su respectiva capa de resina o en general barniz, dispuestos en la cuña, zapata polar o pared del polo. A continuación se presentan unos esquemas de estos arreglos constructivos (Figura 1-10 a Figura 1-11), respetando el idioma y legibilidad del autor (Zawoysky & Tornroos, 2001)

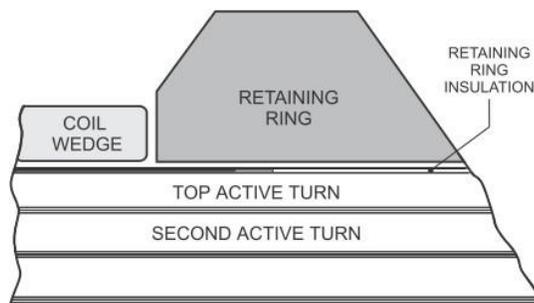
**Figura 1-10.** Disposición del aislamiento entre espiras de un mismo polo



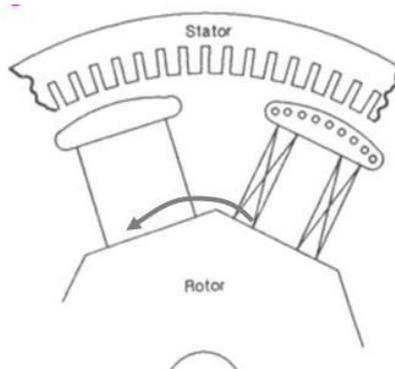
La Figura 1-10, presenta el revestimiento de aislamiento que tiene cada vuelta de conductor en el devanado de un polo, teniendo refuerzos especiales en los cambios de dirección y zonas expuestas sin sujeción mecánica.

La disposición entre conductores y cuerpos a tierras, se ajustan según su condición de instalación, tal como se presenta en las siguientes figuras.

**Figura 1-11.** Espiras apiladas y confinadas por el anillo de retención y las cuñas para el polo respectivo, se destaca el aislamiento entre espiras.

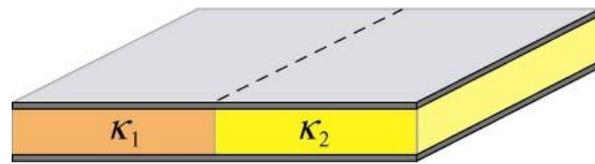


**Figura 1-12.** Corte del generador para esquematizar el contacto de espiras, con el cuerpo del polo, el eje y la zapata o extensión del polo superior (Hartmann, 2016).



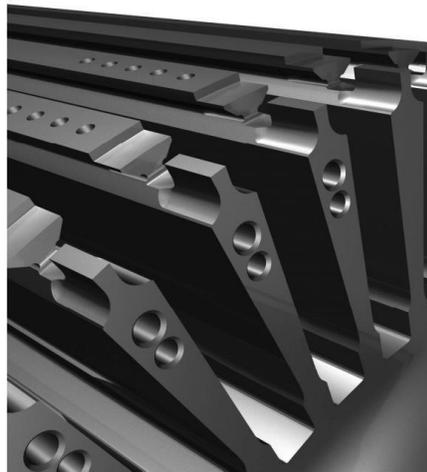
Estos elementos al fallar, cambian su capacitancia a una menor, ya que se acerca más al aire dado el desgaste, o en otras palabras se corre o pierde el material aislante, y al quedar una capa con capacitancias en paralelo, será menor las capacitancias equivalentes, dado que se disminuye la constante dieléctrica ( $k_1$  o  $k_2$ ) de una sección de sus placas.

**Figura 1-13.** Esquema de placas plano paralelo, representando el aislante entre espiras con una zona deteriorada.



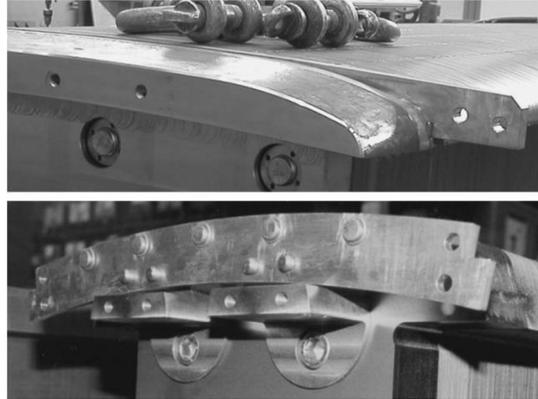
Estos devanados degradan o cambian sus propiedades aislantes principalmente por efectos punta, dilatación térmica y contaminación, siendo este último fácil de comprender, ya que la contaminación puede ser local o bien transportada por el sistema de ventilación desde sus ductos axiales y transversales alrededor de todo el polo.

**Figura 1-14.** Ductos de refrigeración para los cuerpos del polo, esquematizado para un polo liso pero aplicable también para polos salientes (Siemens, 2015) (el mayor espacio acoge las bobinas).



De la Figura 1-12, se observa unas varillas en la zapata polar y la interacción del resto del cuerpo polar cuando se presenta una falla, sin embargo estos elementos, no interactúan directamente debido a su disposición laminar al campo, ya que dichos cuerpos se suelen laminar justamente para evitar corrientes de Eddy o circuitos adicionales a las espiras del rotor, de esta manera en estado estable, es decir campo constante, estos cuerpos no manifiestan inducciones sobre él, a menos que se presente una variación de su área percibida, lo cual implicaría oscilaciones mecánicas o deformaciones del cuerpo rotórico, donde las protecciones por vibración ya hubiesen detenido la unidad (Figura 1-15).

**Figura 1-15.** Varillas en zapata polar y laminación del cuerpo polar, para interactuar en condiciones transitorias como circuitos de amortiguamiento electromagnético



### 1.2.2 Sistemas de protecciones típicos de fuga a tierra

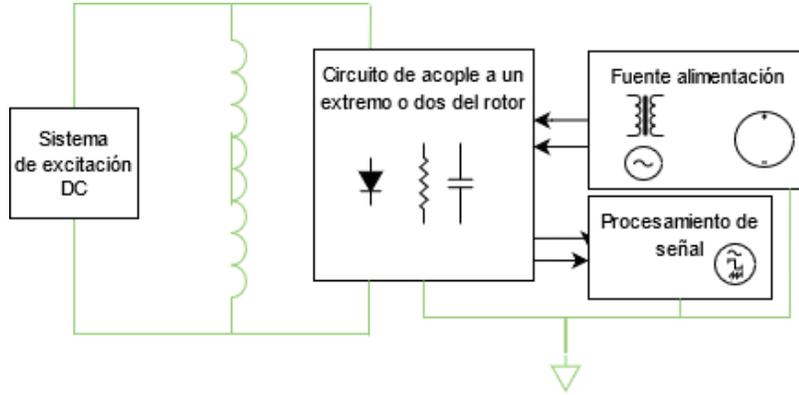
Los sistemas de protección a fallas por fugas a tierra operan por magnitud de falla medida (generalmente hasta  $k\Omega$  para el rotor), apuntado al parámetro de resistencia de aislamiento, tal como lo expone (Eleschova, Belan, & Gasparovsky, 2005), de este trabajo se destaca el modelo resistivo capacitivo que emplea para el dieléctrico y el tipo de protección (64F).

Entre los esquemas de protección fugas a tierra para generadores, se encuentra la norma (IEEE C37.101-1985, 1985), donde a partir de la Tabla 1, se ubica la condición de instalación y magnitud de medida, para determinar el esquema de protección, no obstante, se detalla el esquema predominantemente para el estator, y en poca proporción para el rotor. Un diagrama completo de protección del generador puede ser encontrado en (Anderson, 1999).

Los sistemas de protección para el rotor se clasifican en AC y DC según el esquema de medida, principalmente por su forma de alimentar el circuito de aislamiento (Anderson, 1999). De manera general, las protecciones de fugas a tierra en rotores, son sistemas que alimentan en uno o dos extremos el devanado de campo, inyectando una tensión DC o AC

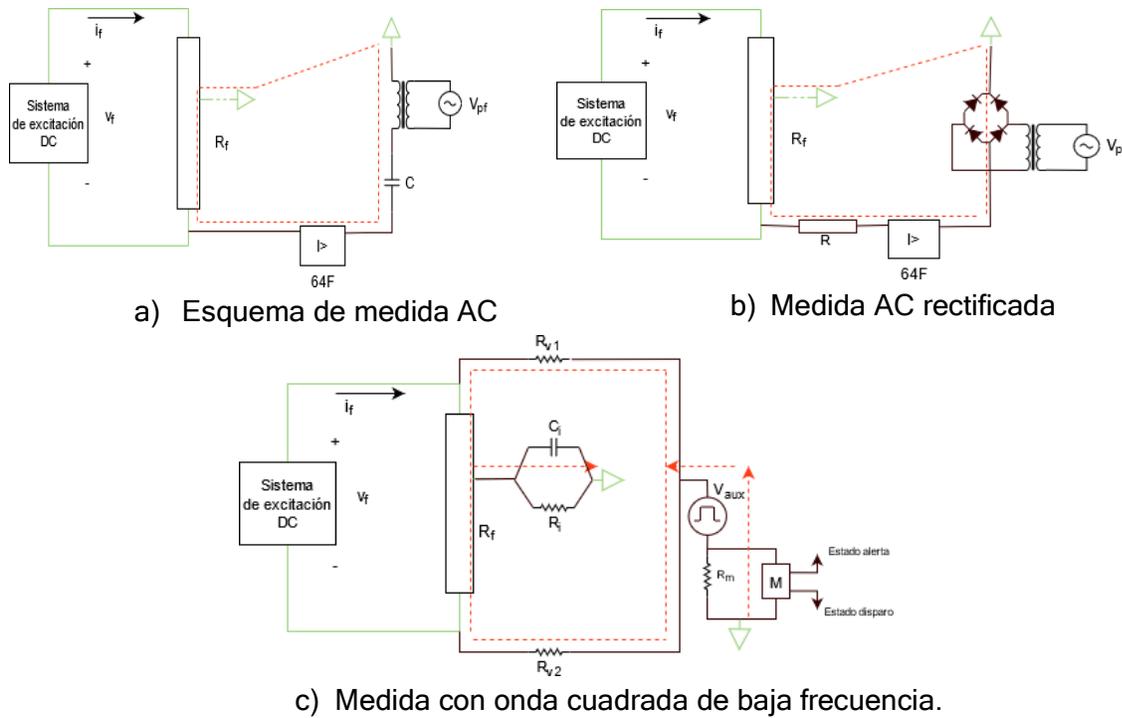
de baja frecuencia, para cuantificar el nivel de aislamiento por la medida de corriente a tierra (Figura 1-16).

**Figura 1-16.** Configuraciones de medida, para protecciones de fugas a tierra en rotores.



Un detalle de estos esquemas se presenta en Figura 1-17, detallando los caminos de conducción en caso de presentarse una reducción de resistencia de aislamiento.

**Figura 1-17.** Esquemas de medida, fugas a tierra, esquemas modificados de (Eleschova, Belan, & Gasparovsky, 2005).



Una revisión de otros esquemas de protección de fallas a tierra, puede ser consultado en (Hartmann, Advanced Generator Ground Fault Protections, n. d.).

La mayoría de los sistemas de protección actuales, presentan el esquema de medida por onda cuadrada, debido a su inyección de corriente simétrica y de baja frecuencia.

Para la estimación de la resistencia de aislamiento y por ende de la magnitud del deterioro de fuga a tierra, se realiza un análisis de baja frecuencia, tal como se representa a continuación a partir del esquema de la Figura 1-17 c). Donde se desprecia el efecto de la resistencia del rotor por bajo valor (del orden de 100mΩ-200mΩ), respecto al valor de la resistencia de aislamiento de kΩ a MΩ. Las resistencias auxiliares R<sub>v1</sub>, R<sub>v2</sub>, son del orden kΩ o MΩ y el capacitor actúa como circuito abierto.

Calculando una resistencia equivalente, se obtiene:

$$I_{aux} = \frac{V_{aux}}{R_m + \frac{R_{v1}R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} + R_i} \quad (1-1)$$

Simplificando

con

$$R_m \ll \frac{R_{v1}R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \quad (1-2)$$

Se determina el voltaje medido como:

$$V_M = \frac{V_{aux}R_m}{R_i + \frac{R_{v1}R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}}} \quad (1-3)$$

Donde la resistencia de aislamiento R<sub>i</sub> es:

$$R_i = \frac{V_{aux}R_m}{V_M} - \frac{R_{v1}R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \quad (1-4)$$

Una vez medida la tensión referida a falla, la protección compara umbrales de operación seguros o no, de acuerdo con los valores de resistencia de aislamiento rotor a tierra permitidos, de esta forma, se cambia el estado a normal, alerta o disparo, según corresponda la resistencia estimada.

En generadores de menos de 100MVA polos salientes, la resistencia del rotor es del orden de  $100\text{m}\Omega$ - $200\text{m}\Omega$ , se considera una condición peligrosa cuando la resistencia de aislamiento desciende de los  $100\text{k}\Omega$  (condición de alarma), note que su valor usual ronda los  $\text{M}\Omega$ , por tanto, a valores menores que  $100\text{k}\Omega$ , comienza a ser comparable con la resistencia del rotor, pero aún insignificante para la condición de disparo. En algunos sistemas como (Digital Energy, n. d.); (Woodward SEG, n. d.) la condición de alarma se ajusta a menos de  $100\text{k}\Omega$  siendo el límite  $20\text{k}\Omega$  (ver tabla 7.1 de (Woodward SEG, n. d.)), no obstante, es preferible ajustar según recomendaciones del fabricante del relé de protección o bajo acuerdo con el área de ingeniería, tal como se expresa en el estudio (Yi & Yi, 2011).

Este capítulo reconoció algunos modelos de medida, criterios de protección y principales partes involucradas en una fuga a tierra, el capítulo siguiente, expone un análisis para la detección y ubicación de fugas a tierra, excluyendo la fuente adicional de la protección, con el fin de analizar el camino de retorno a tierra, que se evidencia al incluir el sistema de excitación.

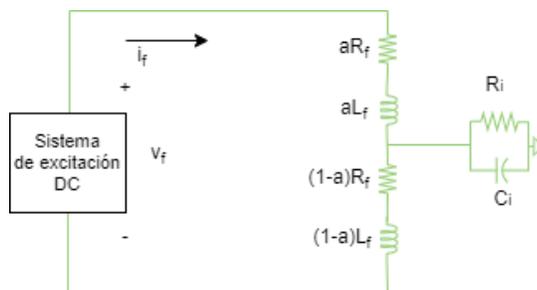
## 2. Modelos de rotor con fuga a tierra

Para analizar el retorno a tierra de la fuga del rotor, se inicia analizando el aislamiento del rotor sin fuente adicional, evidenciando el camino inexistente a tierra bajo este modelo, por tanto, se exponen diferentes arquitecturas del sistema de excitación, enfocando el análisis al sistema de rectificación, quien permite identificar la fuente conectada a tierra y con ella, el camino de la fuga rotor a tierra, por tanto, se exponen las bases de electrónica de potencia necesarias y su análisis circuital, presentando posteriormente, algunos trabajos experimentales, con generadores síncronos auto excitados y el sistema de rectificación expuesto, a fin de adoptar los hallazgos encontrados en estas investigaciones y convertirse en la base experimental necesaria, para juzgar la coherencia de los resultados de las simulaciones con y sin falla a tierra.

### 2.1.1 Modelo de fuga a tierra base

Tomando como objetivo cuantificar la resistencia de aislamiento principalmente, se inicia el análisis bajo un modelo excitación DC, modelo RL de campo y modelo RC de aislamiento, obteniendo:

**Figura 2-1.** Modelo rotor y fuga a tierra simple.



Donde las variables indicadas son:

$I_f$ : Corriente por devanado de campo

$V_f$ : Tensión sobre devanado de campo

$a$ : Fracción del devanado de campo donde ocurre la fuga a tierra

$R_f$ : Resistencia de devanado de campo

$R_i$ : Resistencia de aislamiento equivalente en punto de falla

$L_f$ : Inductancia de devanado de campo

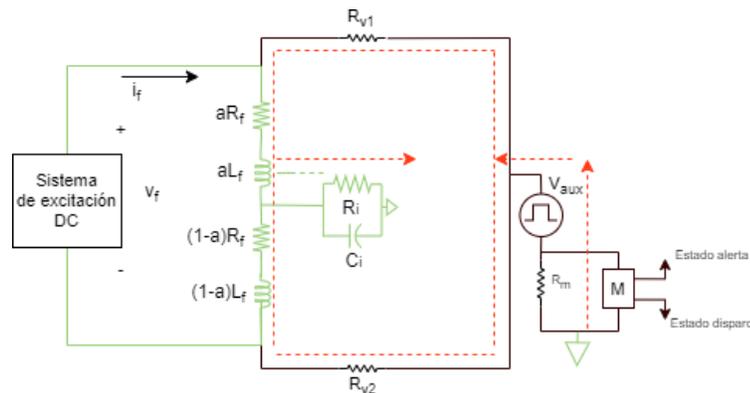
$C_i$ : Capacitancia de aislamiento equivalente en punto de falla

Resolviendo la malla, tenemos

$$-V_f + aI_f(R_f + j\omega L_f) + (1 - a)I_f(R_f + j\omega L_f) = 0 \quad (2-1)$$

La anterior ecuación no tiene retorno por tierra, ya que la fuente percibe su corriente saliendo y retornando a ella, por ende, visto desde la fuente, no hay corriente hacia tierra por el modelo de aislamiento, razón por la cual no se refleja en esta ecuación la resistencia de aislamiento, una forma de incluir el modelo de aislamiento, reside en agregar una fuente adicional al circuito de campo, como el presentado en la Figura 1-17 de un esquema de protección DC, no obstante para complementar el punto de falla, se modifica uno de esos esquemas incluyendo el parámetro “a” (Figura 2-2).

**Figura 2-2.** Modelo rotor y fuga a tierra simple con fuente adicional.



Donde

$V_{aux}$ : Es una tensión pulso cuadrada periódica

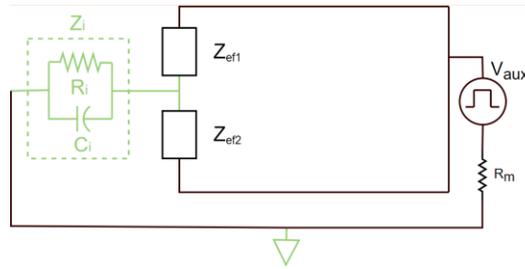
$R_m$ : Resistencia de medida

$R_{v1}$  y  $R_{v2}$  : Resistencias para aislamiento galvánico entre el sistema rotor-medida.

Siendo consecuentes con el análisis anterior, la fuente de excitación ( $V_f$ ) no aporta al circuito del aislamiento, por ende, no se considera en este análisis.

Se pueden simplificar las impedancias como  $R_{v1}$  y  $R_{v2}$  a un único valor  $R_v$ , agrupar en serie las impedancias del rotor ( $R_f + j\omega L_f$ ) y  $(1-a)(R_f + j\omega L_f)$ , para obtener equivalencias en paralelo, concluyendo así, en un circuito serie simple, tal como se esquematiza a continuación.

**Figura 2-3.** Modelo rotor y fuga a tierra simple con fuente adicional.



Simplificando

$$Z_{ef1} = a(R_f + j\omega L_f) + R_v \quad (2-2)$$

$$Z_{ef2} = (1 - a)(R_f + j\omega L_f) + R_v \quad (2-3)$$

$$Z_i = \frac{R_i}{1 + j\omega R_i C_i} \quad (2-4)$$

$$Z_{ep} = Z_{ef1} \parallel Z_{ef2} = \frac{(a - a^2)(R_f + j\omega L_f)^2 - R_v(R_f + j\omega L_f) + R_v^2}{2R_v + (R_f + j\omega L_f)} \quad (2-5)$$

$$V_m = \frac{V_{aux} K_m}{Z_i + Z_{ep} + R_m} \quad (2-6)$$

$$k_a = a - a^2 \leq 0.25 \quad (2-7)$$

$$R_m + Z_i + Z_{ep} = \frac{V_{aux} R_m}{V_m} \quad (2-8)$$

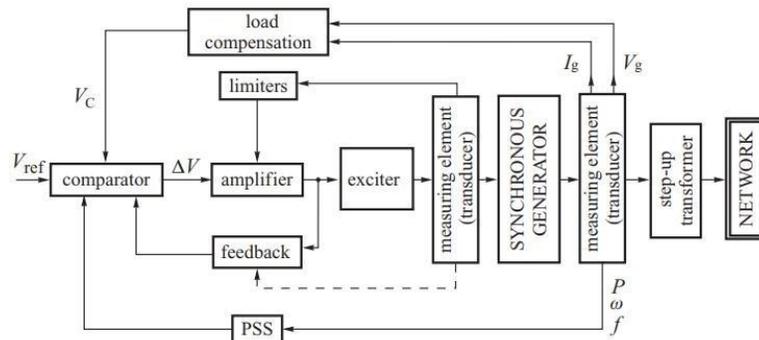
Donde tenemos dos variables  $K_a$  y  $R_i$  separables, en cuyo caso un análisis de sensibilidad de  $V_m$ , permite hallar los dos valores de localización y deterioro de aislamiento.

### 2.1.2 Modelo accionamiento del sistema de excitación

Con el objetivo de incluir en el modelo de rotor y fuga a tierra, el retorno de corriente por tierra, se incluye el modelo de excitación, para este caso, el modelo del regulador automático de tensión (AVR por siglas en inglés).

El alcance de esta tesis no cubre toda la generalidad de un AVR como se indica en (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008), y su esquema de control para un generador (Figura 2-4)

**Figura 2-4.** Esquema de control de un generador conectado a la red (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008).

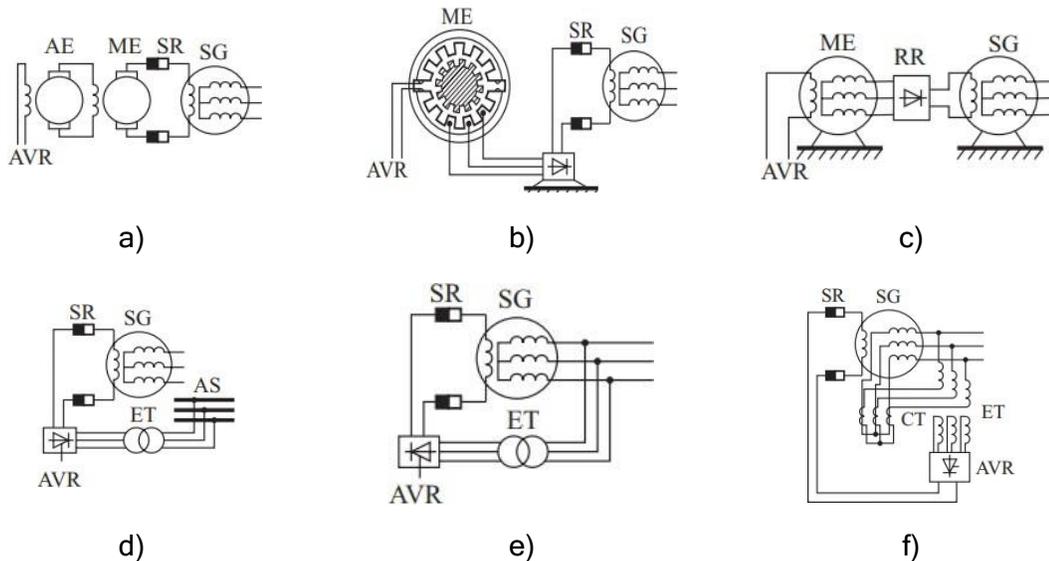


Donde

PSS: Es el estabilizador del sistema de potencia;  $I_g$  Corriente en terminales de generador,  $V_g$  Tensión en terminales de generador; P Potencia activa,  $\omega$  Frecuencia angular, f Frecuencia eléctrica y las señales restantes, corresponden a salidas de los respectivos bloques de control.

Entre las familias de sistemas de excitación se encuentran las siguientes topologías (Figura 2-5).

**Figura 2-5.** Sistemas de excitación típicos para sistemas de generación.



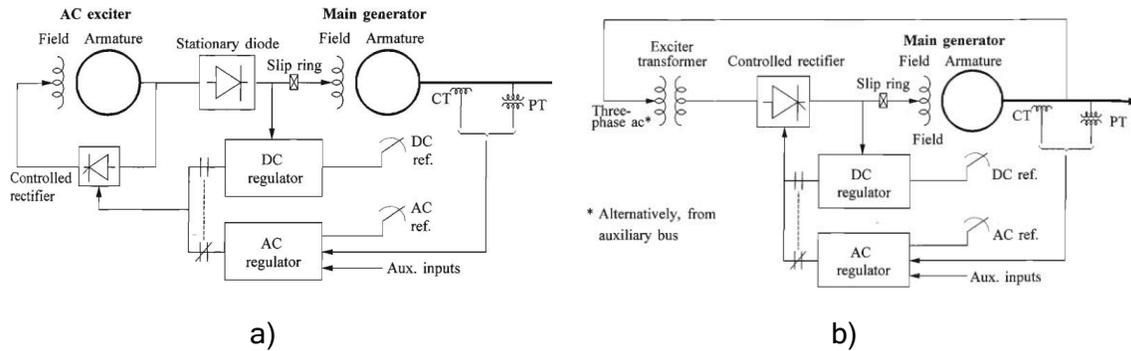
a) Con generador DC; b) con máquina de reluctancia y rectificación; c) rectificación rotante con generador sincrónico adicional; d) rectificador controlado con sistema de alimentación auxiliar; e) rectificador controlador auto excitado; f) rectificación controlada con alimentación auxiliar de tensión y corriente complementario (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008).

Donde las abreviaciones son:

SG: Generador Sincrónico; SR: Anillos Deslizantes; ME: Excitador Principal; AE: Excitador auxiliar; RR: rectificador rotante; ET: Transformador de Excitación; AS: Servicios Auxiliares; CT: Transformador de corriente; AVR: Regulador automático de tensión.

Por sus capacidades de generación y enfoques de control en centrales de generación, se suelen emplear los esquemas d-f.

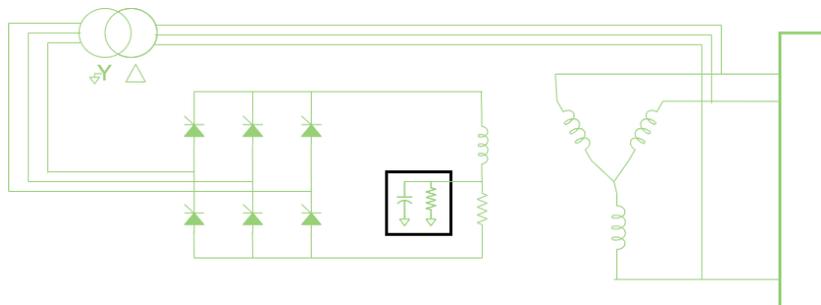
Modelos de AVR se encuentran detallados a nivel de topología y funciones de transferencia o diagrama de bloques, en el estándar IEEE 421.5, donde su selección radica en las capacidades del sistema AVR deseado y su esquema de control, tal como se esquematiza en las siguientes figuras:

**Figura 2-6.** Esquemas o topologías de sistema de excitación con rectificación controlada.

a) Con alternador controlado por rectificación, b) Con rectificación controlada y fuente por transformador (IEEE Std 421.5, 2016)

De las anteriores topologías, se evidencia que las variaciones residen en las variables de control y las fuentes al sistema de rectificación, de igual manera para las topologías restantes.

Para el desarrollo de esta investigación, no es trascendental un modelo de excitación en particular, simplemente el hecho de poder describir el camino de retorno a tierra desde sus fuentes, por lo anterior, se selecciona el modelo de excitación con rectificación controlada bajo un sistema auto excitado, desconociendo los demás componentes del esquema de control de un generador, ya que se busca un análisis progresivo de variables, es decir, no se contempla PSS ni otros elementos adicionales, sumado a ello, este tipo de excitación posee varios trabajos experimentales, siendo complementario para esta investigación, cuyo enfoque es netamente analítico (Figura 2-7).

**Figura 2-7.** Modelo generador síncrono auto excitado con modelo de aislamiento para emulación de fugas a tierra

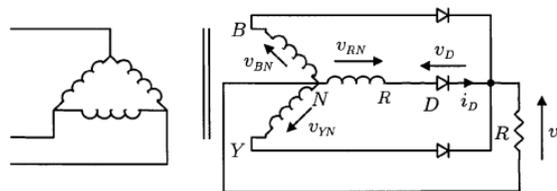
A continuación, se presentan los elementos para el análisis del sistema de rectificación.

### 2.1.3 Rectificación trifásica del AVR, control por diodos

Un sistema de rectificación consiste en tomar una señal de tensión y permitir momentos de conducción o no a partir de la operación de elementos semiconductores, como diodos, tiristores u otros, según características de control de conducción, frecuencia de conmutación y potencia.

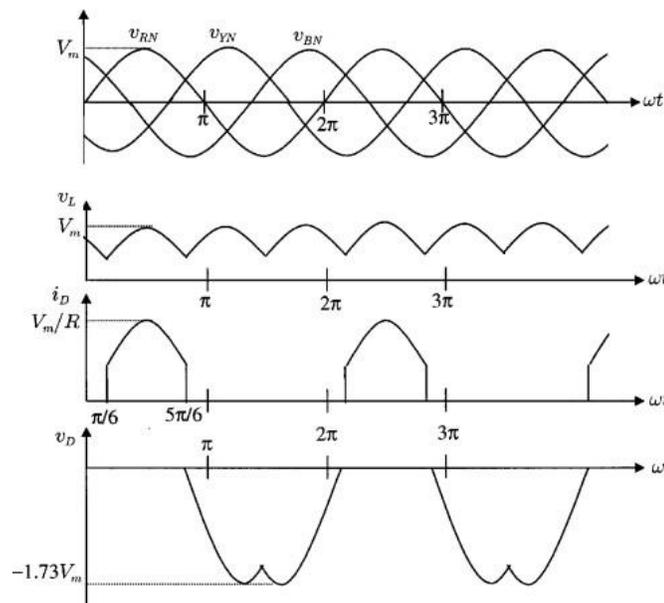
Un sistema simple, reside en una rectificación de media onda para un sistema trifásico, tal como se presenta a continuación (Rashid, 2001)

**Figura 2-8.** Sistema de rectificación trifásico de media onda con diodos (Rashid, 2001).



De este esquema se destacan las señales de tensión en la siguiente gráfica

**Figura 2-9.** Ondas de tensión del sistema de rectificación de media onda con diodos (Rashid, 2001)



La señal de tensión en la zona de conducción de un diodo para la resistencia R, se presenta en un tiempo de conducción  $\omega t$ , entre 30 y 150 grados de su periodo, no obstante, el diodo conduce, ya que su tensión ánodo-cátodo es positiva en esos instantes, es decir, cuando una de las señales trifásicas supera las demás fases, este gorro de conducción se presenta para cada fase de manera independiente, sensibilizando cada uno de los diodos, resultando en la señal rectificadora en  $V_L$  para la carga R.

El aspecto clave de este análisis, reside en entender cuando las señales de tensión reflejan una tensión positiva ánodo-cátodo, para iniciar la conducción por tensión del diodo, siendo este fragmento de tensión quien termina sensibilizando la carga.

Cabe resaltar que la futura alimentación a un circuito de campo bajo esta electrónica, no es estrictamente una señal de DC constante ( $V_L$  en Figura 2-9), estas presentan risis u ondulaciones, dinámica que es de interés para el análisis de fugas a tierra, pues análisis más simplificados, trabajan la señal como una señal DC constante, resultado de calcular el valor promedio de la señal final en carga, en un periodo característico, es decir:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} V_L(t) dt \quad (2-9)$$

Donde

T : Corresponde al periodo de la señal

$t_1$  : Tiempo inicial de inicio de conducción del semiconductor

$V_{DC}$  : Valor DC o valor promedio calculado de la señal sobre la carga  $V_L$

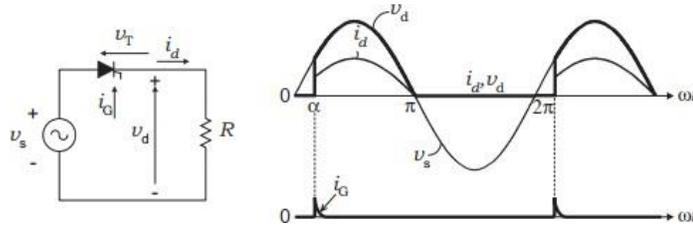
Si analizamos un sistema de mayor potencia y control, como una rectificación controlada de onda completa, es necesario comprender las condiciones para una conducción, donde se emplean típicamente otros semiconductores, tal como tiristores.

#### **2.1.4 Rectificación monofásica controlada por tiristores.**

El control se realiza incluyendo un semiconductor con control en su zona de conducción, para el caso de tiristores, su lógica de operación consiste en tener polaridad positiva en su tensión ánodo a cátodo, y la corriente de compuerta tipo impulso mayor a cero, siendo esta

última quien retrasa o no, la conducción del semiconductor, por ende, se suele analizar como un retraso angular a su operación, tal como se esquematiza en las siguientes figuras.

**Figura 2-10.** Rectificador controlador monofásico circuito y señales eléctricas representativas (Rashid, 2001)

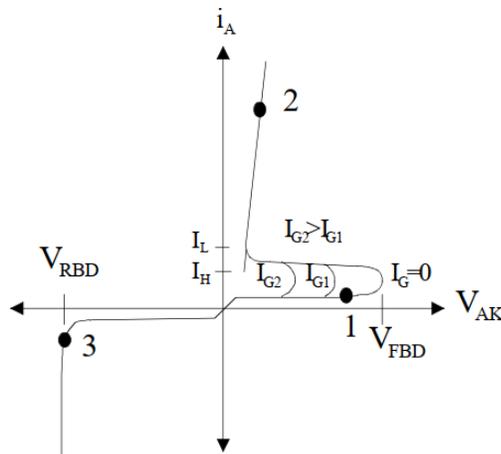


Note que existe una espera de conducción, aun cuando la tensión ánodo-cátodo ya es mayor a cero, siendo este el punto de partida para esperar  $\alpha$  grados (alfa grados) su inicio de conducción, indicado mediante un impulso de corriente en la compuerta de control ( $i_G$ ), si esta señal no se presenta el dispositivo tiristor no permite entrar en su zona de conducción.

### 2.1.5 Rectificación monofásica controlada con carga inductiva (tiristores)

La operación completa de un tiristor se esquematiza en la siguiente figura:

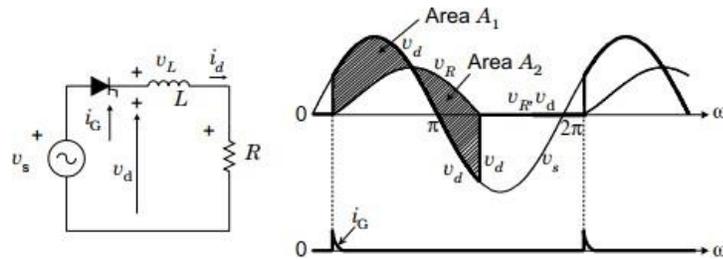
**Figura 2-11.** Curva característica de un tiristor (curva tensión-corriente) (Rashid, 2001)



A partir de la figura anterior, se observa que las corrientes  $I_{GI}$  corresponden a diferentes valores de corriente por la compuerta de conducción, indicando que es necesario superar un umbral mínimo para dar disparo al semiconductor, permitiendo así, dar inicio a la zona de conducción del tiristor ( $I_A$ ).

Existe una zona de conducción inversa, es decir, valores  $V_{AK}$  negativos (tensión ánodo-cátodo), que permite conducción aún con polaridad negativa del tiristor, o bien cuando persiste corriente a través del semiconductor, retrasando aún más la no conducción del dispositivo, este comportamiento se evidencia cuando se tiene una carga inductiva tal como un sistema RL y cambios de polaridad de  $V_{AK}$ , la cual impide cambios bruscos de corriente, tal como se representa a continuación:

**Figura 2-12.** Rectificación controlada por tiristor para fuente monofásica con carga RL, circuito y comportamiento de señales principales (Rashid, 2001).



Para entender cuando cesa la zona de conducción inversa, es necesario cuantificar cuando la corriente se hace cero, esto es, analizando el transitorio sobre RL

$$V_L = V_S - V_R = L \frac{di_d}{dt} \quad (2-10)$$

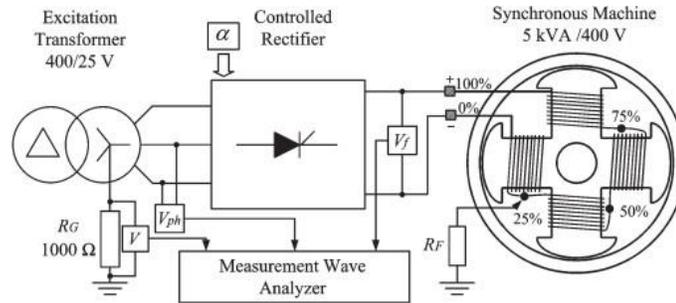
$$i_d(\omega t) = \frac{1}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} V_L d\theta \quad (2-11)$$

La corriente se hace cero, igualando a cero la integral anterior o bien gráficamente, cuando las áreas indicadas en la figura sean equivalentes ( $A_1 = A_2$ ) (

Figura 2-12).

Como topología final, se analiza una rectificación controlada de seis pulsos, topología intermedia en complejidad para centrales de generación, Figura 2-13.

**Figura 2-13.** Diagrama experimental de emulación de fallas a tierra entre polos de generador sincrónico, tomado de (Blánquez, Aranda, Rebollo, & Platero, 2015).

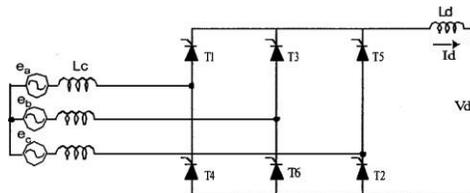


La elección de esta topología, nos permite analizar de manera teórica los estudios teórico-experimentales de los investigadores Platero, Blánquez y en general del grupo de investigación de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Madrid en España, donde los autores, simulan fallas a tierra en el devanado de campo de generadores síncronos auto excitados y fallas en los tiristores, tal como se representan en sus trabajos publicados.

### 2.1.6 Rectificación controlada por tiristor trifásica con carga RL

La topología para esta implementación se presenta en la siguiente figura.

**Figura 2-14.** Topología general de un convertidor en puente trifásico totalmente controlado (Rashid, 2001).



Los puntos claves corresponden a:

- **Ángulo de conducción por grupo de tiristores**

Este corresponde a  $60^\circ$  para un arreglo de seis tiristores, ya que en un rango de  $360^\circ$  como periodo angular, cada grupo de conducción queda espaciado  $60^\circ$ .

- **Secuencia de disparos**

Para orquestar la secuencia de disparos, se puede inicialmente analizar los semiconductores como diodos simples, donde las tensiones involucradas corresponden a dos fases como se esquematiza a continuación, destacando los puntos de interés por colores y en transparencia aspectos no tan relevantes para su comprensión:

**Figura 2-15.** Convertidor en puente trifásico totalmente controlado (gráfico derecha) cuando los tiristores T1 y T6 se encuentran en conducción (gráfico izquierda)



Simulando conducción únicamente en tiristor 1 y 6, se observa que las fases involucradas en la alimentación a la carga RL, reside en la tensión línea-línea  $V_{AB}$ , por ende, la tensión será:

$$V_A = V_m \sin(\omega t) \quad (2-12)$$

$$V_B = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2-13)$$

$$V_C = V_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (2-14)$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (2-15)$$

Simulando conducciones equivalentes se concluye la siguiente secuencia de operación:

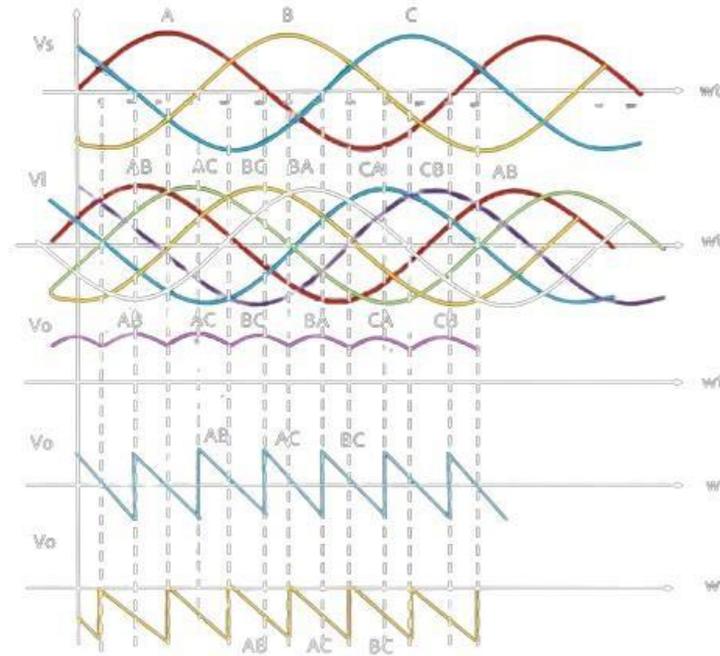
**Tabla 2-1:** Secuencia de disparo de convertidor en puente trifásico controlado complemente.

Fases involucradas	Tiristores activos
AB	6, 1
AC	1, 2
BC	2, 3
BA	3, 4
CA	4, 5
CB	5, 6

- **Comportamiento de rectificación según ángulo de disparo**

Según el ángulo de disparo, en presencia de una carga RL, se describe el siguiente comportamiento:

**Figura 2-16.** Comportamiento de conducción fases A, B, C en la carga RL ( $V_o$ ), bajo ángulo de disparo ( $\alpha$ )



Curvas finales  $V_o$  con:  $\alpha=0^\circ$  (curva  $V_o$  morada),  $\alpha=90^\circ$ (curva  $V_o$  azul),  $\alpha=120^\circ$  (curva  $V_o$  naranja).

Las líneas discontinuas verticales de la figura anterior corresponden a cortes cada  $30^\circ$ , por tanto, se observa que bajo  $\alpha=0^\circ$ , la conducción se hace inmediatamente frente a las tensiones línea-línea que polarizan positivamente los pares de tiristores en conducción, visualizando también, una conducción completa durante  $60^\circ$ .

Para la segunda gráfica  $V_o$  en azul,  $\alpha=90^\circ$ , los tiristores presentan conducción la secuencia dada (ejemplo  $T_1$  y  $T_6$ ), cumplen polarización positiva y se espera  $90^\circ$  hasta iniciar su conducción en la secuencia respectiva, incluyendo en esta, el cruce por cero al sensibilizarse la zona de conducción inversa por tensión, y efecto de carga RL.

Para la última gráfica,  $V_o$  en naranja,  $\alpha=120^\circ$ , se presenta conducción cuando los tiristores de la secuencia dada (ejemplo  $T_1$  y  $T_6$ ), cumplen polarización inversa y se espera  $120^\circ$  hasta iniciar su conducción en la secuencia respectiva.

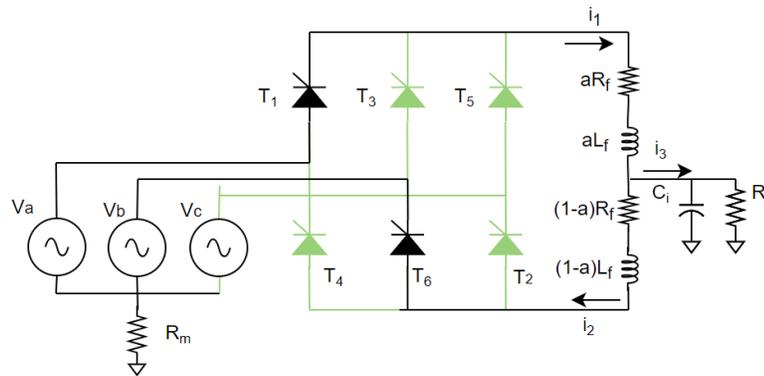
Del análisis anterior, el ángulo de disparo puede derivar cambios de polaridad en la rectificación, e inclusive inversión de tensión (DC negativo).

Para el contexto de centrales de generación, la rectificación se ajusta en ángulos entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .

### 2.1.7 Modelo de fuga a tierra con modelo de excitación

Incorporando el modelo de AVR al modelo rotor con modelo de aislamiento Figura 2-17, y analizando solo una secuencia  $T_1$  y  $T_6$ , ya que las restantes son similares (onda periódica), tenemos:

**Figura 2-17.** Modelo rotor con detalle de excitación y modelo de aislamiento rotor a tierra.



Resolviendo para un disparo de tiristores con  $\alpha$  grados, se analiza un tiempo  $\omega t + \alpha + 60$ :

$$Z_f = R_f + j\omega L_f \quad (2-16)$$

$$-V_a + i_1 a Z_f + i_2 (1-a) Z_f + V_b = 0 \quad (2-17)$$

$$-V_a + i_1 a Z_f + i_3 (Z_i + R_m) = 0 \quad (2-18)$$

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2-19)$$

Simplificando con las dos últimas ecuaciones, tenemos:

$$-V_a + i_1 a Z_f + (i_1 - i_2)(Z_i + R_m) = 0 \tag{2-20}$$

De la ecuación (2-17) se resuelve para “a” y de la ecuación (2-20) se complementa para  $R_i$ , siendo las señales  $V_a$  y  $V_b$  evaluadas en el intervalo  $\omega t + \alpha$  y  $\omega t + \alpha + 60^\circ$ .

$$V_a = V_m \sin(\omega t + \alpha) ; V_b = V_m \sin(\omega t + \alpha + 60^\circ) \tag{2-21}$$

$$V_b = V_m \sin(\omega t + \alpha - 120) ; V_c = V_m \sin(\omega t + \alpha - 60^\circ) \tag{2-22}$$

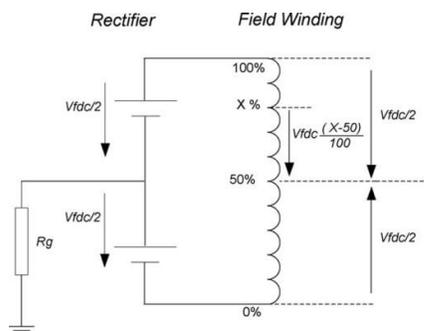
Ya que las fuentes, corrientes  $i_1$  e  $i_2$  y parámetros  $R_m$ ,  $Z_f$  son conocidos, se determinan a y  $R_i$ , es decir el sistema es soluble.

### 2.1.8 Modelo polos rotor y fuga a tierra con modelo de excitación

A continuación, se presentan algunos trabajos de investigación teórico-experimentales de este tipo de arquitectura y falla:

El modelo de (Platero, Blázquez, Frías, & Pardo, 2011), reside en determinar el punto de falla a partir de una asimetría de tensiones, viendo el modelo como un equivalente de Thévenin al rotor y su falla, de manera que la relación se ve como un divisor de tensión, el cual posteriormente validan experimentalmente, Figura 2-18.

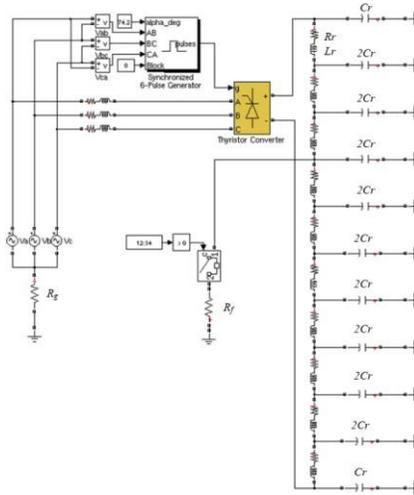
**Figura 2-18.** Modelo fuga a tierra rotor, simplificando rectificación por su resultante DC.



Tomando como base el trabajo anterior, (Blázquez, Aranda, Rebollo, & Platero, 2013) complementan el análisis realizando una descomposición en frecuencia y evidenciando

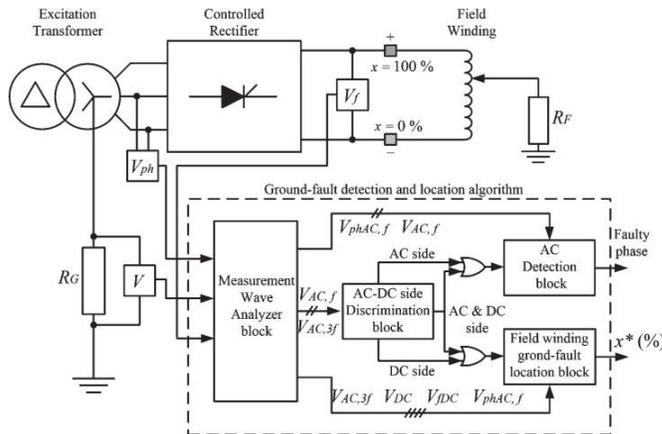
que los armónicos fundamental y tercero, permiten selectividad de la zona de falla en el lado AC o DC del sistema rectificación y rotor, como punto adicional, realizan una sensibilización de la capacitancia del rotor, evidenciando que el método de cálculo de resistencia de falla, presenta mayores errores a capacitancias mayores (Figura 2-19).

**Figura 2-19.** Modelo fuga a tierra rotor, considerando capacitancia a tierra.



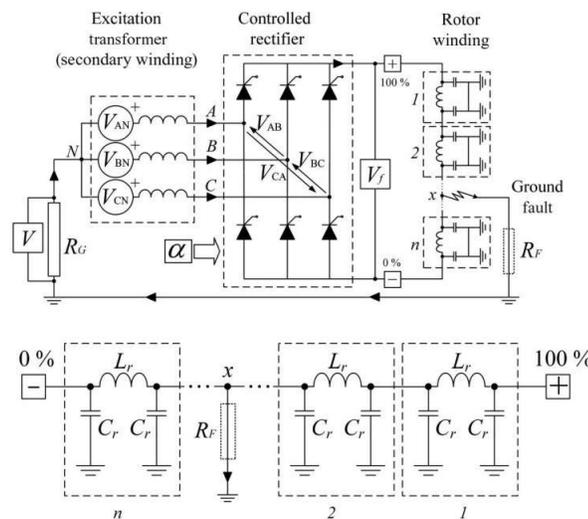
Un avance adicional, deriva ecuaciones exclusivas para la detección de la fuga a tierra del lado de AC (sección rectificación) y lado DC (sección rotor), incluyendo la componente DC de cada lado de señal, estimando el ángulo de disparo de tiristores, el punto y la resistencia de falla, este enfoque se verifica experimentalmente para un generador de polos salientes de 106MVA, (Blánquez, Aranda, Rebollo, & Platero, 2015), Figura 2-20.

**Figura 2-20.** Modelo fuga rotor a tierra, falla en lado AC (entrada al rectificador) o lado DC (devanado campo) del sistema de excitación.



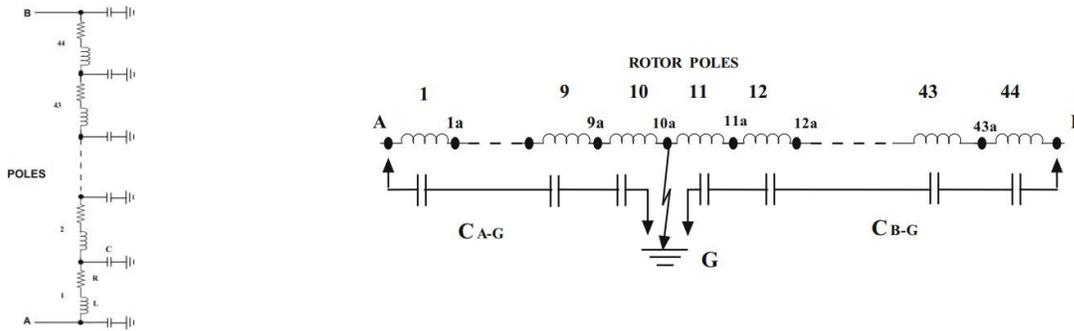
Más adelante (Blánquez, Platero, Rebollo, & Blázquez, 2015), fusionan los dos análisis anteriores, proponiendo un modelo pi de inductancia y capacitancia a cada polo del rotor, donde se tiene inicialmente una capacitancia serie y otra a tierra como en delta, y una bobina en serie, tal como un modelo PI de línea, este modelo se simplifica a solo dos capacitancias en deriva a tierra. Como hallazgo complementario a este estudio, reside en encontrar que la diferencia de fase de la tensión en la resistencia a tierra del transformador de realimentación (circuito rectificador), entre la componente fundamental y el tercer armónico, describen zonas de falla, alerta y operación normal, no obstante, este ángulo es función de los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia, por ende se confirma que la detección es susceptible a todos estos parámetros, proponiendo el cálculo de esta fase como un indicador de disparo de falla (Blánquez, Platero, Rebollo, & Blázquez, 2016), Figura 2-21.

**Figura 2-21.** Modelo fuga rotor a tierra, con modelo PI por polo.



Otra investigación que contribuye a la comprensión de la capacitancia en estos modelos de rotor y falla, la presenta (Palanisamy, 2016), (Figura 2-22), donde se mide directamente la capacitancia e inductancia de un rotor, con el fin de determinar el punto de falla por cambio abrupto en la proporcionalidad del punto medido en falla, respecto a la condición sin falla, en este, se destaca la variación notoria de la capacitancia e inductancia serie, llegando a medir 11.20uF y 151.6mH. En cuanto a capacitancias en paralelo (aislamiento), a medida que se acerca al punto de falla la capacitancia crece, y en falla da justo cero, volviendo a presentar el mismo comportamiento en la otra dirección alejándose de la falla.

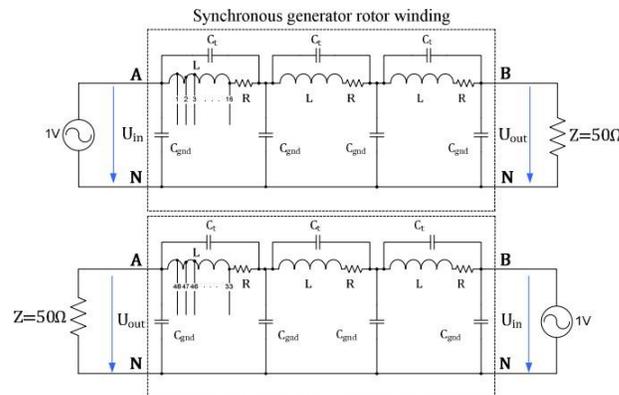
**Figura 2-22.** Modelo fuga rotor a tierra, con modelo PI por polo, evaluando variaciones de capacitancia a punto de falla.



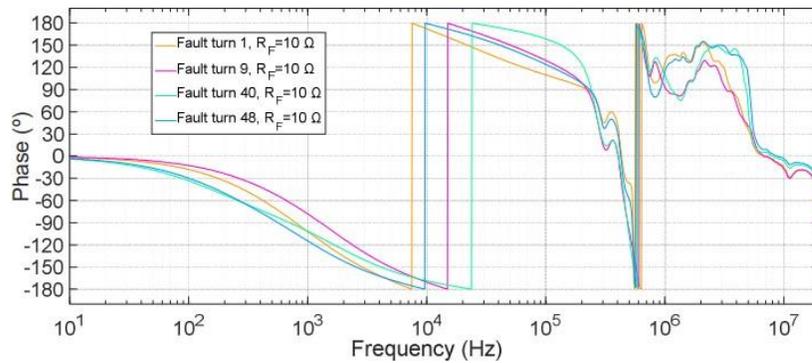
La inductancia presenta el mismo comportamiento (Palanisamy, 2016),(Figura 2-22), es decir, a medida que se acerca a la falla, la medida de inductancia es menor y a medida que se aleja es mayor, se requiere entonces tener registros previos para evidenciar los nuevos cambios eléctricos y estimar el punto o zona de falla.

Continuando con otros análisis que incluyan la capacitancia, se destaca (Martín, Guerrero, Platero, & Mourelo, 2020) (Figura 2-23), en el cual, realizan un análisis de barrido en frecuencia tal como un SFRA a un transformador (IEEE Std C57.149, 2012), (IEC 60076-18, 2012) donde los espectros en magnitud y fase cambian notoriamente en presencia de falla, de manera gráfica, el espectro inicial sin falla, se desplaza a bajas frecuencias en condiciones de fallas por magnitud y punto fallado.

**Figura 2-23.** Modelo fuga rotor a tierra, con modelo PI por polo, analizado experimentalmente como si fuese un SFRA.



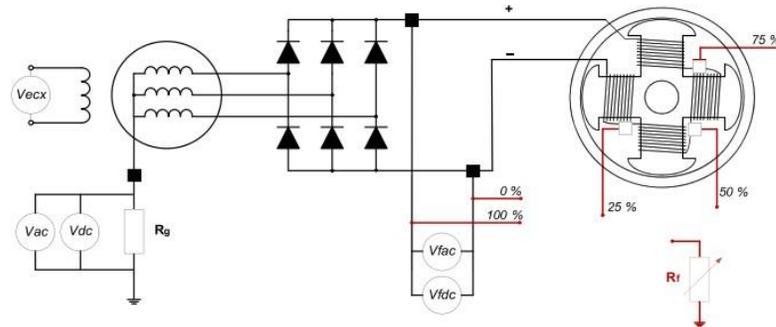
a) Esquema de medida



b) Resultados experimentales del SFRA para el rotor

Investigaciones más recientes, emplean los algoritmos inicialmente motivados por fugas a tierra en rotores de generadores síncronos auto excitados, a otros tipos de sistemas de excitación, e inclusive a otros tipos de generadores, tal como sistemas generador motor o generadores sin escobillas (Pardo , Mahtani, Platero, & Fernández, 2023), (Qiao, Yin, & Wang, 2023).

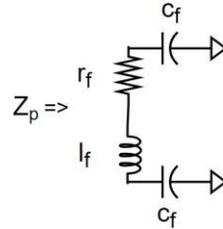
**Figura 2-24.** Modelo fuga rotor a tierra, para generador sin escobillas, implementación de algoritmo de ubicación y cálculo de fuga a tierra en generadores síncronos auto excitados (Pardo , Mahtani, Platero, & Fernández, 2023)



Con base en lo anterior, se pueden emplear modelos PI con capacitancias, donde pesan más las variaciones sobre capacitancias derivadas a tierra que las capacitancias en serie, así mismo, los valores que se adopten puede ser distribuidos entre los polos de manera lineal, entre n polos para la inductancia y entre 2n para las capacitancias derivadas a tierra, no obstante, su valor determina las formas de onda y, por ende, las conclusiones de punto de falla y magnitud

Para la investigación se adopta el modelo PI por polo con la siguiente estructura:

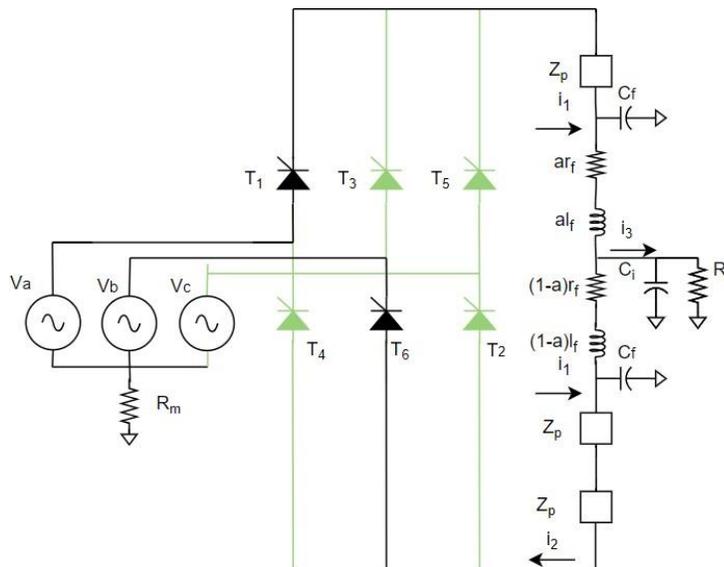
**Figura 2-25.** Modelo PI para polo en rotor.



Donde  $Z_p$  no es una impedancia equivalente, es un modelo de dos puertos. Para la simplificación del modelo es necesario equivalentes Delta-Estrella de manera consecutiva.

Un modelo de 4 polos con rectificación quedaría:

**Figura 2-26.** Modelo polos rotor, con fuga a tierra y circuito de auto excitación.



En el capítulo siguiente, se identifican parámetros para dos modelos de generadores, a fin de generar respuestas eléctricas con y sin falla (Figura 2-26), evaluando su coherencia bajo diferentes valores de falla y localización.

### 3. Ajustes a modelos y generación de datos sintéticos

En este capítulo, se definen los parámetros de resistencias, capacitancias e inductancias de los modelos a implementar, a partir de dos trabajos experimentales principalmente.

El primer modelo (gen#1), toma los datos del generador de (Palanisamy, 2016), indicados en la Figura 3-1.

**Figura 3-1.** Datos Generador usado por. (Palanisamy, 2016), para validación experimental.

"Electrosila"	
Named after S. M. Kirov	
Three phase water wheel alternator	
Rated KVA	56,000
Rated voltage	11,000 V
Frequency	50 Cycles
Stator current	2940 A
Rotor current	1000 A
Power factor	0.9
Connection	Star
Rated speed	136.4 R.P.M
Runway speed	330 R.P.M
Type	CB 845/140—44-T
Sl No	361665
Cooling air temperature	45 °C
State Standard 5616-50 Leningrad 1963, Made in USSR	

Ajustando a:

**Tabla 3-1:** Datos Generador #1 para simulación de fallas (Palanisamy, 2016).

Parámetro	Símbolo	Valor
Inductancia de rotor	Lf	151.6mH
Capacitancia a tierra rotor	Cf	11.2uF
Cantidad de polos	np	44un
Resistencia a tierra transformado de realimentación	Rgrafa	0Ω-5kΩ

Con base en lo anterior y suponiendo una tensión de campo de  $100V_{dc}$ , tenemos que la resistencia de campo es:

$$R_f = \frac{V_{fdc}}{I_{rotor}} = \frac{100}{1000} = 0.1\Omega \quad (3-1)$$

Ya que no es de interés representar 44 polos se lleva a 4 polos:

$$L_p = \frac{L_f}{4} = 37.75mH \quad (3-2)$$

$$R_p = \frac{R_f}{4} = \frac{100}{1000} = 25m\Omega \quad (3-3)$$

$$C_p = 4 * C_f = 44.8\mu F \quad (3-4)$$

Definiendo así valores de inductancia, resistencia y capacitancia de campo, por polo respectivamente.

El segundo modelo (gen#2), toma los datos del generador de (Platero, Blázquez, Frías, & Pardo, 2011), indicados en la Figura 3-2.

**Figura 3-2.** Datos de Generador #2 usado para pruebas en investigación de (Platero, Blázquez, Frías, & Pardo, 2011).

Rated apparent power	5 kVA
Rated voltage ( $\pm 5\%$ )	400 V
Frequency	50 Hz
Pole pairs	2
Rated speed	1,500 rpm
Rated Power Factor	0.8
Measured rotor capacitance	157 nF
Rated Excitation Voltage	22.1 V
Rotor resistance	10.5 $\Omega$
No load excitation Voltage	8.7 V

Ajustando a:

**Tabla 3-2:** Datos Generador #2 para simulación de fallas (Platero, Blánquez, Frías, & Pardo, 2011).

Parámetro	Símbolo	Valor
Resistencia rotor	$R_f$	10.5Ω
Capacitancia a tierra rotor	$C_f$	157uF
Cantidad de polos	np	4un
Resistencia a tierra transformado de realimentación	$R_{gtrafo}$	5kΩ o 1nΩ Según magnitud de falla y corriente mínima de accionamiento tiristores

A partir de la tensión de excitación de 8.7Vdc, y la implementación a la tensión promedio de un rectificador trifásico de seis pulsos completamente controlado (Rashid, 2001), tenemos:

$$V_m = \frac{8.7 * \pi}{3\sqrt{3}\cos(\alpha)} \quad (3-5)$$

Para ángulos de 60°, 70° y 80°, tenemos tensiones pico de 10.5 V; 15.38 V; 30.29 V, por ende, se considera adecuado para las variaciones seleccionadas una tensión de 20Vpico, al igual que la tensión del documento referente.

Se verifican las amplitudes indicadas, sin embargo, se adopta este valor pico en las tensiones de fase, por ende, las tensiones del devanado de campo cambian ligeramente frente a las amplitudes esperadas de los documentos referencia, lo anterior, ya que la tensión que del devanado de campo observa por acción del rectificador, es una tensión línea a línea.

El valor de inductancia de los polos o bien del rotor, no se registra en el documento original, por ende, se aprovecha para simular el devanado considerando un circuito predominantemente resistivo.

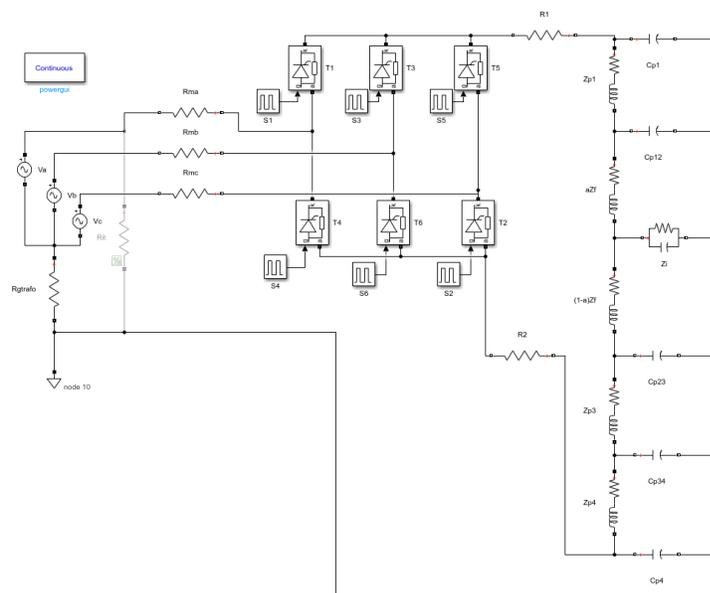
Para las simulaciones se realiza variación paramétrica de los siguientes valores (Tabla 3-3), no obstante, algunas combinaciones de valores generan matrices singulares en su solución, por ende, son condiciones extremas que se excluyen del análisis, con el fin de obtener datos sintéticos de simulaciones numéricamente estables.

**Tabla 3-3:** Valores para análisis de sensibilidad de parámetros (Palanisamy, 2016).

Parámetro	Símbolo	Variación
Desfase disparo tiristor	$\alpha$	[60, 70, 80]
Resistencia falla a tierra	$R_i$	[100M, 50k, 5k, 0.001] $\Omega$
Capacitancia falla a tierra	$C_i$	[1, 7.5] $\mu\text{F}$
Fracción devanado o polo a punto de falla	$a$	[0.001, 0.25, 0.5, 0.95, 0.999] a.d
Resistencia a tierra transformado de realimentación	$R_{\text{grafa}}$	5k $\Omega$ o 1n $\Omega$ Según magnitud de falla y corriente mínima de accionamiento tiristores

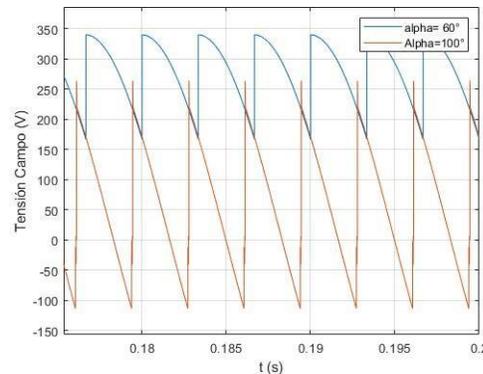
Los criterios de descarte de variación paramétrica, corresponden a valores cercanos a cero, así como magnitudes muy grandes o muy chicas de parámetros  $R_i$  y  $a$ , ya que generan corrientes muy pequeñas, e insuficientes para activar los tiristores. En la Figura 3-3, presenta un esquema para simulación de fallas a tierra genérico. Las resistencias adicionales a las tabuladas, son necesarias para separar numéricamente elementos activos y pasivos en la simulación.

**Figura 3-3.** Circuito de campo implementado con excitación rectificada.



La verificación de este circuito se realiza midiendo el voltaje de campo para dos condiciones operativas semejantes, tal como ángulo de disparo de  $60^\circ$  y  $100^\circ$ , esperando de este último, el cambio de polaridad en la señal rectificadora (Figura 3-4).

**Figura 3-4.** Comprobación de desempeño circuito genérico con generador #1, ante variaciones de ángulo de disparo en tiristores.



Se implementa el segundo generador de menor potencia, evidenciando en las simulaciones, su dificultad de sintonía numérica, pues si bien es usado en investigaciones experimentales, en simulación numérica no presentó estabilidad para las señales y comportamientos esperados, aspectos discutidos en su respectivo análisis que enriquecen los resultados de la investigación, no obstante, por su incoherencia en resultados, estos no son tenidos en cuenta como datos sintéticos para los modelos de análisis restantes.

### 3.1 Simulación y sensibilidad de parámetros en el estudio de fugas a tierra

Para el desarrollo de los casos de estudio, los generadores descritos se simulan en orden creciente en complejidad, partiendo de un análisis del circuito de la Figura 2-17, hasta un sistema como el presentado en Figura 2-26, realizando un análisis de sensibilidad de los parámetros listados en la Tabla 3-3. Se destacan:

- Las señales que más variación presentan, ante cambios en punto y magnitud de falla a tierra
- Forma de ondas

- Identificación de variables de baja sensibilidad ante el punto de falla.

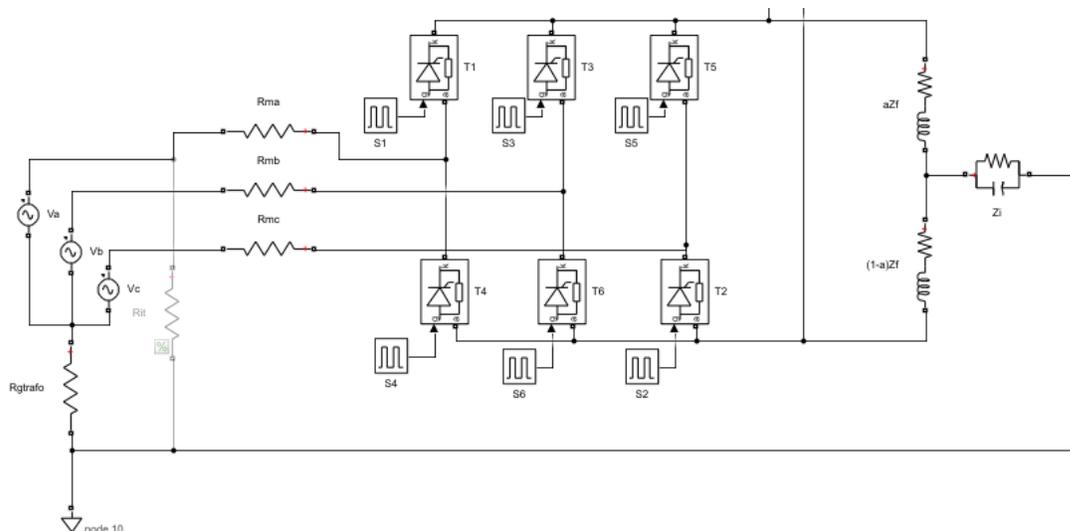
Ya que estas variables serán las candidatas para los diagnósticos de modelo, señal y datos. Los escenarios de sistemas son:

1. Modelo rotor con impedancia fraccionada y derivación a tierra
2. Modelo polos (modelo pi) con falla en polo
3. Modelo de polos con falla entre polos (doble falla)
4. Modelo de polos únicamente con parámetros LC
5. Modelo de polos resistivos predominantemente con falla en polo

### 3.1.1 Modelo rotor con impedancia fraccionada y derivación a tierra (modelo 1)

Para comprender la afección que representa cada parámetro, las siguientes simulaciones modifican la capacitancia a tierra a 0.1nF, pues con los valores originales, se presentan oscilaciones numéricas, por tanto, ajustando la capacitancia a estos valores, la relación RC del aislamiento, permite apreciar amortiguamientos de fuga a tierra esperados en los reportes experimentales.

**Figura 3-5.** Modelo de rotor fuga a tierra simplificado (configuración con Generador #1)



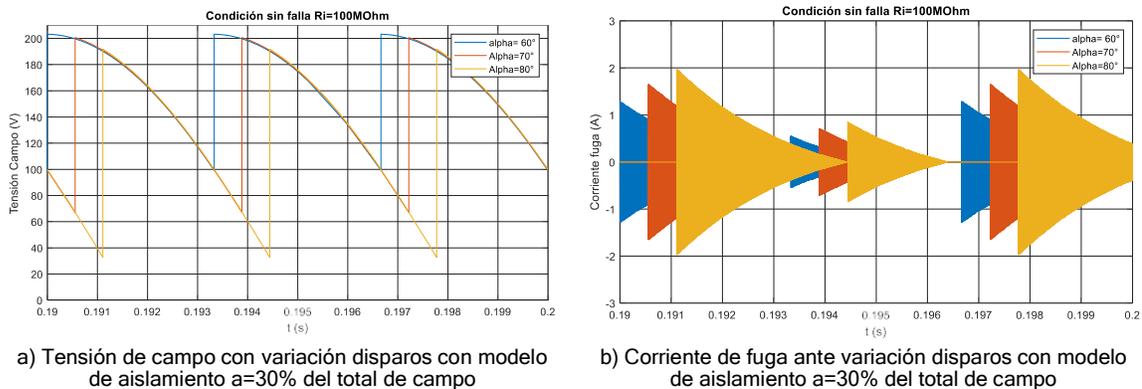
En este punto conviene aclarar, que el desarrollo teórico y simulado, comprende fallas o deterioros permanentes, sin considerar fallas en carga o transitorios debido a cambios de

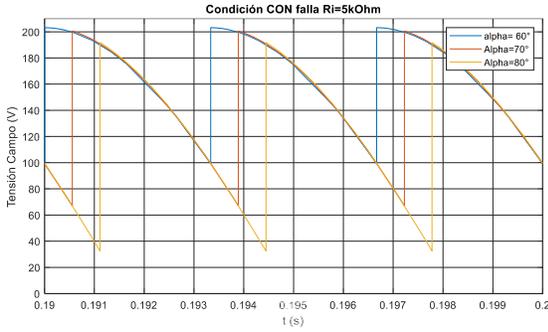
punto de operación de la máquina, ello no implica que no se puedan analizar, únicamente significa que la metodología desarrollada, requiere esperar a que el transitorio pase y en dicha condición de estado estable, se evalúe nuevamente el deterioro, de esta manera, se centra la investigación en condiciones de falla sostenidas o permanentes.

A partir de Figura 3-6, a medida que el disparo se hace más largo, de  $60^\circ$  a  $80^\circ$ , las amplitudes pico a pico son más grandes, dado que incluso intenta llegar a zona de conducción negativa, esto genera que las corrientes sean más oscilantes, siendo coherentes por el menor amortiguamiento simulado, ya que la variación de resistencia va de  $100\text{M}\Omega$  a  $5\text{k}\Omega$  (Figura 3-6 b y d).

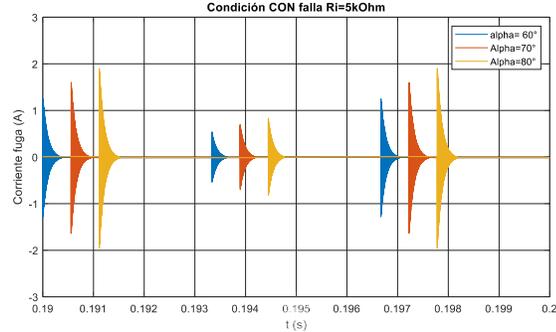
Por otro lado, se identifica que, para el procesamiento de información, se tomará la condición de estado estable en un periodo dado de manera manual por facilidad de implementación de código. En una condición automatizada, se debe determinar algún criterio de condición de estado estable, a partir de cambios tolerables en un cálculo, como valor promedio, valor RMS u otro, lo importante es que sea consistente la ecuación en el tiempo.

**Figura 3-6.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga, para fallas a diferentes parámetros del circuito en Figura 3-5, variación de  $\alpha$  y  $R_i$





c) Tensión de campo con variación disparos con modelo de aislamiento a 30% del total de campo y falla a 5kΩ



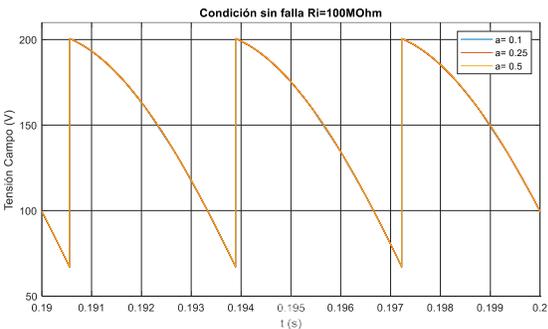
d) Corriente de fuga con variación disparos con modelo de aislamiento a 30% del total de campo y falla a 5kΩ

La tensión de campo no presenta mayores variaciones en condición con o sin falla, siendo hasta el momento las dinámicas de corrientes las más sensibles, tanto en magnitud como en amortiguamiento.

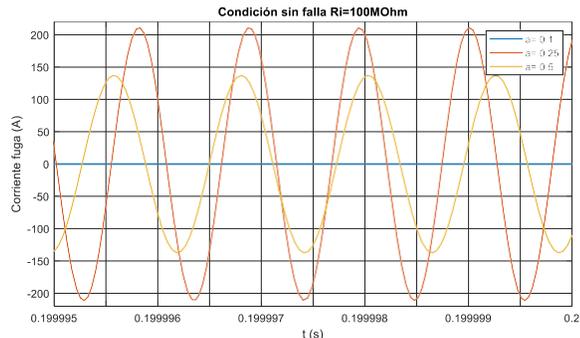
Al variar el punto de falla bajo los parámetros configurados ( $\alpha=70$ ,  $C_i=1\text{nF}$ ), omitiendo los picos de corriente, e indicando valores finales, tenemos:

La Figura 3-7, presenta una condición sin falla, con corrientes del orden de 200A, lo cual no es coherente frente a los trabajos experimentales estudiados, ni a los resultados teóricos analizados, pues implicaría en condición de aislamiento adecuado, una gran corriente circulando sobre este, por lo cual, un parámetro que entra en duda sobre este retorno a tierra, corresponde a la capacitancia de aislamiento, indicando que no está bien ajustada su valor.

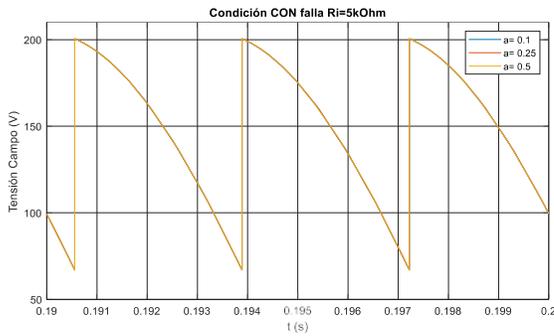
**Figura 3-7.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del diagrama, Figura 3-5, variación de  $\alpha$  y  $R_i$



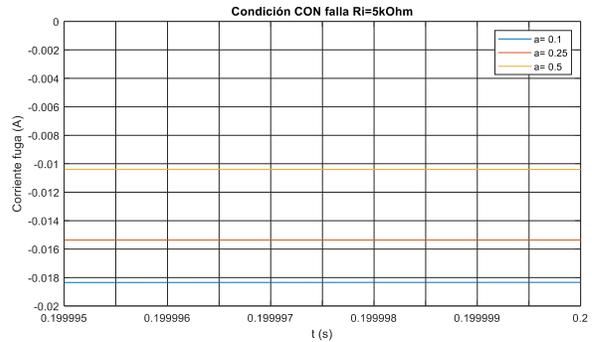
a) Tensión de campo a diferentes puntos de modelo de aislamiento sin falla a tierra



b) Corriente de fuga sin falla simulada a diferentes puntos de falla



c) Tensión de campo a diferentes puntos de modelo de aislamiento con falla a tierra



d) Corriente de fuga con falla simulada a diferentes puntos de del devanado

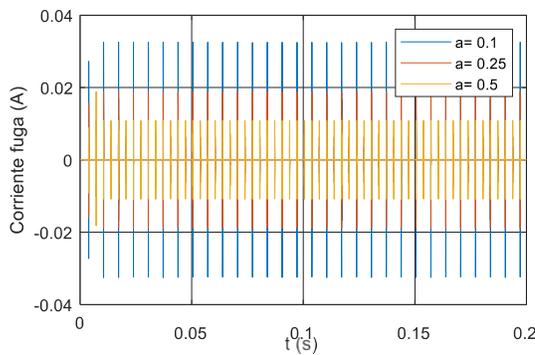
Por otro lado, a medida que la falla es más cercana al punto central, la corriente de desequilibrio es menor, donde una fracción retorna por una fase y la otra por tierra, siendo en este caso negativo únicamente por la asignación de polaridad en la resistencia medida.

Omitiendo la tensión de campo, la corriente de fuga para condiciones extremas de capacitancia, tenemos:

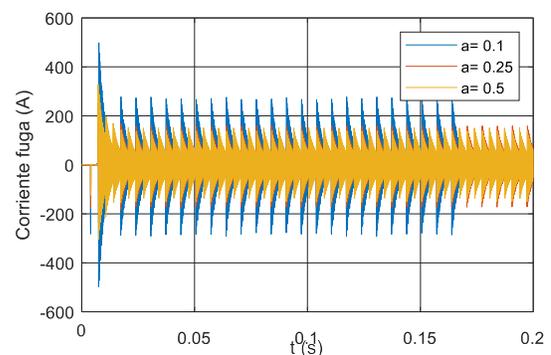
La Figura 3-8, se presenta en una escala reducida a pesar de perder legibilidad, ya que solo es de interés, ver las escalas y las oscilaciones que se generan para concluir:

- A pesar que las gráficas b y d son valores diferentes de resistencia a falla, es predominante el efecto capacitivo y por ende la oscilación.

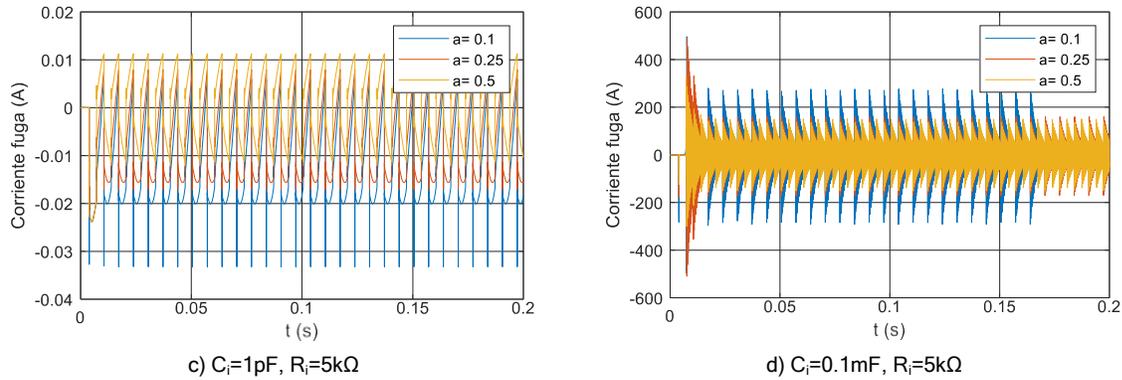
**Figura 3-8.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del diagrama Figura 3-5, variación de  $C_i$  y  $R_i$



a)  $C_i = 1\text{pF}$ ,  $R_i = 100\text{M}\Omega$



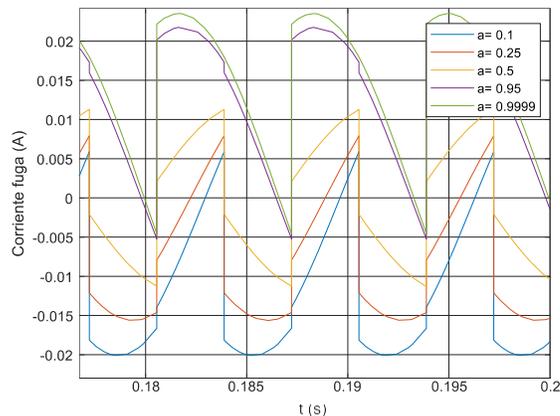
b)  $C_i = 0.1\text{mF}$ ,  $R_i = 100\text{M}\Omega$



- Ya que la capacitancia puede ocasionar oscilaciones numéricas como las presentadas para valores bajos, se simula un modelo sin capacitancia, obteniendo valores bajos de corriente, pero con picos abruptos de la misma, es decir, oscilaciones numéricas, ya que el modelo ideal capacitivo si tolera cambios bruscos en corriente.
- Finalmente se ajusta la capacitancia de aislamiento a  $0.001 \text{ pF}$ , limitando la variación de resistencia de aislamiento entre  $5 \Omega$  y  $1 \text{ M}\Omega$ , valores en los cuales no se generaron estas oscilaciones numéricas.

Con lo anterior es necesario profundizar en la componente capacitiva de estos modelos, pues no están reflejando las dinámicas medidas en los trabajos experimentales, tales como los resultados reportados por el grupo de investigación de Blanquéz. Una variación más amplia del punto de falla se presenta a continuación:

**Figura 3-9.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del diagrama Figura 3-5, variación amplia de  $a$  con parámetros estables de  $C_i$



Donde se presenta un cambio de signo de la señal, siendo más cerca a cero a medida que se acerca a 0.5 del devanado. A medida que se presenta la falla en un extremo, la amplitud de corriente es mayor positiva o mayor negativa. A continuación, un resumen de las observaciones:

$R_i C_i$	Alto	Menor amortiguamiento en fuga
$R_i C_i$	Bajo	Mayor amortiguamiento en fuga
$C_i$	Alto	Refleja oscilaciones numéricas en el modelado simulado, ya que los picos reportados no se presentan en ningún trabajo experimental consultado para esta investigación
$C_i$	Bajo	Efecto similar al modelo únicamente Resistivo, lo cual deriva que a nivel general, el efecto es compartido por el producto RC.
$a$	0 a 0.5 o 1 a 0.5	El punto de falla presenta amplitudes más cercanas a cero a medida que se acerca a 0.5 o mitad del devanado, cambiando incluso el sentido de la corriente a predominantemente positivo o negativo
$V_f$	Indiferente	No refleja comportamientos adicionales con o sin fugas a tierra, es una variable únicamente para verificar excitación correcta al devanado de campo
$\alpha$	Ángulo de disparo mayor	A mayor ángulo de disparo se consigue mayor tiempo de conducción de tiristores dado el comportamiento de zona inversa, por ende, una mayor oscilación de tensión y corriente, siendo notorio el retraso en la corriente de fuga.

Con el propósito de evitar las oscilaciones numéricas identificadas, se replantean los parámetros de simulación a:

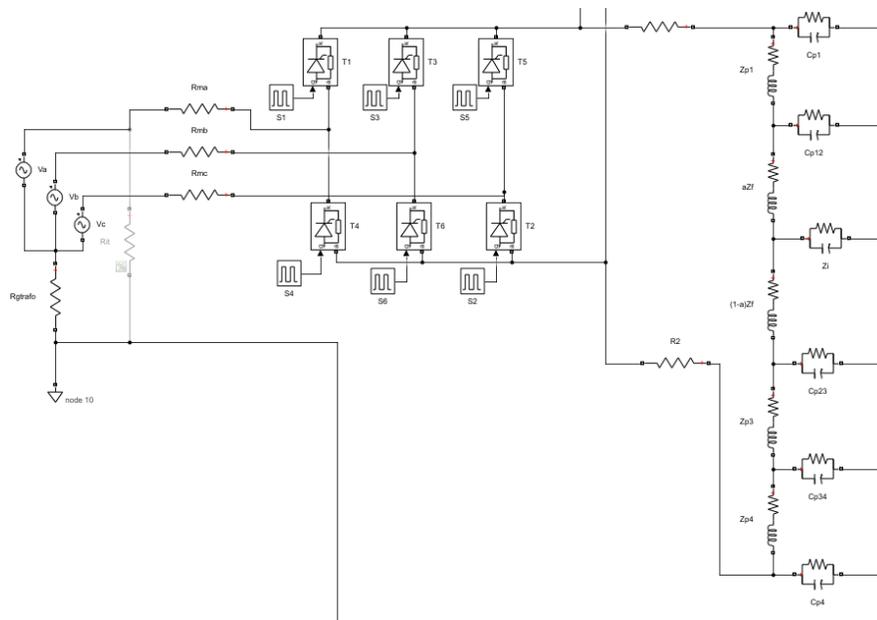
**Tabla 3-4:** Valores para análisis de sensibilidad de parámetros (Palanisamy, 2016).

Parámetro	Símbolo	Variación
Desfase disparo tiristor	$\alpha$	[60, 70, 80]
Resistencia falla a tierra	$R_i$	[1M, 50k, 5k, 5] $\Omega$
Fracción devanado o polo a punto de falla	$a$	[0.001, 0.25, 0.5, 0.95, 0.999] a.d
Resistencia a tierra transformador de realimentación	$R_{gtrafo}$	1n $\Omega$

### 3.1.2 Modelo polos-rotor con falla en polo (modelo 2)

De acuerdo a la sensibilidad de parámetros de la sección anterior, la edición de parámetros debe volver a ser verificada, en especial por la sensibilidad a valores que generan oscilaciones numéricas o incongruencias, tal como a mayor resistencia de aislamiento mayor corriente de fuga, situación encontrada a ciertos valores de capacitancia en modelo de polo y aislamiento, así como advertencias de software para solución de matrices singulares.

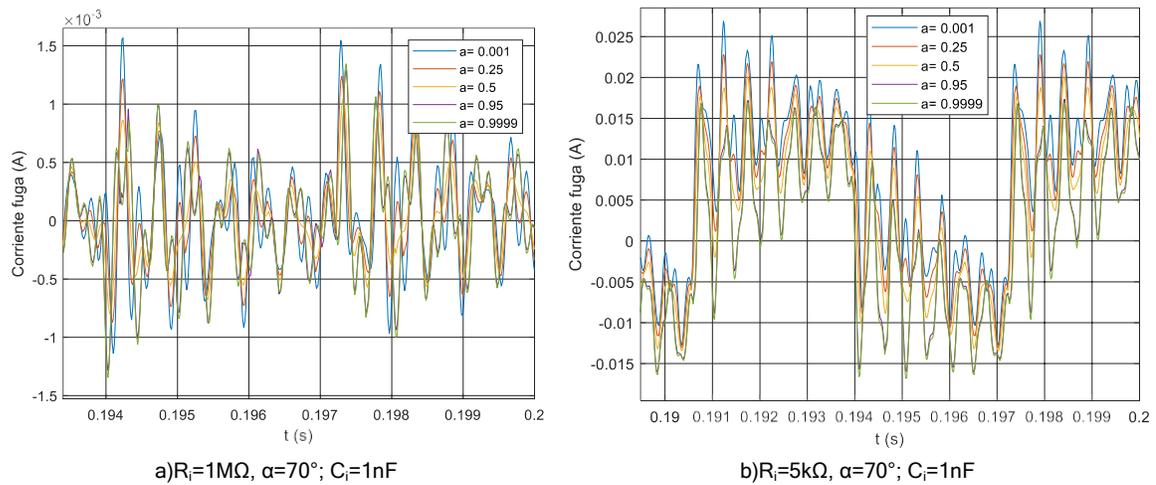
**Figura 3-10.** Modelo de rotor fuga a tierra con modelo  $n$  por polo (configuración con Generador 1)



Posterior barrido de variables y constancia coherente en resultados, los cambios finales son:

- Resistencia de modelo  $n$  para polos de  $10M\Omega$ ,  $C_i=1nF$  y demás parámetros listados para el generador #1

Obteniendo:

**Figura 3-11.** Corriente fuga a tierra generador #1 con modelo n por polo, con y sin falla.

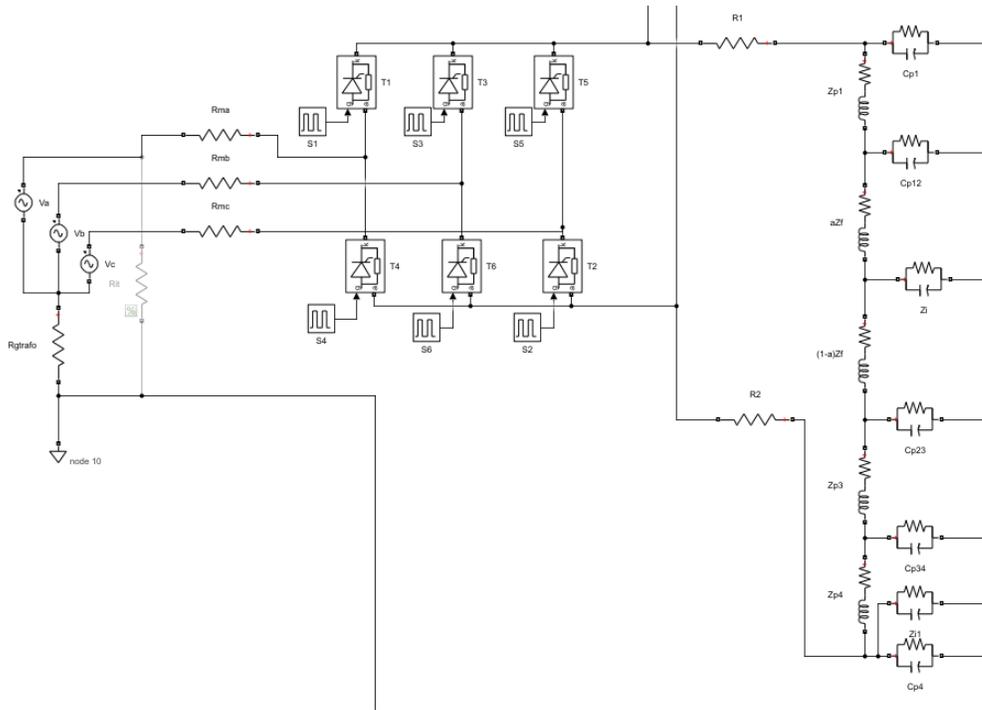
Las respuestas y tendencias son equivalentes al modelo base, donde inclusive su análisis es equivalente, ya que al reducir el circuito al punto de falla se llega a una topología en Y, como las inicialmente analizadas.

### 3.1.3 Modelo rotor polos en PI con falla entre polos (modelo 3)

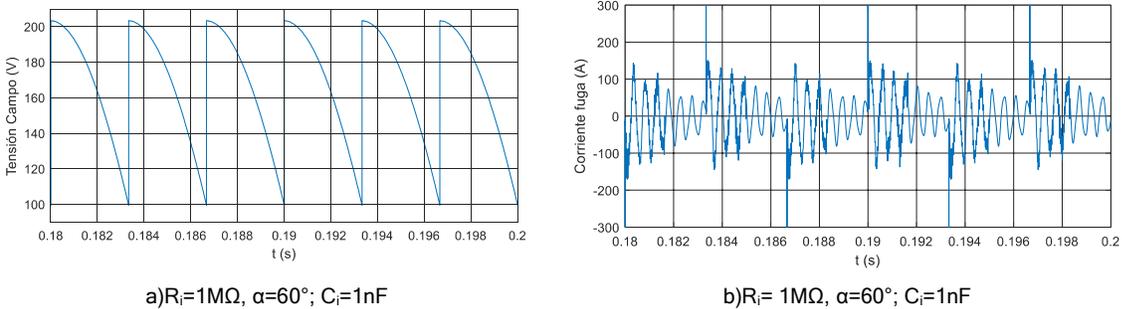
Con el objetivo de conocer las señales eléctricas bajo una simulación de doble falla a tierra se analiza el circuito de la Figura 3-12:

Se analizan diversos casos de parámetros buscando incoherencias numéricas, sin embargo, se presentan los mismos resultados con y sin doble falla a tierra (Figura 3-13), resultados equivalentes aun modificando la topología de la siguiente manera:

- Modelo PI por polo con modelo RC a tierra
- Modelo PI por polo con modelo C a tierra
- Modelo PI por polo con modelo R a tierra
- Modelo serie por polo RL sin conexión a tierra
- Modelos anteriores con modelo R para fuga a tierra

**Figura 3-12.** Modelo rotor con doble fuga a tierra, con modelo  $\pi$  por polo y sus variantes.

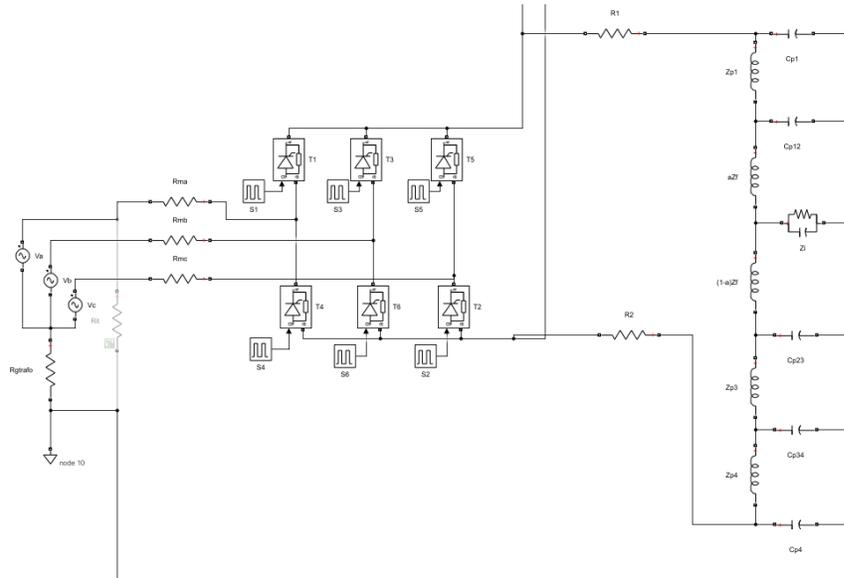
En ninguno de los cambios expuestos se presenta una diferenciación notable de señales, por ende, se concluye que este modelo no es el adecuado para estudiar las fugas dobles a tierra, razón por la cual se sugiere realizar este caso de falla como si fuese un corto entre polos u espiras con retorno por tierra, aspecto fuera del alcance de esta investigación.

**Figura 3-13.** Tensión de campo y corriente fuga a tierra generador #1 con modelo  $\pi$  por polo, simulando doble falla a tierra (perfil característico de casos simulados).

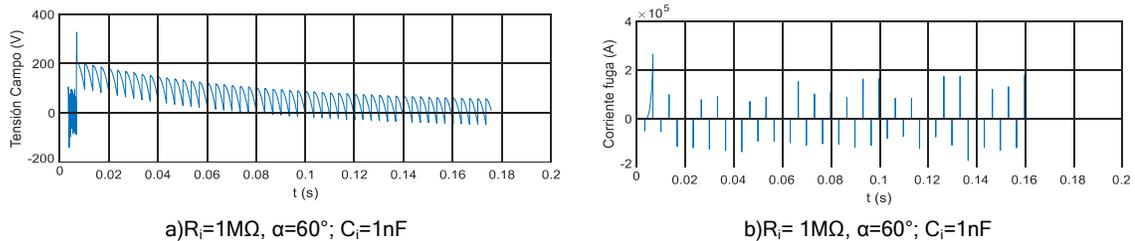
### 3.1.4 Modelo polos rotor con modelo LC (modelo 4)

Se analiza por simulación un modelo LC únicamente para el rotor con fugas a tierra (Figura 3-14).

**Figura 3-14.** Modelo de rotor y fuga a tierra con parámetros LC.



**Figura 3-15.** Tensión de campo y corriente de fuga en modelo predominante LC.



Entre los resultados se observa un amortiguamiento extenso, derivado del amortiguamiento con la única resistencia presente, que corresponde a la resistencia de aislamiento, además, el comportamiento de la tensión de campo que anteriormente siempre fue estable bajo la rectificación esperada, en este caso, aparece una componente de baja frecuencia que ocasiona una envolvente. No se detallan los valores cercanos a cero de corriente, pues dada la respuesta de tensión de campo no amerita su detalle.

Se simuló modificaciones topológicas como modelo predominante resistivo de fuga u aislamiento, sin mejorar en los resultados esperados, inclusive, se eliminó la componente

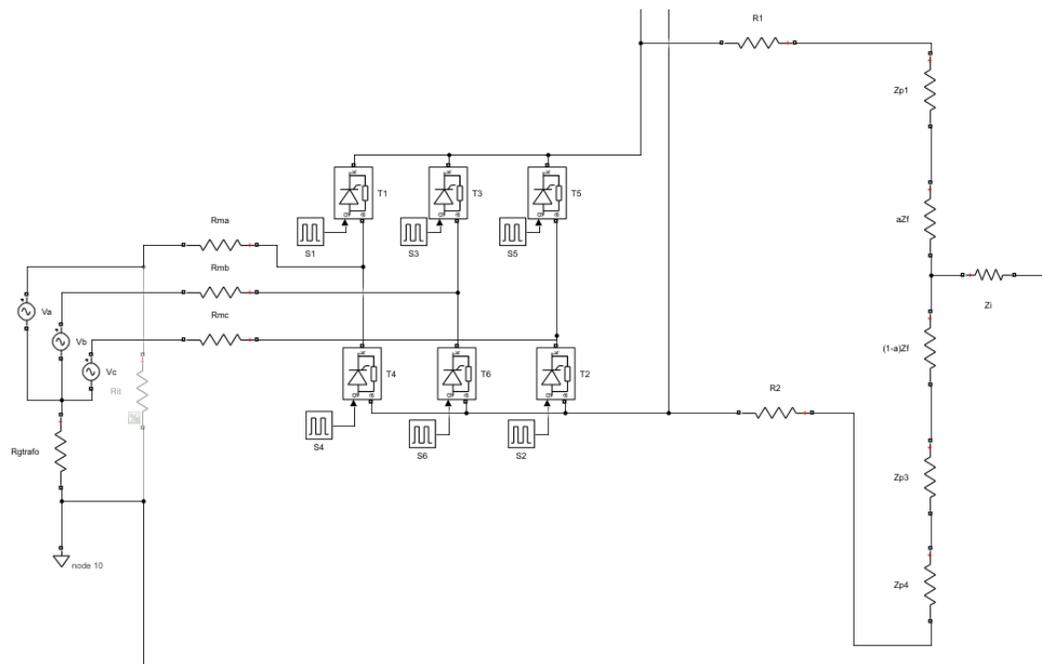
capacitiva de los modelos de polos, mejorando un poco la respuesta en corriente, pero la tensión de campo continuaría presentando la oscilación de baja frecuencia, resultado no esperado frente al comportamiento de las referencias experimentales en el tema.

Por lo anterior este modelo pierde capacidad de reproducir señales esperadas como la tensión de campo y la dinámica de fuga, por ende, se descarta para los análisis siguientes.

### 3.1.5 Modelo polo rotor predominantemente resistivo (modelo 5)

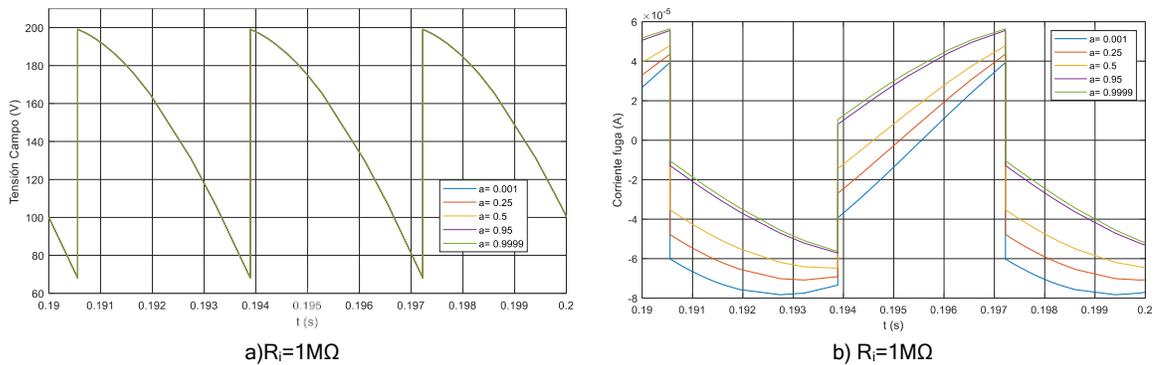
El modelo se esquematiza en la Figura 3-16.

**Figura 3-16.** Modelo de rotor y fuga a tierra, con parámetros resistivos únicamente.

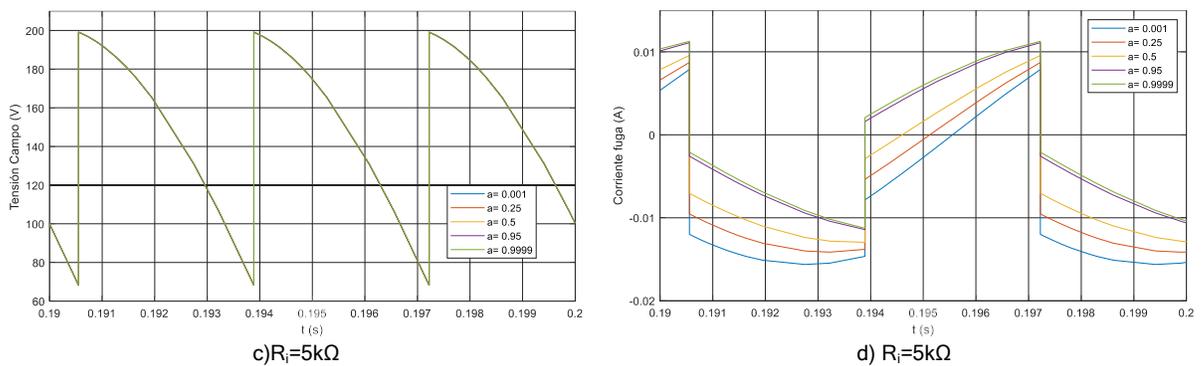


Se destaca que las formas de onda presentan mayor suavidad al eliminar la componente capacitiva del aislamiento (Figura 3-17 y Figura 3-18).

**Figura 3-17.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del modelo rotor-fugas a tierra puramente resistivo (aislamiento a  $1\text{M}\Omega$ )



**Figura 3-18.** Respuestas de tensión de campo y corriente de fuga para fallas a diferentes parámetros del modelo rotor-fugas a tierra puramente resistivo (aislamiento a  $5\text{k}\Omega$ )



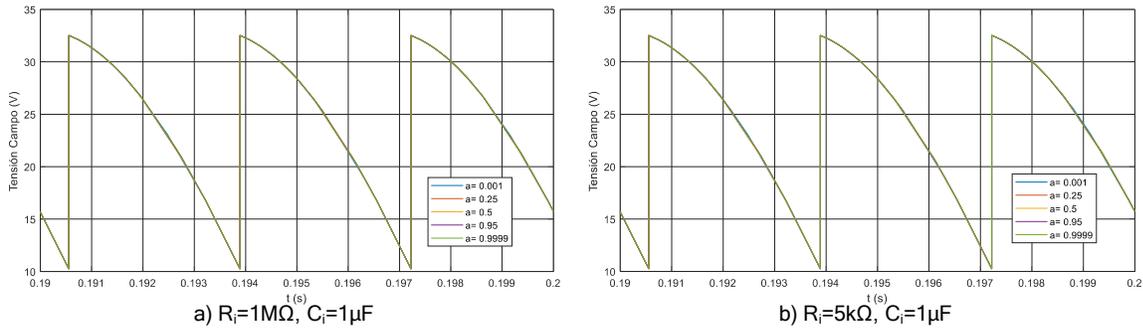
Por lo anterior, se preservan los resultados del modelo únicamente resistivo, debido a la coherencia de tensión de campo y que, bajo disminución de resistencia de aislamiento, la corriente de fuga es mayor.

### 3.1.6 Consideraciones finales para generación de datos sintéticos

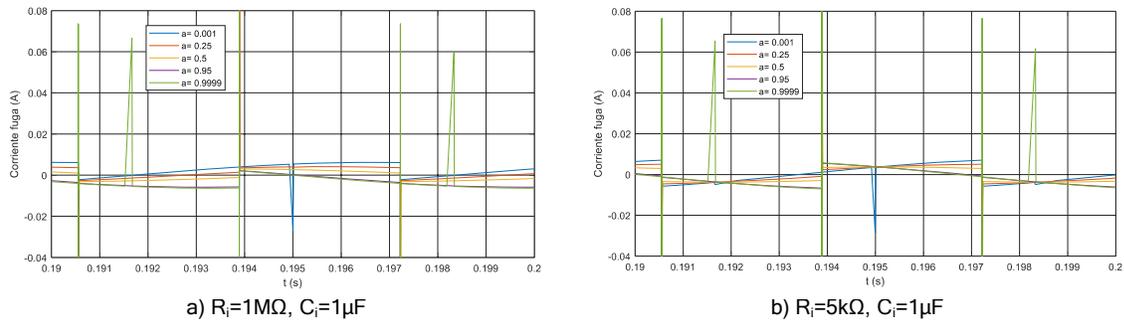
Las simulaciones con el generador #2, presentan un reto adicional, el cual reside en no considerar el parámetro  $L$  en el devanado de campo, esto genera transitorios más cortos en corriente y un esfuerzo en estimación de la capacitancia de aislamiento requerida, tal que evite oscilaciones numéricas, sin embargo, pese a las variaciones de parámetros, este

modelo de generador no permitió validar los comportamientos esperados para los modelos de fugas a tierra. Se presentan algunos de sus resultados a continuación:

**Figura 3-19.** Respuestas de tensión de campo para generador #2, modelo rotor fuga a tierra base.



**Figura 3-20.** Respuestas de corriente de fuga a tierra para generador #2, modelo rotor fuga a tierra base.



Posteriormente simulaciones con el generador #2, se redefinen los parámetros de simulación para el generador #1, con el fin de evitar situaciones no convergentes en la generación de datos sintéticos.

**Tabla 3-5:** Valores para generación de datos sintéticos con modelo de generador #1.

Parámetro	Símbolo	Variación
Desfase disparo tiristor	$\alpha$	[60, 70, 80]
Resistencia falla a tierra	$R_i$	[1M, 50k, 5k, 5] $\Omega$
Fracción devanado o polo a punto de falla	$a$	[0.1, 0.25, 0.5, 0.8, 0.95] a.d
Resistencia a tierra transformado de realimentación	$R_{gtrafo}$	1n $\Omega$

Los puntos de falla muy extremos, tal como 0.001 de su devanado se cambian, ya que generan corrientes inferiores a las corrientes de conducción de los tiristores en algunos pasos de tiempo, generando vacíos de datos para las soluciones posteriores y colapsando la simulación numérica de circuitos.

Como ajuste final para la generación de datos sintéticos, se implementa un filtro butterworth pasa-baja, de orden 6 y con frecuencia de corte 1kHz para el modelo 1 y 5kHz para los modelos 2 y 5, ya que en su implementación preservaron las formas de onda originales atenuando los picos respectivos, picos de señal poco reales frente a los resultados experimentales reportados por el grupo de investigación del profesor Blanquez.

Se escogen estas frecuencias, ya que al excitar el devanado de campo a 50Hz la rectificación de 6 pulsos genera una señal de mínimo 300Hz y por Nyquist, un valor conveniente debe ser superior a 600Hz, valores de frecuencia de corte seleccionados acorde a este análisis. Adicionalmente el uso de este filtrado debería mejorar el desempeño de procesamientos posteriores, pues los ajustes de señal invertirán menos esfuerzos en recrear picos que no son asociados a un comportamiento real, más si de oscilación numérica.

Posterior variación paramétrica, se seleccionan solo los resultados de los modelos 1, 2 y 5, para el análisis y entrenamiento de los posteriores métodos de diagnósticos de esta investigación, así mismo se descarta el uso del generador #2 dada, su incoherencia y nula respuesta para el análisis de fugas a tierra.

## 4. Diagnósticos basados en señal y datos

Para la presentación de las técnicas de diagnóstico, se presenta su fundamento teórico y seguidamente su implementación sobre algunos modelos considerados en el capítulo anterior, no obstante, un análisis de resultados más amplio se presenta en el capítulo de metodología.

En el modelamiento de máquinas eléctricas, orientados al diagnóstico de fallas o monitoreo de su condición, se encuentra gran diversidad de técnicas tales como:

### Diagnósticos de fallas basados en señales

- Análisis de vibración mecánica
- Medida de temperatura
- Análisis de ruido acústico
- Monitoreo de campo electromagnético a través de bobina inspectora
- Análisis de variación de potencia de salida
- Análisis de infrarrojo
- Análisis de gases
- Análisis de aceites
- Monitoreo de emisiones de radio frecuencia
- Análisis de descargas parciales
- Firma de corriente (MCSA)
- Análisis estadístico de señales eléctricas

### Diagnósticos de fallas basado en modelos

- Redes neuronales
- Análisis de lógica fuzzy

- Algoritmos genéticos
- Equivalentes de circuitos magnéticos (elementos finitos)
- Equivalentes de circuitos eléctricos

Análisis de fallas orientados en teoría de máquinas

- Función de devanado (WFA)
- Función de devanado modificado (MWFA)
- Circuitos equivalentes magnéticos (MEC)

Análisis de fallas basados en simulaciones

- Análisis de elementos finitos (FEA)
- Análisis de espacio de estados

Si bien existe distinción entre diagnóstico orientados a datos, señales y modelos (Isermann, 2006), cada uno de ellos tiene su alcance en el diagnóstico por sí mismo, para el desarrollo de esta investigación, estos diagnósticos se encadenan buscando complementar sus insumos, bien sea como datos producto de simulaciones o bien como complemento para determinar valores de variables.

## 4.1 Implementación transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta de análisis para simplificar el tratamiento de las ecuaciones integro-diferenciales, que, para el contexto de esta investigación, reside en la simplificación del análisis circuital de los modelos planteados.

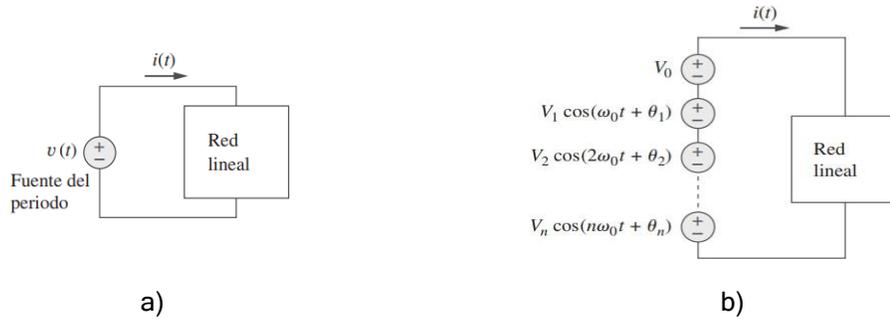
De manera general la transformada de Fourier de una función  $f(t)$  se define como (Sadiku & Alexander, 2006):

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4-1)$$

La transformada parte del supuesto que las señales temporales tienen periodicidad o bien periodicidad infinita, descomponiendo el análisis en cada fuente como una aproximación

de aportes de fuentes sinusoidales con diferentes amplitudes y frecuencia, determinado por cada armónico o frecuencia característica de cada fuente (Figura 4-1).

**Figura 4-1.** Análisis por superposición de fuentes tomando descomposición de análisis de Fourier (Sadiku & Alexander, 2006).



a). Fuente original con análisis de sistema lineal; b). descomposición y superposición de fuentes sinusoidales bajo análisis de Fourier.

Dado que para el análisis circuital intervienen relaciones tensión corriente a cada elemento, estos se simplifican de manera equivalente a la transformada de Laplace, ya que:

$$\mathcal{F}\left\{\frac{df}{dt}\right\} = j\omega F(\omega) \quad (4-2)$$

Donde

$\mathcal{F}$ : corresponde a la transformada de Fourier

De manera que para las ecuaciones de elementos circuitales base, tenemos que su impedancia se transforma en:

$$\begin{array}{l} R \text{ --- } R \\ L \text{ --- } j\omega L \\ C \text{ --- } \frac{1}{j\omega C} \end{array} \quad (4-3)$$

Equivalentes circuitales similares a los encontrados con la transformada de Laplace, por ende, se emplean las relaciones anteriormente presentadas.

En un análisis de Fourier las variables medidas pueden ser llevadas a su descomposición en frecuencia, de manera que estimar los parámetros residen en solucionar los sistemas

de ecuaciones resultantes, con la diferencia que tienen su componente imaginaria, resultado de la transformada de Fourier. Si bien es complejo encontrar estas relaciones circuitales, se utiliza el circuito de la Figura 2-2 para desarrollar este análisis, retomando desde la ecuación (2-8), obteniendo para su componente real e imaginaria las siguientes ecuaciones:

$$k_a = a - a^2 \quad (4-4)$$

$$k_v = R_v R + R^2 \quad (4-5)$$

$$k_0 = 2R_v + R \quad (4-6)$$

$$R_m + \frac{k_0 k_a (R_f^2 - \omega^2 L_f^2) + k_v k_0 + 2\omega^2 R_f L_f^2 k_a}{k_0^2 + \omega^2 L_f^2} + \frac{R_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (4-7)$$

$$= R_e \left\{ R_m \frac{V_{aux}(\omega)}{V_m(\omega)} \right\}$$

$$\frac{2\omega k_0 k_a R_f L_f + \omega R_v L_f k_0}{k_0^2 + \omega^2 L_f^2} + \frac{\omega L_f k_a (R_f^2 - \omega^2 L_f^2) - \omega L_f k_v}{k_0^2 + \omega^2 L_f^2} - \frac{\omega C_i R_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (4-8)$$

$$= I_m \left\{ R_m \frac{V_{aux}(\omega)}{V_m(\omega)} \right\}$$

Solucionar el sistema de las ecuaciones (4-7) y (4-8) por frecuencia, es separable para el parámetro “a” y “R<sub>i</sub>”, no obstante al incluir el parámetro C<sub>i</sub>, se generan múltiples soluciones, ya que el producto RC expande a un sistema dependiente y posiblemente no soluble, sin embargo, si se soluciona para las componentes de  $\omega = 0$ , “a” y “R<sub>i</sub>” el sistema es soluble, de manera que las frecuencias adicionales permitirían ajustar el valor de capacitancia, sin embargo se descarta este ajuste dada la incertidumbre en el modelo capacitivo presentado por la literatura técnica y las simulaciones realizadas.

A pesar de la dificultad encontrada en las ecuaciones (4-7) y (4-8), se evidencia su potencial solución por estos análisis, por tanto se plantea este mismo enfoque para los modelos expresados en el subcapítulo anterior:

Iniciando con el circuito de la Figura 2-17, tenemos:

$$\mathcal{F}\{-V_a + i_1 a Z_f + i_2(1-a)Z_f + V_b\} = 0 \quad (4-9)$$

$$\mathcal{F}\{-V_a + i_1 a Z_f + (i_1 - i_2)(Z_i + R_m)\} = 0 \quad (4-10)$$

Donde, se analiza la operación de tiristores T1 y T6, definiendo la tensión diferencial del devanado de rotor como:

$$V_f = V_a - V_b = V_{f_+ - f_-} \quad (4-11)$$

El análisis de los disparos restantes, presenta relaciones similares, por ende, simplificar las ecuaciones a condiciones genéricas, facilita su análisis debido a su periodicidad, de esta manera, la tensión entre ramas del devanado de campo y la tensión en una rama del devanado ( $V_{f_+}$ ) respecto a tierra, describe:

$$-V_{f_+ - f_-} + i_1 a Z_f + i_2(1-a)Z_f = 0 \quad (4-12)$$

$$-V_{f_+} + i_1 a Z_f + (i_1 - i_2)(Z_i + R_m) = 0 \quad (4-13)$$

Resolviendo (4-12) para "a":

$$a = \frac{V_{f_+ - f_-} - i_2 Z_f}{(i_1 - i_2) * Z_f} \quad (4-14)$$

Simplificando el modelo de aislamiento

$$R_i || C_i = \frac{R_i}{1 + j\omega R_i C_i} \quad (4-15)$$

Resolviendo (4-13) para "Ri" con  $\omega = 0$ :

$$R_i = \frac{V_{f_+} - i_1 a Z_f}{(i_1 - i_2)} - R_{gt} \quad (4-16)$$

Variables separables para  $\omega=0$ , de manera que si a y Ri son conocidos, podría estimarse Ci mediante expansión a otras frecuencias como:

$$C_i = \frac{1}{j\omega R_i} \left( R_i \left( \frac{V_f - i_1 a Z_f}{i_1 - i_2} - R_{gt} \right)^{-1} - 1 \right) \quad (4-17)$$

Como herramienta complementaria para verificar estas relaciones, se implementan las ecuaciones (4-12) y (4-13) en software simbólico (sympy) de Python, confirmando las soluciones manualmente desarrolladas.

Solucionando para  $R_i$  y  $a$  cuando  $\omega=0$  mediante librería Sympy:

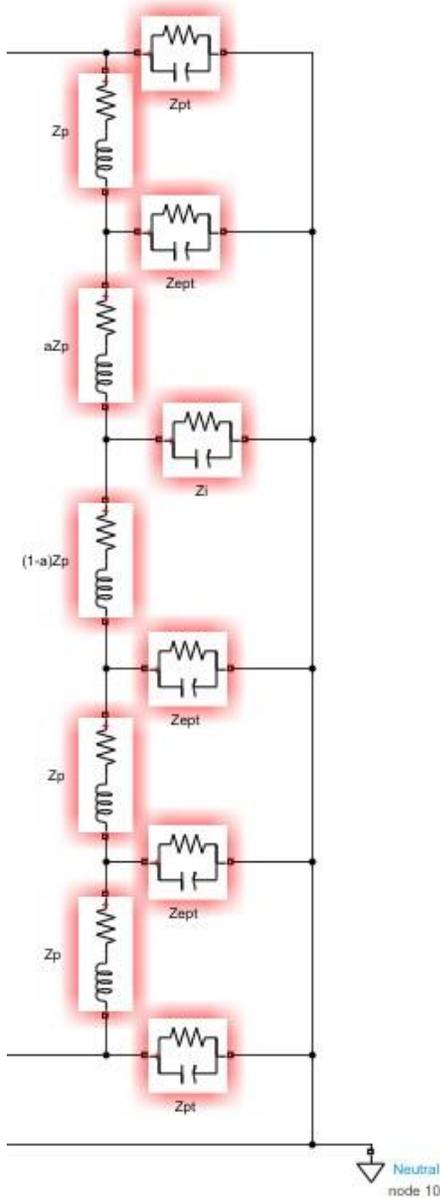
$$\{R_i: (-I1**2*Rgt + I1*I2*R + 2*I1*I2*Rgt + I1*Va - I1*Vf - I2**2*Rgt - I2*Va)/(I1**2 - 2*I1*I2 + I2**2), \\ a: (-I2*R + Vf)/(I1*R - I2*R)\}$$

Donde “Va” es la variable para “ $V_{f+}$ ”

Con este mismo enfoque, al analizar el circuito de la Figura 3-10, se requiere realizar equivalentes Delta-Y sucesivos entre las impedancias, presentándose en estas reducciones, productos de impedancias con el parámetro  $a$ ,  $R_i$  y  $C_i$ , por ende no resulta práctico buscando un sistema de variables separables. El análisis de reducción se esquematiza en la Figura 4-2.

Para el circuito de la Figura 4-2, la solución simbólica es una opción, sin embargo, se descarta por tardar más de 1h de procesamiento con  $\omega=0$  o  $\omega \neq 0$ , sin embargo, de su análisis manual, el producto indicado a partir de  $Z_x$  presenta expresiones con productos entre  $a$ ,  $R_i$  y  $C_i$ , por tanto, dificulta las soluciones por parámetros de manera individual, aun cuando  $\omega=0$ , las expresiones mantienen ciertos productos de los parámetros, dificultando obtener ecuaciones separables.

**Figura 4-2.** Impedancias equivalentes modelo PI rotor y modelo RC de aislamiento para la falla a tierra



$$Z_p = R_p + j\omega L_p$$

$$Z_{pt} = \frac{R_{pt}}{1 + j\omega R_{pt} C_{pt}}$$

$$Z_{pt} = \frac{Z_{pt}}{2}$$

$$Z_a = \frac{Z_{pt}Z_p}{Z_{pt} + Z_p + Z_{ept}}$$

$$Z_b = \frac{Z_{ept}Z_p}{Z_{pt} + Z_p + Z_{ept}}$$

$$Z_c = \frac{Z_{ept}Z_{pt}}{Z_{pt} + Z_p + Z_{ept}}$$

$$Z_x = Z_b + aZ_p$$

$$Z_y = Z_b + Z_p$$

$$Z_1 = \frac{Z_c Z_x}{Z_c + Z_x + Z_i}$$

$$Z_2 = \frac{Z_x Z_i}{Z_c + Z_x + Z_i}$$

$$Z_3 = \frac{Z_c Z_i}{Z_c + Z_x + Z_i}$$

$$Z_4 = \frac{Z_y Z_{ept}}{Z_y + Z_{ept} + Z_c}$$

$$Z_5 = \frac{Z_y Z_c}{Z_y + Z_{ept} + Z_c}$$

$$Z_6 = \frac{Z_c Z_{ept}}{Z_y + Z_{ept} + Z_c}$$

$$Z_7 = Z_2 + (1 - a)Z_p + Z_4$$

$$Z_8 = \frac{Z_3 Z_7}{Z_3 + Z_7 + Z_6}$$

$$Z_9 = \frac{Z_6 Z_7}{Z_3 + Z_7 + Z_6}$$

$$Z_{10} = \frac{Z_3 Z_6}{Z_3 + Z_7 + Z_6}$$

$$Z_{1x} = Z_a + Z_1 + Z_8$$

$$Z_{2x} = Z_a + Z_5 + Z_9$$

$$Z_{3x} = Z_{10}$$

$$F_1 = I_1 Z_{1x} + I_2 Z_{2x} - V_{f+ - f-}$$

$$F_2 = -V_{f+} + I_1 Z_{1x} + (I_1 - I_2)(Z_{2x} + R_{gt})$$

Las variables etiquetadas de la Tabla 5-1 corresponden a:

- aEsp: Valor de  $a$  usado en la simulación  
 aEst: Valor de  $a$  resultado del análisis de Fourier  
 RiEsp: Valor de  $R_i$  usado en la simulación  
 RiaEst: Valor de  $R_i$  resultado del análisis de Fourier

Nota 1:

Se preserva el reporte en variable compleja, para reafirmar coherencia de análisis según la frecuencia que se esté analizando.

Nota 2:

Los parámetros de  $a$  y  $R_i$  esperados se repiten, ya que corresponden a simulaciones con ángulo de disparo,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  y  $80^\circ$ , tal como se indica en la Tabla 3-5

Algunos de los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 4-1.** Resultados modelo 1 para estimación de parámetros, resaltando resultados no coherentes físicamente.

aEsp	aEst	RiEsp	RiEst
0,1	(0.10+0j)	5	(4.96+0j)
0,25	(0.22+0j)	5	(5.26+0j)
<b>0,5</b>	<b>(-2.38-0j)</b>	<b>5</b>	<b>(-7157.49-0j)</b>
0,8	(0.82-0j)	5	(5.40-0j)
0,95	(0.94-0j)	5	(4.92-0j)
<b>0,1</b>	<b>(-0.0009+0j)</b>	<b>5</b>	<b>(5.19+0j)</b>
0,25	(0.09+0j)	5	(6.80+0j)
<b>0,5</b>	<b>(8.47-0j)</b>	<b>5</b>	<b>(6367.40-0j)</b>
0,8	(0.92-0j)	5	(5.63-0j)
0,95	(0.99-0j)	5	(4.44-0j)
0,1	(0.33+0j)	5	(1.70+0j)
<b>0,25</b>	<b>(0.59+0j)</b>	<b>5</b>	<b>(-1.96+0j)</b>
<b>0,5</b>	<b>(-14.07-0j)</b>	<b>5</b>	<b>(-12743.74-0j)</b>
0,8	(0.52-0j)	5	(0.41-0j)
0,95	(0.76-0j)	5	(2.48-0j)

Solo el 45% de los casos simulados, el algoritmo estima el valor de  $R_i$  en ordenes de magnitud similares, pero con mayor exactitud para valores de baja resistencia de aislamiento, es decir  $5\Omega$  o  $5k\Omega$ , donde inclusive se presenta una buena estimación del punto de falla.

Además, cuando “a” calculado está entre 0 y 1 y la resistencia baja es positiva, el 100% de los casos simulados presenta un valor cercano al valor esperado por simulación, siendo bueno el modelo para estimación de zona de falla, e indicativo del valor de resistencia de aislamiento bajo, más no, estimación de valores exactos(Tabla 4-1).

Para el modelo 2, se obtiene coherencia de resultado solo del 5% del total de 60 simulaciones evaluadas, siendo este modelo incapaz de reflejar un valor coherente del parámetro “a”.

## 4.2 Implementación transformada Hilbert-Huang

La transformada de Hilbert-Huang (HHT) es una transformación cuya aplicación a funciones y señales permite operar con sistemas lineales y no lineales, así como estacionarios y no estacionarios, de manera que de forma adaptativa descompone la señal en otras señales más uniformes, si bien no tienen una estructura declarada como en la transformada de Fourier, donde sus funciones son sinusoidales, estas permiten destacar comportamientos incluso con ondas moduladas y no periódicas (Anchou, 2020).

La transformada de Hilbert-Huang la componen dos partes:

1. La descomposición de modo empírico (Empirical Mode Descompostion - EMD-)
2. Un análisis espectral de Hilbert (Hilbert Spectral Analysis - HSA-).

La HHT se ha usado en problemas dinámicos, desde problemas modelados en ecuaciones diferenciales no lineales, o directamente desde su comportamiento en señales no periódicas. Sus aplicaciones más directas corresponden a problemas donde la caracterización de frecuencia es requerida, tal como análisis de rodamientos en motores, análisis geofísicos de suelos, análisis de olas, entre otros. Se reconoce que es una técnica empírica, no obstante, su combinación entre las descomposiciones de funciones y su

tratamiento desde la transformada de Hilbert, permiten adaptabilidad a la dinámica del fenómeno bajo estudio.

Aplicaciones directas a sistemas eléctricos se encuentran para el cálculo directo de frecuencias instantáneas en (Dedović, Avdaković, & Alihodžić, 2023), donde cuantifican frecuencias para el análisis de oscilaciones de baja frecuencia en sistemas de potencia, así mismo, la HHT es usada como complemento, tal como extracción de características para detección de anomalías en cojinetes en motores de inducción, donde a partir de vectores de soporte y HHT, se caracterizan dinámicas propias de la falla en tiempo real (Herrera, Mortera, & Ostia, 2023).

A pesar que análisis planteado de fuga a tierra se ha desarrollado en estado estable, con funciones periódicas, se opta por esta técnica (HHT), para conectar sus resultados a los modelos de datos, desde los cuales se caracterizan comportamientos de falla y con ello, detectar, localizar y cuantificar las anomalías.

#### 4.2.1 Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert corresponde a un mapeo de señal del dominio del tiempo al dominio del tiempo, generando un desfase de  $90^\circ$ , ya que su definición de transformación puede interpretarse como una convolución de la siguiente manera (Huang & Shen, 2005):

$$\mathcal{H}\{f(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(r)}{t-r} dr \quad (4-18)$$

Insumo a partir del cual, se construye una función analítica como la definida a continuación:

$$z(t) = f(t) + j\mathcal{H}\{f(t)\} \quad (4-19)$$

Por ende, se puede representar la amplitud ( $A$ ) y fase( $\varphi$ ) del dominio complejo como:

$$A(t) = \sqrt{f(t)^2 + \mathcal{H}\{f(t)\}^2} \quad (4-20)$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left( \frac{\mathcal{H}\{f(t)\}}{f(t)} \right) \quad (4-21)$$

Siendo representada la frecuencia como:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (4-22)$$

Con lo anterior, se puede representar un análisis espectral, es decir, una gráfica en el tiempo de la magnitud o energía y la frecuencia instantánea, análisis similar a un espectrograma o al análisis tiempo-frecuencia, con la diferencia que se estima a partir de la frecuencia instantánea calculada por la transformada, razón por la cual se habla de un mapeo del dominio del tiempo al dominio del tiempo, pues no se evidencia cambio de variables, más si de plano de representación.

#### **4.2.2 Modo de descomposición empírico**

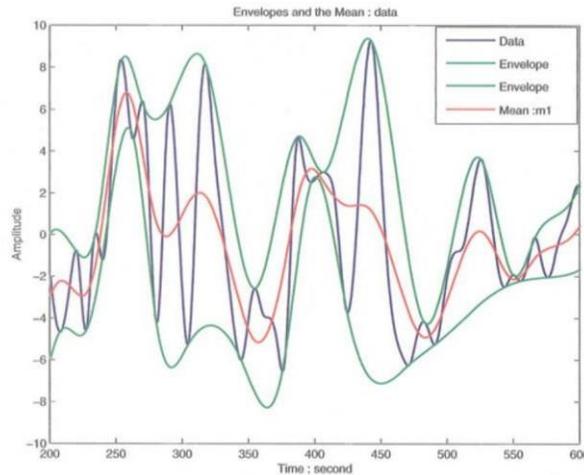
Es un proceso o algoritmo de suavizado de la señal original, destacando dinámicas envolventes entre lo caótico que puede ser la señal de interés. No presenta una regla determinística para esta descomposición, por ello se refieren a esta como adaptativa, no obstante, la señal resultante debe cumplir unas reglas para su conformación.

Las funciones de descomposición se llaman funciones de modo intrínseco (IMF por sus siglas en inglés), y cumplen las siguientes reglas:

1. En todo el conjunto de datos, el número de extremos y el número de cruces por cero son iguales o a lo sumo diferentes por uno.
2. A cualquier punto, el valor medio entre la curva envolvente de máximo y la curva envolvente de mínimos es cero (las envolventes se construyen con splines)

Gráficamente la construcción de una IMF se realiza efectuando suavizados por envolventes máximas y mínimos hasta cumplir los criterios de una IMF, tal como se indica a continuación para un primer suavizado:

**Figura 4-3.** Ejemplo señal original y suavizado mediante promedio de envolventes de máximos y mínimos (Huang & Shen, 2005).

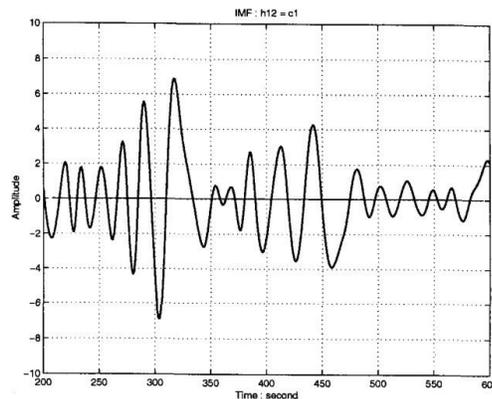


Donde

Data: Señal original (nombrada  $x(t)$  o  $h1$  para este proceso)  
 Green Envelope: Envoltorio de máximos y mínimos de señal respectivamente  
 Mean: Promedio de señales envolventes mínimo y máximo.

De tal manera que una vez cumpla condiciones se encuentran señales como la Figura 4-4. Para continuar el proceso de determinación de IMFs, se toma la señal resultante entre la señal original y la IMF encontrada, de manera que, a esta señal residual, se aplica el suavizado hasta encontrar la primera IMF de este residuo, repitiendo este proceso hasta obtener una señal de casi cero.

**Figura 4-4.** Suavizado sucesivo de la señal "Data" número 11, siendo la primera IMF (Huang & Shen, 2005).



Matemáticamente tenemos:

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (4-23)$$

Donde

k: Indica los suavizados consecutivos realizados

$m_{1k}$ : Señal media k-ésima resultante

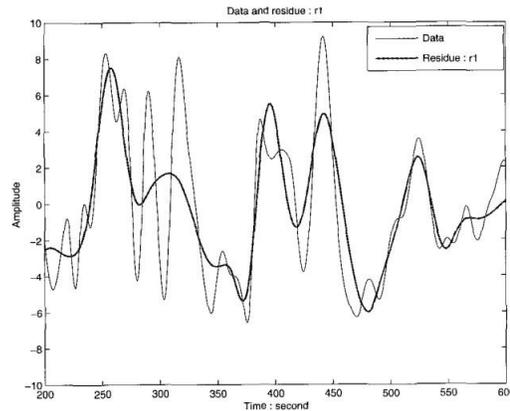
$h_{1k}$ : Señal k-ésima de la señal original y sus señales medias suavizadas sucesivas

Donde una vez encontrada la señal que satisface IMF ( $c_1$  para este ejemplo), se determina la señal residuo como:

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (4-24)$$

Señal a partir del cual se construye la siguiente IMF recreando el mismo proceso anterior hasta limitar el estudio o bien encontrar una señal de casi cero constantes.

**Figura 4-5.** Ejemplo de Señal original y señal residuo posterior primera IMF encontrada (Huang & Shen, 2005).



Una vez se tienen las IMFs determinadas, se procede a analizar cada una de estas en un espectro de Hilbert, y con esto un análisis de amplitud, fase y frecuencia instantánea de la dinámica de la señal original. Para finalizar este contexto teórico, se destaca el alcance que Huang y Shen demarcan de otros análisis de señal:

**Tabla 4-2.** Comparativo del alcance de otros modelos de señal y Hilbert-Huang (traducido de (Huang & Shen, 2005)).

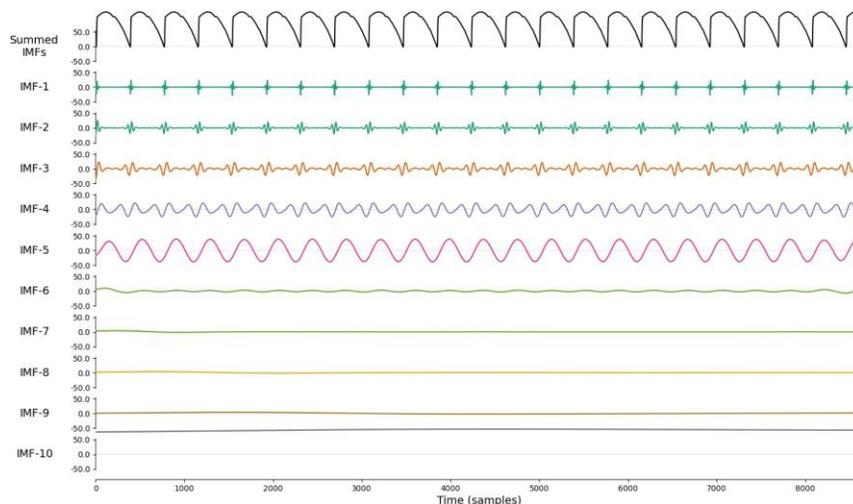
	<b>Fourier</b>	<b>Wavelet</b>	<b>Hilbert</b>
Base	A priori	A priori	Adaptativo
Frecuencia	Convolución: Incertidumbre global	Convolución: Incertidumbre regional	Diferenciación: Certeza local
Presentación	Energía- frecuencia	Energía-tiempo- frecuencia	Energía-tiempo- frecuencia
No lineal	No	No	Si
No estacionario	No	Si	Si
Extracción de características	No	Discreto: No Continuo: Si	Si
Base teórica	Teórica completamente	Teórica completamente	Empírica

Con base en lo anterior, se descompone y se caracterizan las magnitudes y frecuencias instantáneas, insumos para un entrenamiento de modelo orientado a datos.

### 4.2.3 Análisis HHT para señales de fugas a tierra sintéticas

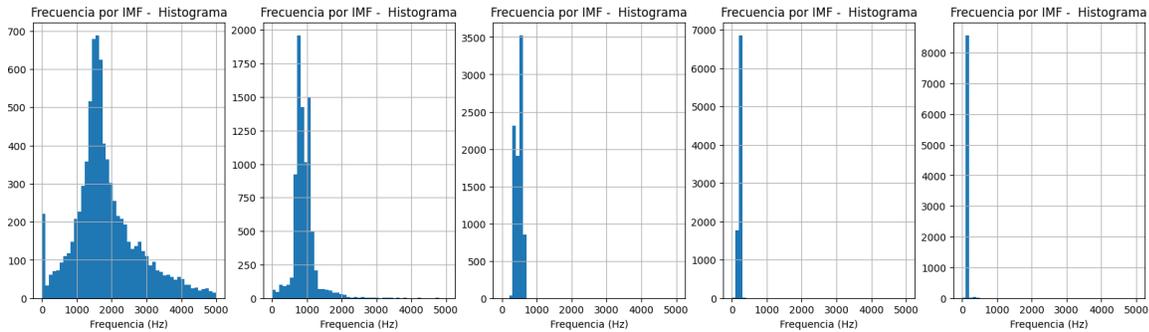
Inicialmente se descomponen las señales eléctricas de fugas a tierra, del conjunto de señales sintéticas generadas previamente, evidenciando hasta que número de IMF son posibles y coherentes descomponer las señales, tal como se presenta a continuación:

**Figura 4-6.** Descomposición de modo intrínseco a señal de tensión de campo, empleando librería “emd” en lenguaje Python (aislamiento a  $R_i = 50k\Omega$ ).



De este análisis se puede descomponer hasta el sexto IMF, donde su descomposición de frecuencia se presenta para los cinco primeros en la siguiente figura.

**Figura 4-7.** Histogramas de frecuencias por IMF para una señal de tensión de campo.



De las gráficas anteriores, se destaca que la señal es representada normalizada o con valor medio excluido, razón por la cual es posible la determinación de curvas IMF, adicionalmente, el eje x se representa en muestras y no en tiempos.

Para los histogramas de valores de frecuencia instantánea, se evidencian oscilaciones de mayor a menor frecuencia a medida que se descompone la señal en IMFs, no obstante, estas frecuencias evidencian una desviación estándar y valores centrales, para lo cual se decide usar como estadístico, la media de la frecuencia instantánea para dicho IMF.

### 4.3 Implementación modelos de datos

Como modelos de clasificación se implementan modelos k-Vecinos cercanos y redes neuronales simples para clasificación y regresión.

Como conjunto de datos se toman los resultados de armónicos del análisis de Fourier y amplitudes y frecuencias instantáneas del análisis de Hilbert-Huang, tomando de estos los valores de tensión, corrientes por ramas y aislamiento de campo, concluyendo sobre el punto de falla y el rango de resistencia de aislamiento, aspectos empleados para etiquetar los conjuntos de datos.

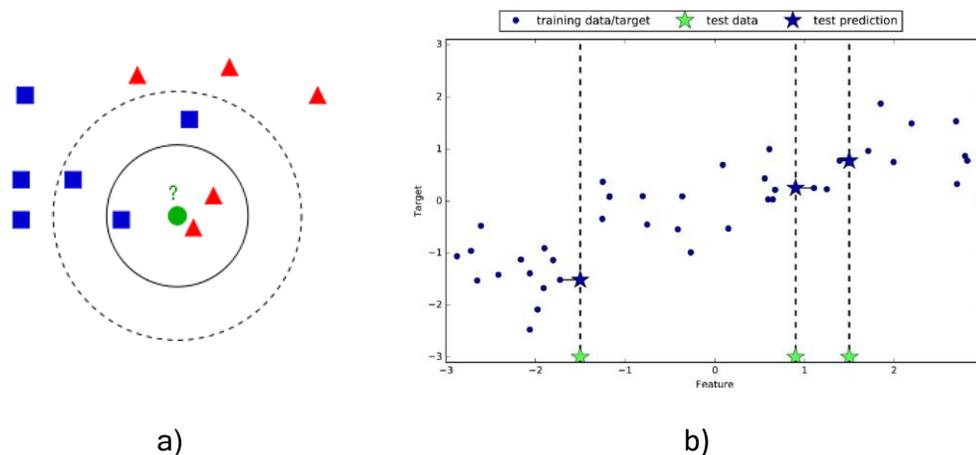
Para la programación de estos modelos se emplea sklearn y Keras, librerías nativas de Python. A continuación, el fundamento del algoritmo y algunos resultados de sus implementaciones.

### 4.3.1 Algoritmo k-vecinos cercanos

Este algoritmo reside en clasificar o estimar un valor real (regresor), en función de una votación a elementos cercanos al elemento a clasificar o estimar su valor como regresor.

Tal como se presenta en la Figura 4-8 a), si se desea clasificar el punto en verde según un conjunto de datos clasificados como rojos y azules (clases u objetivo de clasificación), el algoritmo asigna una clase al punto de interés según k vecinos cercanos con la misma clase, por ejemplo si se clasifica el punto en verde con 3 vecinos cercanos, se tienen dos vecinos clase rojo y uno clase azul de manera cercana al punto de interés, por ende, por mayoría, se asocia ese punto a clase azul, por otro lado si el criterio cambia a 5 vecinos cercanos, se tienen dos clases rojas y tres azules, por tanto bajo este criterio de 5 vecinos cercanos se clasifica en su mayoría como azul.

**Figura 4-8.** Interpretación visual del algoritmo k-vecinos cercanos ( (Andreas, M., & Guido, 2017)).



- a) Clasificación de elemento nuevo (círculo) con elementos cercanos a él (clase cuadrado o clase triángulo) b) Regresión o estimación de valor según valores cercanos para adoptar el centro de masa de los elementos cercanos y estimar el valor real

El algoritmo como regresor o estimador de un valor, opera de manera similar. Tomando como ejemplo la estimación de valor de una estrella en la Figura 4-8 b), se varia dicha estrella en toda la excursión de valores de la ordenada y se calcula la distancia al vecino más cercano, ubicando la estrella finalmente a la distancia más corta a los puntos relacionados.

La ecuación de distancia puede ser de muchos tipos, tal como norma 1, 2, n, u norma infinita, entre otras, el único interés es contar con una métrica comprensible y estable durante todo el cálculo. De esta manera el algoritmo clasifica o estima un valor en función de la cercanía a datos de clases vecinas.

Para el análisis de fugas a tierra, se implementan dos tipos de algoritmos bajo el principio de vecinos cercanos

1. Como clasificador del rango de resistencia de aislamiento
2. Y como estimador del valor de resistencia de aislamiento y fracción del devanado donde puede localizarse la falla.

Entre las características (x) (variables descriptivas del fenómeno o causales) se tienen:

- $a, R_i, \alpha, V_{f_+ - f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3,$

Para lo cual se toman los datos sintéticos generados por el análisis de Fourier y HHT.

Para el análisis de clasificación, las clases (y), es decir las variables a concluir, clasificar o bien, clasificar las consecuencias de las características, se propone:

Nivel de resistencia de fuga a tierra:

- Clase 1 - Condición aceptable ( $R_i > 100k\Omega$ )
- Clase 2 - Condición de alarma ( $5k\Omega < R_i \leq 100k\Omega$ )
- Clase 3 Condición de falla ( $0 < R_i \leq 5k\Omega$ )

Para el análisis como regresor o estimador de un valor, se proponen las variables

1. Porcentaje de ubicación de falla en el devanado de campo

## 2. Resistencia de aislamiento rotor a tierra.

De este último, se plantean dos modelos para cada clase estimadora de manera separada, ya que se busca plantear modelos de análisis de fuga a tierra a partir de parámetros físicos como resistencia de aislamiento, un estudio posterior puede incluir diferentes combinaciones de variables de salida y entrada.

Entre los modelos de datos conformados, se prueban las siguientes variaciones:

1. Análisis de datos con agrupamientos entre modelos, es decir datos de modelo 1, modelo 2, modelo 5, modelos 1 y 2, modelos 1 y 5, y modelos 1, 2 y 5
2. Modelo con y sin escalamiento de características y clases
3. Modelo con y sin valores imaginarios para el análisis de Fourier
4. Modelo con amplitud y frecuencia instantánea del análisis de HHT

La métrica empleada para evaluar el desempeño de los modelos, corresponde a una medida de exactitud de aciertos, vigilando el sobre o sub entrenamiento, es decir que el modelo solo pueda concluir bien para los datos de entrenamiento o para datos de prueba.

$$Exactitud(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (x_k == y_k) \quad (4-25)$$

Donde

- n: Número de muestras
- k: variable indicadora para los resultados del k-ésimo registro de datos
- $\hat{y}$  clase estimada según registro del conjunto de datos ingresado
- y: clase esperada según registro del conjunto de datos ingresado

### 4.3.2 Implementación k-vecinos cercanos como clasificador

La estructura del modelo de clasificación se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 4-3.** Estructura de modelo clasificador para k vecinos cercanos con datos de FFT y HHT

Entrada-Salida	FFT	HHT
Características (x)	Registros de 40 armónicos componente real e imaginaria de 5 variables o señales $V_{f_+-f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3$ Incluyendo las componentes de DC, <b>siendo un total de 405 características</b>	4 amplitudes y frecuencias instantáneas de 4 IMF por señal, siendo 5 señales de interés $V_{f_+-f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3$ , <b>Siendo en total 40 características</b>
Clases (y)	Nivel de resistencia de aislamiento (valor de la $R_i$ de la simulación, clasificado en las <b>clases 1, 2, 3</b> , presentadas anteriormente) Nivel de resistencia de aislamiento	
Otros ajustes a los datos	Se normalizaron los datos de entrenamiento para las características, mediante normalización estándar <b>Las clases no se pre procesaron, no obstante se le dio un manejo de variable entera.</b>	

### 4.3.3 Implementación k-vecinos cercanos como regresor

La estructura del modelo de estimador se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 4-4.** Estructura de modelo regresor o estimador para k vecinos cercanos con datos de FFT y HHT

Entrada-Salida	FFT	HHT
Características (x)	Registros de 40 armónicos componente real e imaginaria de 5 variables o señales $V_{f_+-f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3$ Incluyendo las componentes de DC, <b>siendo un total de 405 características</b>	4 amplitudes y frecuencias instantáneas de 4 IMF por señal, siendo 5 señales de interés $V_{f_+-f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3$ , <b>Siendo en total 40 características</b>
Clases (y)	Grupo modelos #1: <b>Resistencia de aislamiento</b> Grupo modelos #2: <b>Fracción o porcentaje de devanado donde se simula la falla</b>	
Otros ajustes a los datos	Se normalizaron los datos de entrenamiento para las características, mediante normalización estándar <b>La clase Resistencia de aislamiento se normalizó a <math>1M\Omega</math> y la clase Porcentaje de devanado en falla se dejó sin normalización o escalado</b>	

La métrica de desempeño corresponde al coeficiente cuadrado lineal o coeficiente de correlación lineal, el cual a medida que se acerca más a 1, se considera mejor el ajuste de puntos:

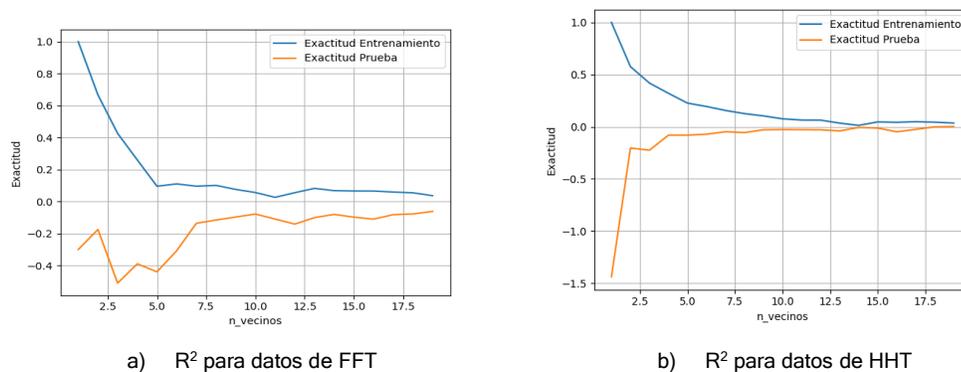
$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (4-26)$$

Donde

$R^2$ : Coeficiente de correlación lineal

Como resultados no esperados, se evidencia en la siguiente figura, ajuste nulo para el modelo de regresión del parámetro “a”.

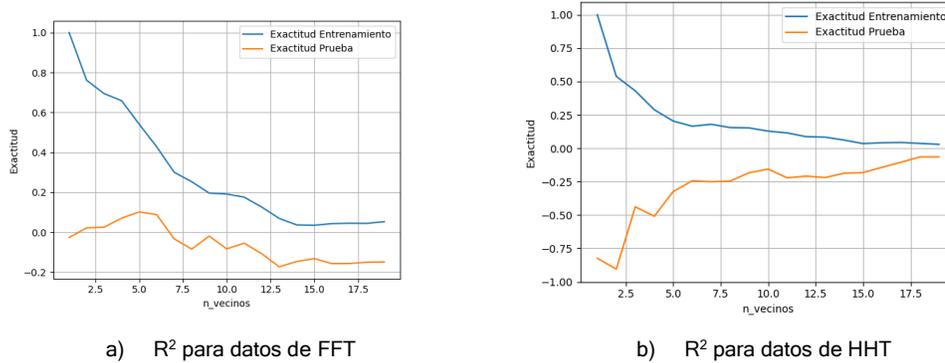
**Figura 4-9.** Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos, para modelo de regresión para la clase “a”



Para el modelo con FFT o HHT se observa una métrica negativa, esto indica que el error de estimación es mayor al error del promedio de datos de la clase estimada, tal como se puede analizar de la ecuación (4-26), descartando entonces este modelo para su objetivo tanto para HHT como FFT como fuente de datos

Para el modelo regresor de la resistencia de aislamiento se presentan resultados similares (Figura 4-10). Donde el coeficiente de correlación lineal es incluso negativo, y de valores muy pequeños, menor a 0.6 y 0.2 para métrica de datos de entrenamiento y prueba respectivamente, razón por la cual las estimaciones no son concluyentes para ninguno de los datos FFT o HHT empleados.

**Figura 4-10.** Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos para modelo de regresión de resistencia de aislamiento (número de vecinos cercanos).



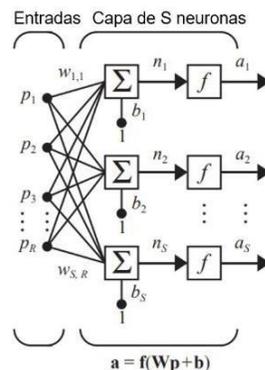
Por ende, si bien son modelos que se entrenaron y propusieron inicialmente, estos modelos no contribuyen en la estimación de localización y magnitud de una fuga a tierra, bajo este modelo de k vecinos cercanos empleado como estimador.

#### 4.3.4 Red neuronal simple

La implementación de una red neuronal simple, reside en multiplicar un vector de entradas estandarizado (variables de entrada) y luego de una sucesiva multiplicación de matrices, hallar las salidas deseadas como variables estandarizadas a probabilidades, valores reales, o resultados binarios.

Su elemento base se llama neurona o perceptrón, el cual consiste en una suma ponderada que pasa por una función no lineal previo a su salida, cuando se conecta con otras entradas en secuencia, es lo que llamamos una red neuronal.

**Figura 4-11.** Flujo de datos en una red neuronal, (Hagan M. T. et al, 2014)



Las funciones de salida ( $f$ ) de cada neurona, se llaman funciones de activación y son diversas según su aplicación final. En la siguiente gráfica se representa una función sigmoide, empleada frecuentemente cuando la salida ( $y$ ), se desea tenga una variación entre 0 y 1, tal como si fuese una probabilidad, aspecto aprovechado usualmente como función de activación de la capa de salida.

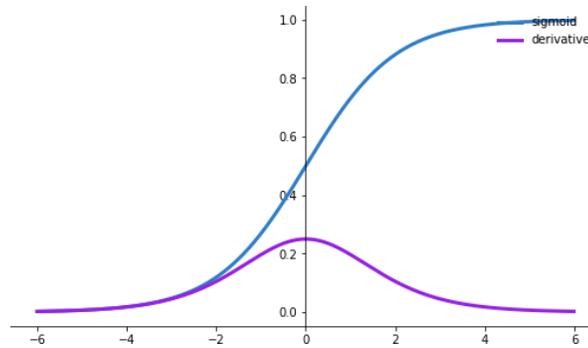
$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4-27)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{e^{-x}}{(1 + e^{-x})^2} \quad (4-28)$$

Simplificando

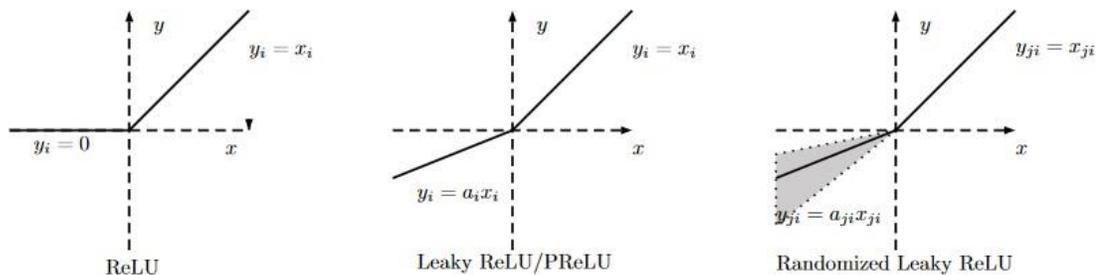
$$\frac{dy}{dx} = y(1 - y) \quad (4-29)$$

**Figura 4-12.** Función de activación Sigmoide y su derivada (Panneerselvam, 2023)



Otra función de activación usada en capas intermedias corresponde a la función Relu (Figura 4-13).

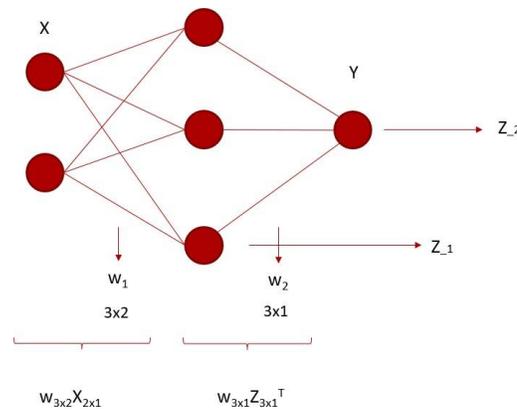
**Figura 4-13.** Función de activación Relu y variantes (Xu, Wang, Chen, & Li, 2015).



Por su comportamiento de valores negativos ajustados a cero y salida lineal o amplificadora para valores positivos, la función Relu se suele emplear en capas intermedias o capas ocultas, adicionalmente sirve como selectora de características, dada su salida a cero y no limitadora de su salida.

Para ejemplificar un desarrollo, con su procedimiento de ajuste de los pesos de las matrices de la red neuronal se esquematiza la siguiente red, asociada a un ejemplo de pronóstico (regresión) de nota de examen obtenida, para una persona que tiene un registro de notas según sus variables de entrada, horas de sueño y horas de estudio.

**Figura 4-14.** Esquema de red neuronal ejemplo, para desarrollar su flujo de datos y cuantificación de los pesos de matrices que ajustan mejor los resultados entrada-salida.



Para este ejemplo se tiene un espacio  $n = 2$  características, que posterior paso por la red neuronal se encuentra un único escalar que será la nota (clase), por ende, se plantea un proceso de optimización como aquel conjunto de variables (pesos de las matrices), tal que minimicen un error declarado entre la nota estimada y la nota real, por lo tanto, el problema queda planteado como una solución iterativa mediante optimización por gradiente descendente de la siguiente manera:

$$f: \Omega \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (4-30)$$

$$W \in \arg \min_{W \in \Omega} f(W) \quad (4-31)$$

$$W_{(k+1)} = W_{(k)} - \eta \nabla f(W) \quad (4-32)$$

Desarrollando el flujo de datos hasta el valor de salida y recreando una solución a un problema de optimización bajo el método de gradiente descendente, tenemos:

Resultado producto de vector de características con la matriz de la primera capa de la red:

$$Z_{-1} = W_1 X \quad (4-33)$$

Función de activación de la primera capa:

$$Z_{-2} = f(W_1 X) \quad (4-34)$$

Producto de matriz de la segunda capa:

$$Z_{-3} = Z_{-2}^T W_2 \quad (4-35)$$

Función de activación de la segunda capa:

$$\hat{Y} = f(Z_{-3}) \quad (4-36)$$

Se plantea la siguiente función de error como función a optimizar

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (Y - \hat{Y})^2 \quad (4-37)$$

Empleando regla de la cadena para cada matriz de pesos (proceso de optimización de pesos)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = (Y - \hat{Y}) \left( - \frac{\partial Y}{\partial W_1} \right) \quad (4-38)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = (Y - \hat{Y}) \left( - (\hat{X}(1 - \hat{Y}) \frac{\partial Z_{-3}}{\partial W_1}) \right) \quad (4-39)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = (Y - \hat{Y}) \left( - (\hat{X}(1 - \hat{Y}) \frac{\partial Z_{-2}^T W_2}{\partial W_1}) \right) \quad (4-40)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = (Y - \hat{Y}) \left( - (\hat{X}(1 - \hat{Y}) W_2^T \frac{\partial Z_{-2}}{\partial W_1}) \right) \quad (4-41)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = (Y - \hat{Y}) (-(\hat{X}(1 - \hat{Y})W_2^T(1 - Z_{-2})Z_{-2} \frac{\partial Z_{-1}}{\partial W_1})) \quad (4-42)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = (Y - \hat{Y}) (-(\hat{X}(1 - \hat{Y})W_2^T(1 - Z_{-2})Z_{-2} \frac{\partial W_1 X}{\partial W_1})) \quad (4-43)$$

Finalmente se obtiene una expresión para el cambio de los pesos de la matriz de la capa 1:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} = X^T(Y - \hat{Y}) (-(\hat{X}(1 - \hat{Y})W_2^T(1 - Z_{-2})Z_{-2})) \quad (4-44)$$

De manera equivalente para  $W_2$  se obtiene:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_2} = -Z_{-2}^T(Y - \hat{Y})(\hat{X}(1 - \hat{Y})) \quad (4-45)$$

Retomando la función de recurrencia, el proceso iterativo de búsqueda de mejores pesos que recreen las salidas deseadas son:

$$W_{1(k+1)} = W_{1(k)} - \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial W_1} \quad (4-46)$$

$$W_{1(k+1)} = W_{1(k)} + X^T(Y - \hat{Y})(\hat{X}(1 - \hat{Y})W_2^T(1 - Z_{-2})Z_{-2}))$$

$$W_{2(k+1)} = W_{2(k)} - \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial W_2} \quad (4-47)$$

$$W_{2(k+1)} = W_{2(k)} + Z_{-2}^T(Y - \hat{Y})(\hat{X}(1 - \hat{Y}))$$

De esta manera, una red neuronal ajusta y actualiza los pesos de las matrices  $W$ , tal que, dada una entrada, permite la estimación o clasificación más apropiada de sus salidas, según los datos disponibles en su ajuste iterativo.

En cuanto a diversidad de modelos de datos, se adoptan los mismos casos indicados para los modelos de  $k$ -vecinos cercanos, es decir, variables características como  $V_{f_+ - f_-}$ ,  $V_{f_+}$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , y resultados del análisis con FFT y HHT, tanto para los modelos con clasificador y como estimador.

### 4.3.5 Implementación de red neuronal simple, clasificador y regresor.

La estructura del modelo se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 4-5.** Estructura de modelo red neuronal simple con datos de FFT y HHT

	FFT	HHT
Características (x)	Registros de 40 armónicos componente real e imaginaria de 5 variables o señales $V_{f_+ - f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3$ Incluyendo las componentes de DC, <b>siendo un total de 405 características</b>	4 amplitudes y frecuencias instantáneas de 4 IMF por señal, siendo 5 señales de interés $V_{f_+ - f_-}, V_{f_+}, i_1, i_2, i_3$ , <b>Siendo en total 40 características</b>
Arquitectura de capas	Capa de entrada con 405 neuronas Función de activación lineal Capa oculta de tipo densa o simple con 200 neuronas Función de activación tipo Relu Capa oculta de tipo densa con 100 neuronas Función de activación tipo Relu Capa oculta de tipo densa con 50 neuronas Capa de salida con una neurona correspondiente a la variable de interés Función de activación tipo Sigmoide	Capa de entrada con 40 neuronas Función de activación lineal Capa oculta de tipo densa o simple con 200 neuronas Función de activación tipo Relu Capa oculta de tipo densa con 100 neuronas Función de activación tipo Relu Capa oculta de tipo densa con 50 neuronas Capa de salida con una neurona correspondiente a la variable de interés Función de activación tipo Sigmoide

La salida corresponde a la variable de interés, bien sea como regresor o clasificador, destacando que la inicialización de los kernels o pesos de matrices, se realiza aleatoriamente con distribución uniforme, ya que no hay conocimiento previo para la inicialización, simplemente se dispone un entrenamiento con 1000 épocas, es decir, se iteran 1000 veces todas las variables disponibles de entrada y salida. El optimizador empleado corresponde a un Adam y función de pérdida tipo binary\_crossentropy para los clasificadores y para los regresores, el error medio cuadrado con métrica de desempeño exactitud.

El siguiente capítulo expone la metodología sugerida de diagnóstico, desde la cual se expondrán el resto de resultados de análisis realizados.



## 5. Metodología de diagnóstico

La exploración propuesta resume los hallazgos en el siguiente conjunto de diagramas de bloques, donde se presentan resultados satisfactorios de esta investigación.

Figura 5-1. Metodología de diagnóstico resumen, con notas de procesamiento (p1).

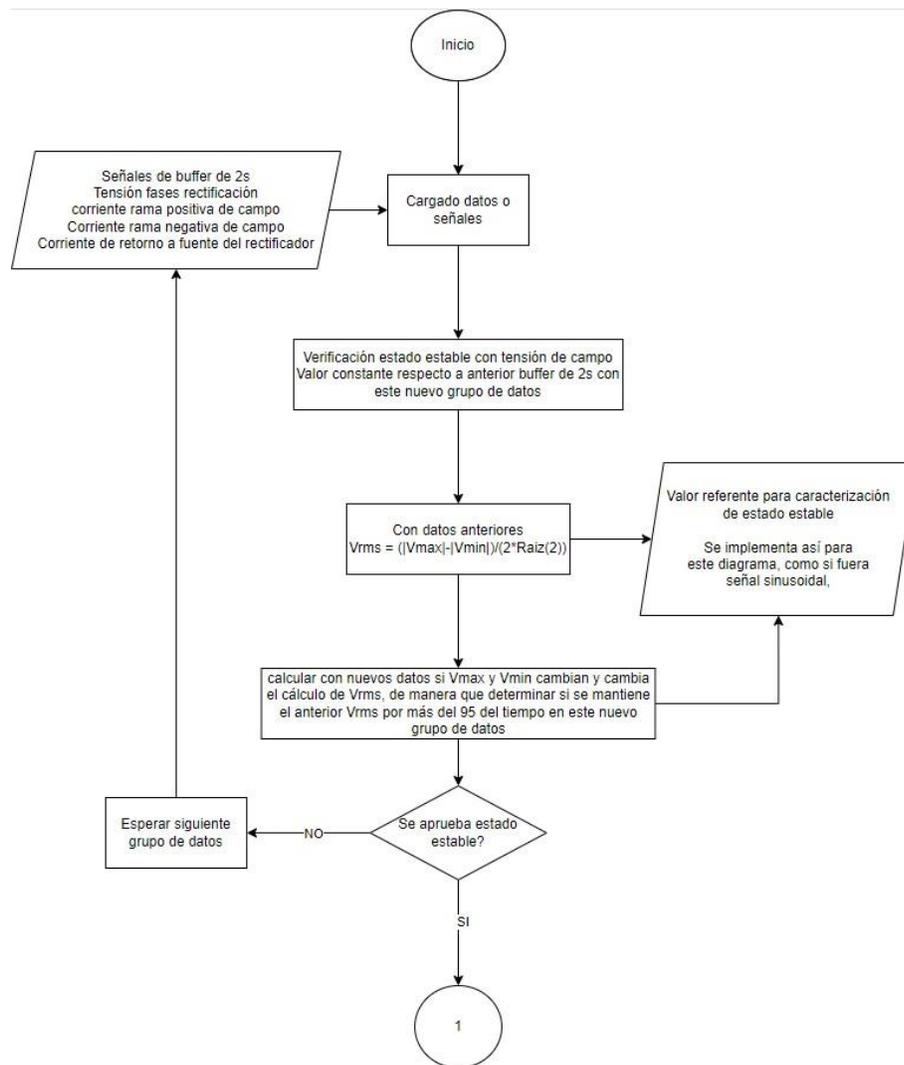
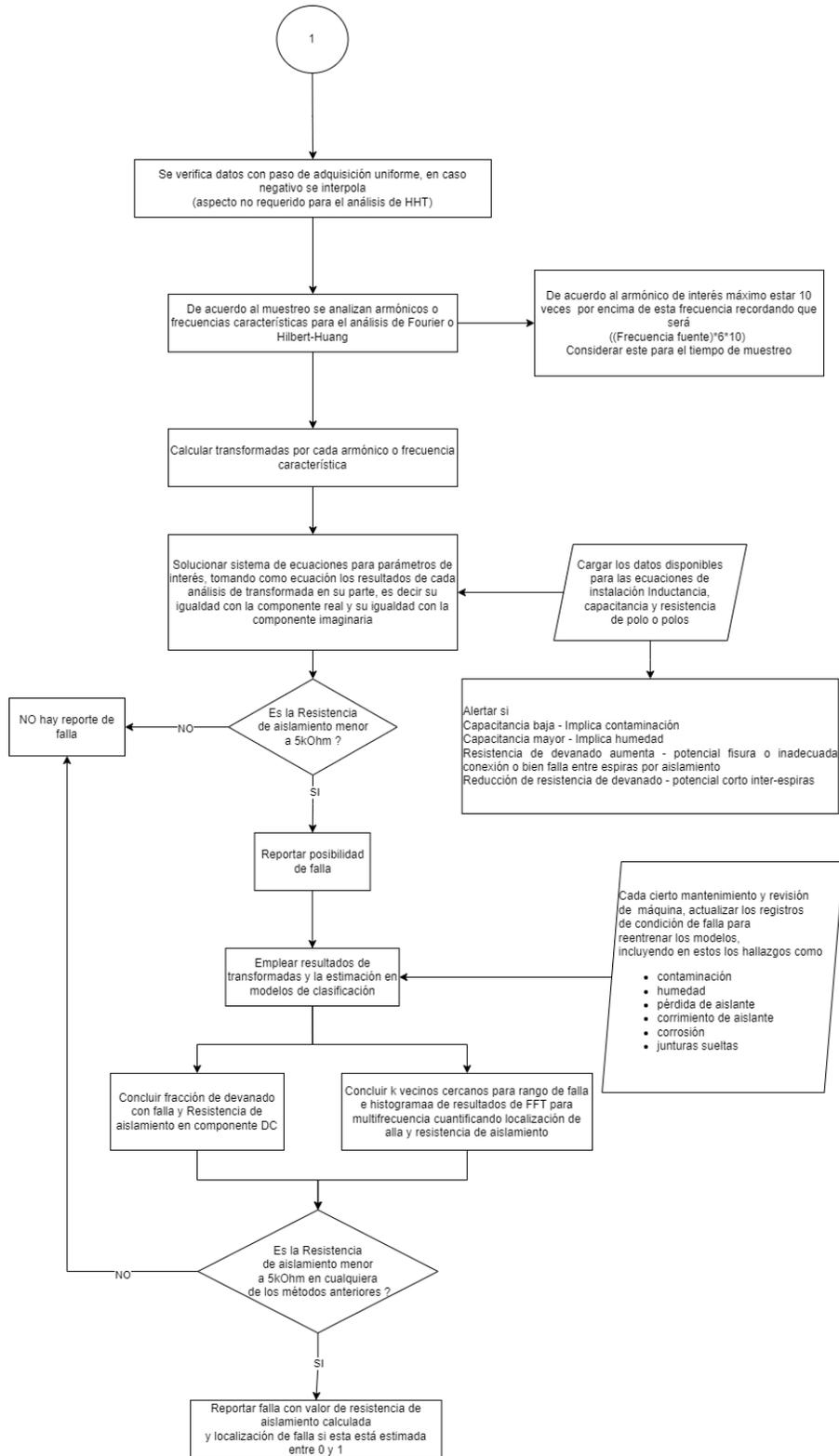


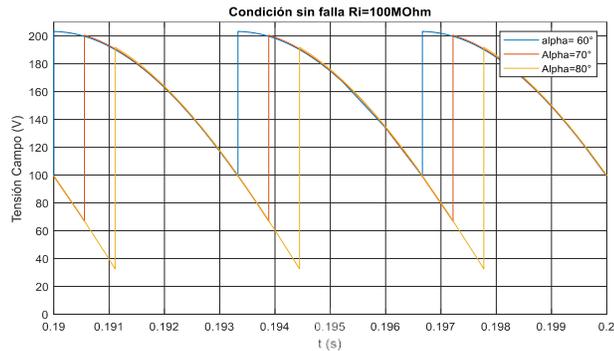
Figura 5-2. Metodología de diagnóstico resumen, con notas de procesamiento (p2).



Para su comprensión y desarrollo se describen sus procesos por partes:

La Figura 5-1, presenta la verificación de condición estable o permanente, para ello carga los datos en un buffer de análisis, con el objetivo de evaluar un indicador de estado estable, por ejemplo un valor rms, que bajo una tolerancia de resultado, pueda concluir condición de régimen estable. Para esta investigación, se realizó manualmente, analizando entre 0.1s y 0.2s, lo anterior, con el fin de omitir las inicializaciones numéricas.

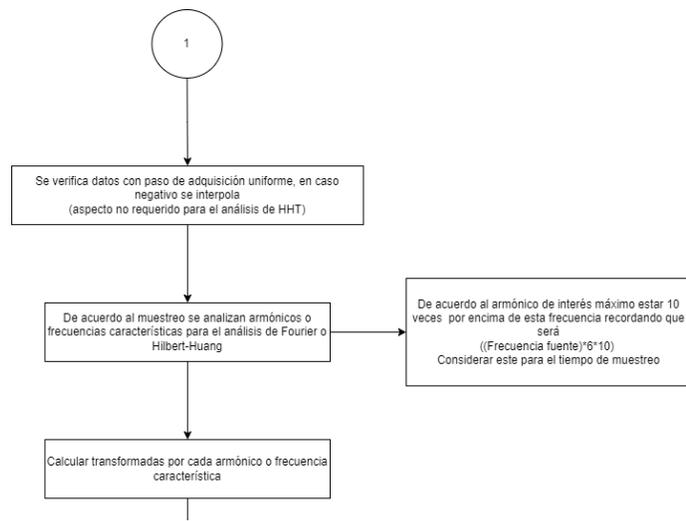
**Figura 5-3.** Verificación de estado estable de la señal, fragmento de la misma entre 0.19s y 0.2.



Cabe destacar que esta verificación se realiza con la tensión de campo.

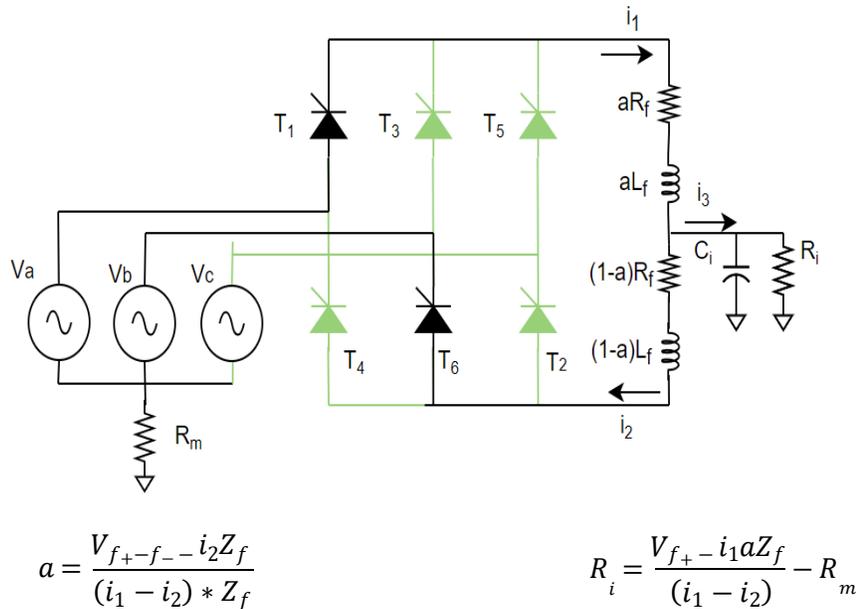
Una vez se aprueban los datos en condición de estado estable, se verifica que el paso de tiempo permite describir las dinámicas de la rectificación de seis pulsos, esto es un muestreo de al menos 6 a 60 veces la frecuencia del sistema, verificando que los datos estén completos y uniformemente espaciados, en caso contrario, interpolar.

**Figura 5-4.** Verificación frecuencia de muestreo y datos uniformemente muestreados.



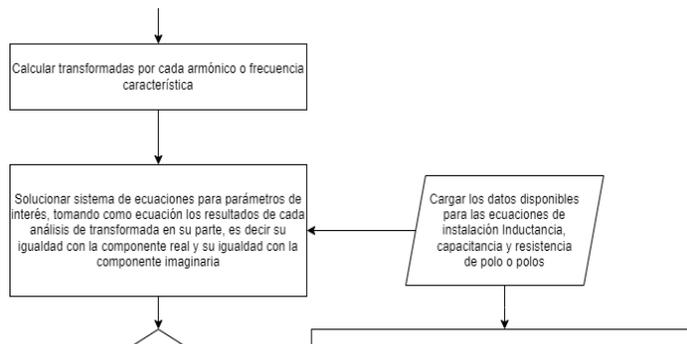
Antes de calcular la transformada de Fourier se emplean los filtros butterworth respectivos, para posteriormente usar el análisis y cálculo a cada armónico y en especial a la componente DC del modelo #1, para determinar la localización y la magnitud de la resistencia de aislamiento equivalente.

**Figura 5-5.** Diagrama circuital y ecuaciones de análisis de Fourier genérico.



Este procedimiento corresponde al siguiente fragmento de la metodología:

**Figura 5-6.** Fragmento de metodología, correspondiente al cálculo de FFT y solución de ecuaciones para “a” y “Ri”



Del capítulo anterior se seleccionan los modelos 1, 2 y 5 como generadores de datos sintéticos, así mismo por su dificultad de solución se analizaron bajo las mismas

ecuaciones (4-14) y (4-16) para los modelos 2 y 5, evaluando la capacidad del análisis circuital del modelo 1, frente a resultados de modelos como el 2 y 5.

Tomando cada simulación generada (60 para cada modelo), descomponiendo mediante transformada rápida de Fourier y solucionando para frecuencia 0Hz, tenemos:

**Tabla 5-1.** Fragmento de resultados de cálculo de parámetros para ángulo de disparo  $60^\circ$  y  $R_i$ , denotando falla u deterioro de aislamiento (modelo #1)

aEsp	aEst	RiEsp	RiEst
0,1	(-1.01+0j)	5000	(1209.81+0j)
0,1	(0.10+0j)	5	(4.96+0j)
0,25	(-5.86+0j)	50000	(23862.42+0j)
0,25	(0.22+0j)	5	(5.26+0j)
0,5	(3.70-0j)	5000	(3421.56-0j)
0,8	(-2.70+0j)	50000	(3352.83+0j)
0,8	(0.82-0j)	5	(5.40-0j)
0,95	(6.73-0j)	1000000	(36708.56-0j)
0,95	(0.94-0j)	5	(4.92-0j)

Para el modelo 5, se obtiene un 60% de resultados coherentes y cercanos a los valores de  $a$  y  $R_i$  simulados entre  $50k\Omega$  y  $5\Omega$ , destacando que para el modelo 5 la ubicación de falla se realiza sobre el polo 2 y por ende es necesario corregir la verificación de resultados adicionando un polo completo ( $aEsp$  Corregido)(Tabla 5-2)

$$aEsp_{corregido} = 0.25 * (1 + aEsp) \quad (5-1)$$

**Tabla 5-2.** Fragmento de resultados modelo 5 ( $5\Omega$ - $5k\Omega$  y  $\alpha = 60^\circ$ ), correspondientes a valores  $a$  y  $R_i$  esperados

aEsp	aEsp Corregido	aEst	RiEsp	RiEst
0,1	0,275	(0.33+0j)	50000	(37515.94+0j)
0,1	0,275	(0.28+0j)	5000	(4864.64+0j)
0,1	0,275	(0.27+0j)	5	(4.99+0j)
0,25	0,3125	(0.36+0j)	50000	(37062.40+0j)
0,25	0,3125	(0.31+0j)	5000	(4890.92+0j)
0,25	0,3125	(0.31+0j)	5	(4.99+0j)
0,5	0,375	(0.47+0j)	50000	(9960.71+0j)

aEsp	aEsp Corregido	aEst	RiEsp	RiEst
0,5	0,375	(0.38+0j)	5000	(4733.38+0j)
0,5	0,375	(0.37+0j)	5	(4.99+0j)
0,8	0,45	(0.47+0j)	5000	(2714.04+0j)
0,8	0,45	(0.45+0j)	5	(4.99+0j)
0,95	0,4875	(0.48+0j)	5	(4.97+0j)

Por lo anterior, los valores calculados de  $a$  y  $R_i$  no son exactos, pero representan un punto de partida para la búsqueda de la zona de falla a tierra, y un orden de magnitud del deterioro de aislamiento.

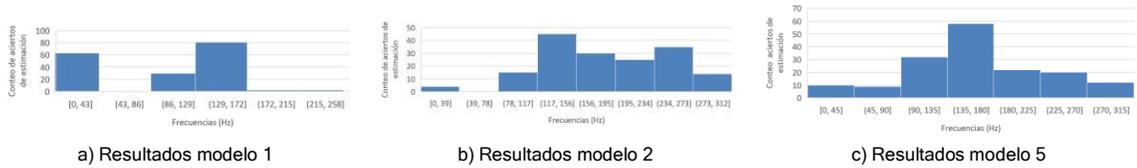
Si bien el modelo 5 presenta los mejores resultados bajo el análisis por transformada de Fourier planteado, solo indica que la metodología de diagnóstico resuelve mejor la estimación de parámetros para un modelo puramente resistivo, reconociendo que aún faltan esfuerzos experimentales para confirmar el modelo de fuga a tierra adecuado para el rotor, trabajo exclusivamente experimental.

Como análisis complementario, se calculan los parámetros  $a$  y  $R_i$  a las frecuencias restantes de la transformada rápida de Fourier (DFT), de manera que se identifican frecuencias con resultados coherentes para los modelos 1, 2 y 5 de fugas a tierra simulados (Tabla 5-3). Inicialmente se identifican estas frecuencias mediante histogramas de sus resultados, no obstante, no son coincidentes las frecuencias con mayor número de estimaciones exitosas, por ende, se acogen todas las frecuencias que presentaron adecuados resultados, siendo el rango de 0Hz a 300Hz, valor particular, ya que corresponde a la frecuencia de la rectificación de seis pulsos con excitación de fuentes trifásicas a 50Hz (Figura 5-7).

**Tabla 5-3.** Fragmento de resultados, cálculo parámetros a diferentes frecuencias

Frecuencia (Hz)	aEsp	aEst	RiEsp	RiEst
0,0	0,1	(0.10+0j)	5	(4.96+0j)
114,4	0,1	(0.31-5.38j)	5	(8.02+3.34j)
152,6	0,1	(0.33+0.15j)	5	(5.59+0.18j)
0,0	0,25	(0.22+0j)	5	(5.26+0j)
152,6	0,25	(0.46+0.13j)	5	(4.65-0.05j)

**Figura 5-7.** Histogramas de aciertos para diferentes frecuencias de la DFT.

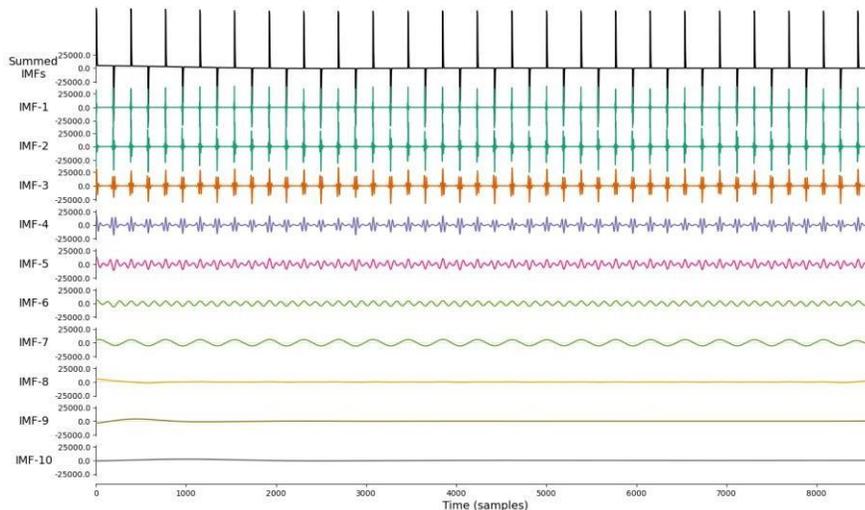


Con esta selección y dado el ajuste de señales, se reportan las 40 primeras frecuencias, las cuales serán insumos para los modelos orientados a datos.

Por modelo se generan 60 registros de 415 variables, indicando los armónicos y las señales de interés, así como su valor de transformada de Fourier reportando de manera separada su parte real y parte imaginaria.

Para el análisis transformada de Hilbert Huang, no se cuenta con una descripción matemática de  $a$  y  $R_i$ , tal como aparece en la transformada de Fourier, su análisis es netamente mediante señales, para lo cual se esquematiza con la corriente de fuga en la siguiente figura, así como sus resultados de frecuencias instantáneas:

**Figura 5-8.** Descomposición de modo intrínseco a corriente de fuga a tierra (aislamiento a  $R_i = 50k\Omega$ )(modelo #1).



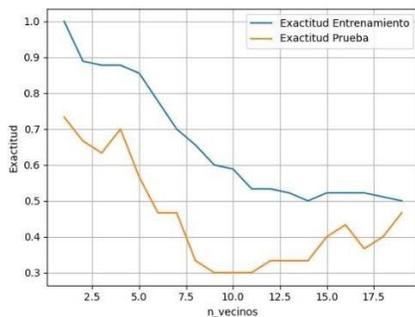
- Freq IMF1 :: 5718.09 ; Freq IMF2 :: 3626.45 ; Freq IMF3 :: 1829.39
- Freq IMF4 :: 855.19 ; Freq IMF5 :: 609.34 ; Freq IMF6 :: 364.31
- Freq IMF7 :: 124.60 ; Freq IMF8 :: 108.40 ; Freq IMF9 :: 32.12

No obstante, analizando las señales restantes del conjunto de datos sintéticos generados en esta investigación, se descompone hasta el cuarto IMF, ya que, para otro conjunto de señales, la frecuencia baja por debajo de cero, que físicamente no tiene sentido, pero de cara a la transformada implica una variación  $180^\circ$  adicional al cambio de fase, o bien, oscilaciones numéricas en la amplitud, por la representación de la transformada y la señal original cerca de valores a cero.

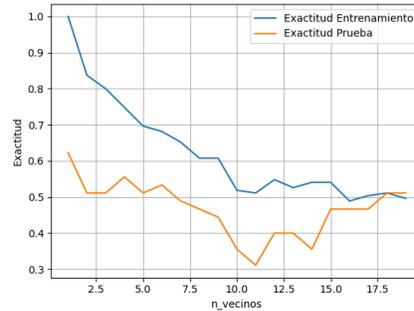
Con este criterio, se generan las cuatro frecuencias y amplitudes medias para cada IMF de las señales simuladas, insumo para los modelos de datos.

El desempeño para el modelo de K-Vecinos como clasificador se presenta en la siguiente figura:

**Figura 5-9.** Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos, para modelo de clasificación con datos de FFT.

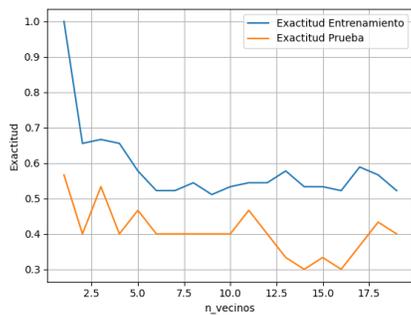


a) Exactitud modelo con datos modelo 1 y 5

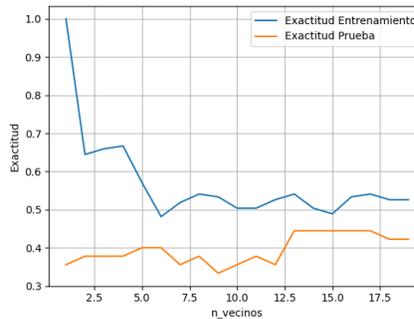


b) Exactitud modelo con datos modelo 1, 2 y 5

**Figura 5-10.** Variación de hiperparámetro k-vecinos cercanos, para modelo de clasificación con datos de HHT.



a) Exactitud modelo con datos modelo 1 y 5



b) Exactitud modelo con datos modelo 1, 2 y 5

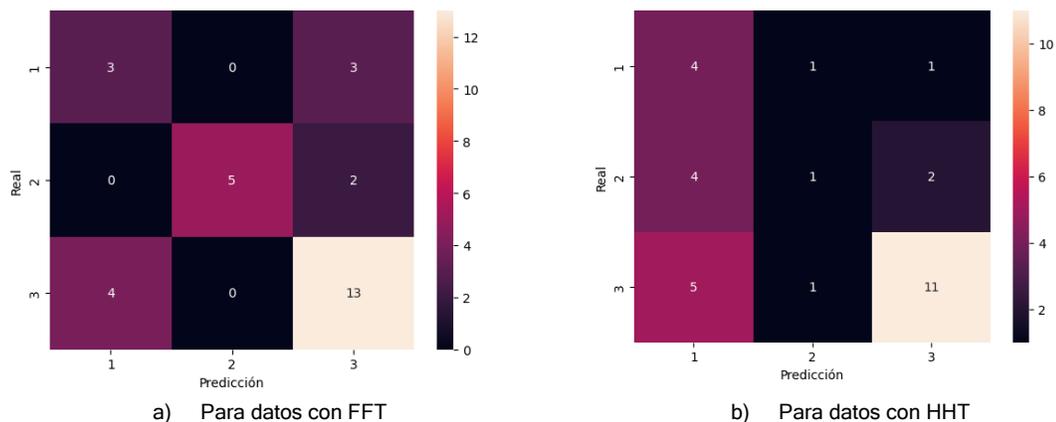
Los mejores desempeños se obtienen con datos de los modelos 1 y 5, resultando en modelos de menor cantidad de parámetros con:

- 4 vecinos cercanos para datos de FFT
- 3 vecinos cercanos para datos de HHT

La selección se realiza buscando mejores desempeños entre exactitud de datos con los datos de entrenamiento y con los datos de prueba, de manera que el modelo no prefiera un conjunto de datos u otro, facilitando con este la inferencia en su uso.

El desempeño con los datos de entrenamiento siempre fue superior a los datos de prueba, por tanto, una valoración más pesimista reside en una matriz de confusión con los datos de prueba para los modelos seleccionados (Figura 5-11).

**Figura 5-11.** Matriz de confusión modelo clasificador k-vecinos cercanos seleccionado para datos de FFT, Modelo 1 y 5 de fugas a tierra.



En cuanto a los valores de exactitud del modelo con datos de HHT, tenemos exactitud de:

- 67% para datos de entrenamiento
- 53% para datos de prueba o validación

En cuanto a los valores de exactitud del modelo con datos de FFT, tenemos exactitud de:

- 88% para datos de entrenamiento
- 77% para datos de prueba o validación

Si bien clasifica en mayor proporción las condiciones del rango de fuga a tierra, aún se presentan falsos negativos en las zonas nivel 1 y 2, las cuales no deberían indicar fuga a tierra, que visto desde esta perspectiva, aún persiste un 28% de falla en la clasificación para FFT quien presenta un mejor modelo que con los datos de HHT.

**Nota 1:**

Se eliminaron las componentes imaginarias a 0Hz para el análisis FFT, debido a que no presentaban diversidad en valores y podría sesgar los resultados de los modelos.

**Nota 2:**

Para la selección de datos de entrenamiento y datos de prueba, se empleó una mezcla aleatoria con 10 semillas diferentes, por ende, este aspecto aún puede mejorar y considerar más modelos para la selección, sin embargo, no se detalla, dado que el objetivo es plantear una metodología de diagnóstico, no una búsqueda exhaustiva del modelo clasificador, para ello se sugiere usar métodos como Estimadores de Parzen de árbol estructurado.

En cuanto a los resultados de k-Vecinos cercanos como estimador, no se incluyen en la metodología, pues como se presentó en el capítulo anterior, los desempeños no son concluyentes.

En cuanto a los resultados de las redes neuronales simples, se obtienen:

**Tabla 5-4.** Resultados red neuronal simple con datos de FFT y HHT

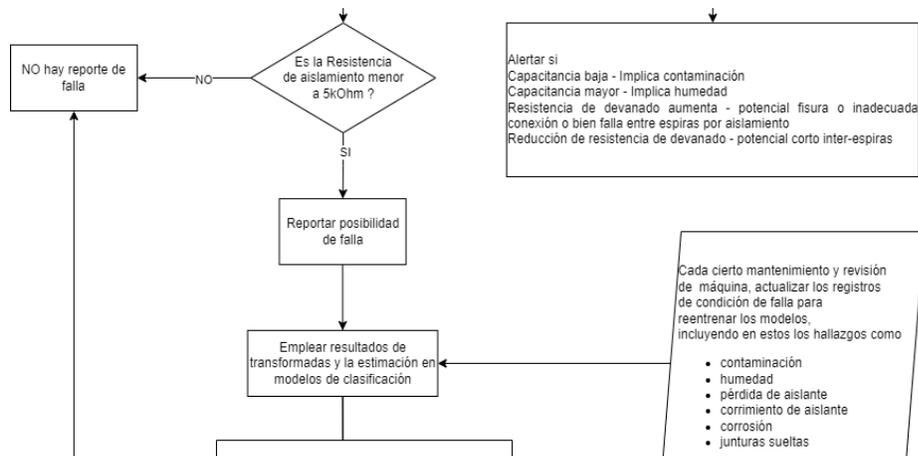
Clase/Desempeño	FFT	HHT
Clase: Nivel de aislamiento (Clasificación)	Normalizado a 3 Función de pérdida: 0.417 Exactitud : 47.78%	Normalizado a 3 Función de pérdida: 0.3324 Exactitud : 47.78%
Clase: Porcentaje de devanado, localización de falla (Regresión)	No es requerida la normalización Función de pérdida: 5.14e-10 Exactitud : 0%	No es requerida la normalización Función de pérdida: 0.0412 Exactitud : 0%
Clase: Resistencia de aislamiento (Regresión)	Normalizado a 1MΩ Función de pérdida: 1.67e-4 Exactitud : 26.67%	Normalizado a 1MΩ Función de pérdida: 0.107 Exactitud : 11.11%

Los modelos entrenados no aportan valor en la estimación de la localización de falla, ya que la exactitud se encuentra sesgada y obtenida en 0%

Durante los entrenamientos se evidenció un sesgo de mejora, es decir, la red mejoraba muy poco posterior a la época 400 o 600 según correspondía los modelos, lo anterior motiva a explorar otras arquitecturas, cantidad de neuronas y capas, no obstante, no se encuentra en el alcance de esta investigación, donde se prueba el uso de técnicas y enlace metodológico para la ubicación de falla y estimación de la resistencia de aislamiento. Por esta razón no se presenta como resultado en la metodología de diagnóstico, no obstante, se reconoce su potencial al diversificar otras arquitecturas para su mejora progresiva.

Con base a los anteriores resultados y retornando a la metodología de análisis, tome las señales de interés y calcule la FFT resolviendo para  $a$  y  $R_i$ . Si el resultado está entre  $50k\Omega$  y  $5\Omega$ , continúe con el análisis de HHT y los modelos de datos que utilizan los datos sintéticos generados y expuestos anteriormente, con el fin de concluir desde diversos métodos la localización y magnitud de la falla, tal como se esquematiza en la siguiente figura.

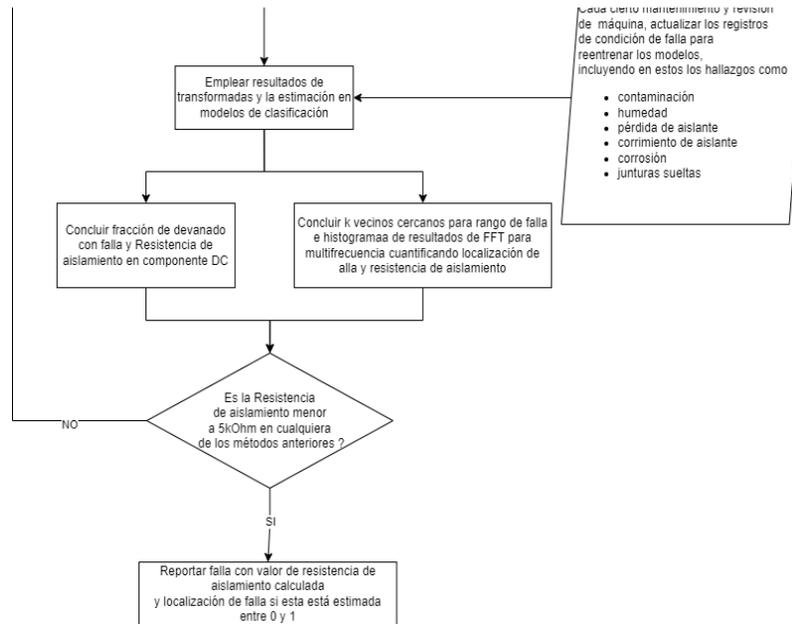
**Figura 5-12.** Fragmento de metodología, correspondiente al análisis de resultados de la FFT.



Finalmente, se exponen algunas razones para interpretar los resultados en el diagrama y se sugiere periodicidad actualizando la base de los modelos de datos, esto es, guardar e

incluir medidas reales y señales sintéticas para mantener actualizado los modelos (sección final de la metodología).

**Figura 5-13.** Fragmento de metodología, correspondiente al reporte de resultados e interpretación.



Con lo anterior, la metodología permite el diagnóstico para condición incipiente o de gran magnitud de falla fuga a tierra en rotores de generadores, analizando condiciones de estable estable y cuyo aporte principal, reside en la locación y cuantificación del deterioro de aislamiento, quien permite la falla de fuga a tierra en rotores.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

La determinación de resistencia de aislamiento y punto potencial de falla a tierra en devanado de campo, puede parecer totalmente determinístico de acuerdo al análisis de las ecuaciones circuitales, no obstante, se pueden presentar variaciones en sus resultados determinados principalmente por los órdenes de grandeza de las inductancias y capacitancias del devanado de campo, confirmando investigaciones previas en este tema, por tanto, un aporte a estos estudios reside en complementar el diagnóstico con modelos orientados a datos, tal que ajusten las particularidades del generador de interés. En este trabajo se tomó como insumos, los resultados de los diagnósticos de señales y modelos, es decir, la transformada de Fourier, Hilbert-Huang y modelos circuitales, reconociendo que entre mayor diversidad de información el modelo de datos, se complementará mejor. Conviene destacar que las ecuaciones circuitales se resuelven en sus componentes real e imaginaria, para conformar ecuaciones solubles, detallando en especial la componente DC, la cual presentó la mayor asertividad de localización y cuantificación de fuga a tierra para valores bajos de resistencia de aislamiento.

Es preferible realizar el análisis de fugas a tierra con las corrientes, más que solo con tensiones, como en el modelo de protección de inyección AC, pues si bien en el contexto de una fuente auxiliar este presenta selectividad a la falla, de cara a la realimentación sin fuentes auxiliares, la tensión en terminales de campo, no facilita la selectiva para puntos ni magnitudes de falla, al menos el validado con ángulos de disparo entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ , abordado en esta investigación.

Para la detección con mayor sensibilidad de los parámetros de resistencia de fuga a tierra y localización de falla, las ecuaciones planteadas del modelo de excitación, rotor, aislamiento y fuga a tierra, presentan mayor notoriedad al cambio del punto de falla y

magnitud de la misma, de acuerdo al orden de grandeza de los parámetros RLC, razón por la cual, los cambios son más evidentes para modelos excluyendo la resistencia de devanado o excluyendo la inductancia o en su defecto excluyendo la capacitancia a tierra.

Se logra estimar la zona de falla y rango de resistencia de aislamiento en un 45% de los datos sintéticos generados para esta investigación, mediante el cálculo directo con las componentes DC del análisis de Fourier al modelo # 1 de rotor con fuga a tierra, no obstante, se presenta un 100% de asertividad cuando la resistencia es menor a  $5k\Omega$  y el parámetro de ubicación de falla está entre 0 y 1, en esta situación el modelo propuesto de localización y cuantificación de la resistencia de aislamiento fue exitoso, por ende, para futuras investigaciones se puede enfocar en valores de resistencia menores a  $50k\Omega$ .

Del análisis de resistencia y localización de falla a diversas frecuencias en el barrido de Fourier, se propone concluir bajo los resultados de un histograma, ya que no es totalmente asertivo los resultados por frecuencias individuales, en algunos casos dan los resultados esperados o no, por ende, mejor concluir donde se encuentre la mayor nube de puntos, o estimaciones coincidentes y tomando como valores estimados solo las componentes reales.

El análisis de modelos de datos con HHT y FFT presentan avances en clasificación del rango de resistencia de aislamiento para los datos de prueba empleados de 53% y 77% respectivamente para cada técnica, sin embargo, no es confiable dichas conclusiones por su análisis de falsos negativos y falsos positivos, evidenciados en los análisis de matriz de confusión.

Los modelos de datos orientados a localización de falla no son concluyentes bajo datos de FFT ni HHT, por ende, conviene plantear otras arquitecturas o bien otras técnicas. Para los resultados de k vecinos cercanos y red neuronal, presentan mejores desempeños como clasificador y como estimadores los k vecinos cercanos, la red neuronal simple empleada no es competitiva, pues sus exactitudes no superan el 50%, con valores inclusive de 0%

Se evidencia la facilidad de análisis mediante la transformada de Hilbert-Huang, frente a la transformada de Fourier, especialmente en el hecho de no requerir muestreos continuos de señal o bien lapsos muy cortos de ausencia de datos, situación presentada en la implementación de los algoritmos, ya que en la implementación de los tiristores, se requirió

paso adaptativo y con ello mayores esfuerzos de ajuste para el principal método de análisis de esta investigación (la transformada de Fourier), aspectos que no se presentaron en este documento de tesis, pero se encuentran disponibles en los repositorios del grupo de investigación GITA. La metodología se resume en un diagrama de flujo para implementación o identificación rápida de aspectos a mejorar de la cuantificación de resistencia de aislamiento y localización de zona de falla.

## 6.2 Recomendaciones

Para seleccionar las ecuaciones descriptivas de la fuga a tierra en rotor, conviene primero evaluar la sensibilidad al cambio de un modelo excluyendo R o L o C, de esta manera es más notorio la localización y magnitud de la falla.

Si bien existen relaciones de señales estator-rotor, se plantea como líneas de investigación adicional, determinar la relación flujo del rotor con fuga a tierra al estator, de manera que se pueda complementar el modelo trabajado (excitación-devanado rotor) incluyendo la realimentación que puede darse desde el estator.

La investigación centró su atención en condiciones estables de falla, un aspecto a profundizar, reside en comprobar y ajustar el comportamiento de la metodología de análisis frente a cambios de régimen de operación e inclusive, en condición transitoria, facilitando el análisis de falla incipiente y falla intermitente.

Como trabajo futuro, complementar el análisis de doble falla a tierra, no bajo el enfoque del modelo propuesto en esta investigación, sino desde un punto de vista de corto entre espiras, con el fin de aprovechar avances en este tema, como un caso muy particular pero bastante nocivo de las fugas a tierra.

Para la búsqueda de hiperparámetros y obtener mejores modelos, se recomienda establecer un espacio de búsqueda de estos hiperparámetros mediante técnicas como el Estimador de Parzen en árbol estructurado.



# Bibliografía

- [1]. Anchou, Y. (2020). *Application of Hilbert-Huang Transform in Bearing Fault Detection*. University of Bergen, Department of Natural Science and Mathematics.
- [2]. Anderson, P. (1999). *Power System Protection*. IEEE Press Power Engineering, Jhon Wiley & Sons.
- [3]. Andreas, C., M., G., & Guido, S. (2017). *Introduction to Machine Learning with Python, a Guide for Data Scientists*. O'Reilly.
- [4]. Blázquez, F., Aranda, M., Rebollo, E., & Platero, C. (2013). Influence of Rotor Capacitance in On-Line Rotor Ground Fault Location Method for Synchronous Machines with Static Excitation. *3th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Wroclaw, Poland*.
- [5]. Blázquez, F., Aranda, M., Rebollo, E., & Platero, C. (2015). New Fault-Resistance Estimation Algorithm for Rotor-Winding Ground-Fault Online Location in Synchronous Machines With Static Excitation. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*.
- [6]. Blázquez, F., Aranda, M., Rebollo, E., & Platero, C. (2015). New Fault-Resistance Estimation Algorithm for Rotor-Winding Ground-Fault Online Location in Synchronous Machines With Static Excitation. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 62, NO. 3.
- [7]. Blázquez, F., Platero, C., Rebollo, E., & Blázquez, F. (2015). Improvement of the ground-fault detection in field windings of synchronous machines with static excitation based on third-harmonic voltage phase-angle comparison. *17th European Conference on Power Electronics and Applications*.
- [8]. Blázquez, F., Platero, C., Rebollo, E., & Blázquez, F. (2016). Novel Rotor Ground-Fault Detection Algorithm for Synchronous Machines With Static Excitation Based on Third-Harmonic Voltage-Phasor Comparison. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 63, NO. 4.
- [9]. Dedović, M., Avdaković, S., & Alihodžić, A. (2023). Application of HHT for Identification of LowFrequency Electromechanical Oscillatory Modes, Their

Character and Damping. *XXIX International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*.

- [10]. Digital Energy. (n. d.). GPM-F Field Ground Protection, complete generator system protection.
- [11]. Eleschova, A., Belan, A., & Gasparovsky, D. (2005). Rotor Ground Fault Protection of Generator with Static Excitation System. *Electrical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovak Republic*.
- [12]. Hagan M. T. et al. (2014). *Neural Network Design (2nd Edition)*. USA : Oklahoma State University.
- [13]. Hartmann, W. (2016). *Generator Protection Theory & Application, 33rd Annual Hands-on Relay School*. Pullman, Washington: Beckwith Electric Company.
- [14]. Hartmann, W. (n. d.). *Advanced Generator Ground Fault Protections*. Beckwith Electric Company.
- [15]. Heijden, T., Lago, J., Palensky, P., & Abraham, E. (2021). Electricity Price Forecasting in European Day Ahead Markets: A Greedy Consideration of Market Integration. *IEEE Access*.
- [16]. Herrera, F., Mortera, M., & Ostia, C. (2023). Application of Support Vector Machine Algorithm in Real-time Bearing Fault Diagnostic Model for Single-phase Induction Motor using Hilbert-Huang Transform as Feature Extractor. *7th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*.
- [17]. Huang, N. (n.d.). *Chapter 1. Introduction to the Hilbert-Huang Transform and Its Related Mathematical Problems*. Obtenido de <https://geogin.narod.ru/arhiv/hht/hht3-1.pdf>
- [18]. Huang, N., & Shen, S. (2005). *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. World Scientific Publishing Co.
- [19]. IEC 60076-18. (2012). Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response.
- [20]. IEEE C37.101-1985. (1985). *IEEE Guide for Generator Ground Protection*. Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society.
- [21]. IEEE Std 421.5. (2016). IEEE Recommended Practice for Excitation System Model or Power System Stability Studies. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- [22]. IEEE Std C57.149. (2012). Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. *IEEE Standards*.

- [23]. Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis System, An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer.
- [24]. Kruesi, W., Howell, I., & Easton, I. (1978). *IEEE Standard Test Code for Resistance, IEEE Std 118*. Power Engineering Society of the Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [25]. Machowski, J., Bialek, J., & Bumby, J. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*. Jhon Wiley & Sons.
- [26]. Martín, C., Guerrero, J., Platero, C., & Mourelo, P. (2020). Ground Faults Location for Synchronous Machine Poles through Frequency Response Analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol 59.
- [27]. Michalec, J., & et al. (1990). *IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators, IEEE Std 67*. Synchronous Machinery Subcommittee of the Electric Machinery Collection of the IEEE Power Engineering Society.
- [28]. Nevada, B. (n.d.). *Condition Monitoring Solutions for Hydro*. Obtenido de [https://dam.bakerhughes.com/m/65bbcaf2f9e27e6a/original/Bently-Hydro-Brochure\\_Web-Version.pdf](https://dam.bakerhughes.com/m/65bbcaf2f9e27e6a/original/Bently-Hydro-Brochure_Web-Version.pdf)
- [29]. Palanisamy, R. (2016). Capacitance and Inductance based Rotor Ground Fault Location Method for Synchronous Machines. *The Institution of Engineers (India)*.
- [30]. Panneerselvam, L. (2023). *Activation Functions and their Derivatives – A Quick & Complete Guide*. Obtenido de <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/04/activation-functions-and-their-derivatives-a-quick-complete-guide/>
- [31]. PARATEC, X. (2023). *Parámetros Técnicos del SIN – PARATEC* -. Obtenido de <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- [32]. Pardo , M., Mahtani, K., Platero, C., & Fernández, J. (2023). On-Line Rotor Ground Fault Location Method for Brushless Synchronous Machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*.
- [33]. Platero, C., Blánquez, F., Frías, P., & Pardo, M. (2011). New On-Line Rotor Ground Fault Location Method for Synchronous Machines With Static Excitation. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*.
- [34]. Qiao, J., Yin, X., & Wang, Y. (2023). Faulty Phase Selection and Location Method of Rotor Ground Fault for Variable Speed Pumped Storage Generator-Motor. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*.

- [35]. Rashid, M. (2001). *Power Electronic Handbook*. Pensacola, Florida: Academic Press.
- [36]. Sadiku, M., & Alexander, C. (2006). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. Mexico: Mc Graw Hill.
- [37]. Siemens. (2015). Solutions for an aging fleet, Generator Upgrades and Modernization. *Siemens*.
- [38]. Stone, G., Boulter, E., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). *Electrical Insulation For Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. IEEE PRESS Series on Power Engineering.
- [39]. Tcheslavski, G. (2008). ELEN 3441 Fundamental of Power Engineering Lecture 7: Synchronous Machines Construction of Synchronous Machines. *presentación de clase*.
- [40]. Woodward SEG. (n. d.). *MRR1 Relé de derivación a tierra del rotor*. Woodward SEG GmbH & Co. KG.
- [41]. Xu, B., Wang, N., Chen, T., & Li, M. (2015). Empirical Evaluation of Rectified Activations in Convolution Network.
- [42]. Yi, N., & Yi, Y. (2011). Comparison of Rotor Earth Fault Protections in Three Gorges Hydropower Plant. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China*, 1-4.
- [43]. Zawoysky, R., & Tornroos, K. (2001). E Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options, GER-4212. *General Electric*.
- [44]. Zelicko, S. (s.f.). Synchronous Generator Modeling Using Matlab. En S. Zelicko, & M. K. Vedrama.