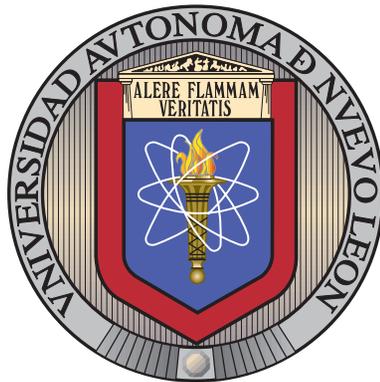


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DISCRIMINACIÓN ADAPTATIVA DE CORRIENTES DE
ENERGIZACIÓN EN TRANSFORMADORES DE
POTENCIA

POR

JHONATAN LONDOÑO OSPINA

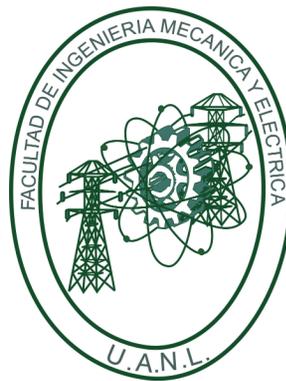
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

AGOSTO 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DISCRIMINACIÓN ADAPTATIVA DE CORRIENTES DE
ENERGIZACIÓN EN TRANSFORMADORES DE
POTENCIA

POR

JHONATAN LONDOÑO OSPINA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

AGOSTO 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Discriminación Adaptativa de Corrientes de Energización en Transformadores de Potencia”, realizada por el estudiante Jhonatan Londoño Ospina, con número de matrícula 2032337, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Gina María Idárraga Ospina
Director

Dr. José Antonio de la O Serna
Revisor

Dr. Daniel Guillén Aparicio
Revisor

Dr. Efraín Alcorta García
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 557520

Acta Núm. 3941

Ciudad Universitaria, a 26 de Agosto de 2021.

*Este triunfo está dedicado a mi familia, ya que se debe enteramente a ellos.
A Luis P, Samantha E. y Loriane S., por hacer de esta etapa de crecimiento, una
experiencia inolvidable.*

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología - *CONACyT*, a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la reconocida Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - *FIME*, por la maravillosa oportunidad de estudio y los recursos dispuestos para este.

Al Dr. José A. De La O Serna, por su continua disposición y asesoría, sólido conocimiento y vital apoyo científico en la ejecución de la tesis.

A la Dra. Gina Idárraga Ospina, quien con su paciencia, dedicación, profesionalismo, experiencia y su admirable conocimiento, permitieron la elaboración de un sólido trabajo de investigación.

Jhonatan Londoño Ospina

Agosto 2021

Resumen

Debido a la importancia de los transformadores en el sistema eléctrico de potencia, se requiere una protección ante fallas eléctricas que opere en tiempos inferiores a 100 ms para fallas internas y que opere adecuada y únicamente para los eventos que requieran operación. Por tal motivo y de acuerdo con estándares internacionales se utiliza la función de protección diferencial de transformador cuyo principio de funcionamiento se basa en la ley de corrientes de *Kirchoff* que permite discriminar entre fallas internas y eventos externos gracias a la suma vectorial de las corrientes en cada devanado del transformador.

Aunque dicha función de protección discrimina fallas internas de eventos y fallas fuera de su zona de protección delimitada por la ubicación de los transformadores de corriente, existen eventos para los cuales se puede generar la actuación errónea de la función, como en el caso más común de actuación errónea correspondiente a la energización del transformador, debido a que la corriente de magnetización fluye únicamente a través del devanado sobre el cual se energice.

Por tanto, se requiere discriminar entre corrientes de energización y corrientes de falla interna, de manera que se realice el bloqueo de la función diferencial al momento de la energización del transformador, permitiendo su conexión al sistema.

Para lograr el bloqueo se desarrolla en esta tesis un método adaptativo que permite discriminar corrientes de energización, flujo residual y sobreexcitación, de corrientes de falla interna, a través de la aplicación de la *Transformada Wavelet Discreta*, gracias a la descomposición tiempo-frecuencia de las señales corrientes. Esta se implementa mediante el banco de filtros obtenido a partir de las *O-Splines*, las cuales permiten traslaciones enteras de la frecuencia fundamental y, aunque estas traslaciones no son ortogonales, su respuesta en frecuencia cuenta con una ganancia mayormente lisa en la banda de paso, por lo tanto, en la presente tesis son considerados como función escalante y la correspondiente onduleta se obtiene como una simple modulación. De esa forma ejecutan el algoritmo de la *DWT* con buenos resultados.

Adicionalmente, dicha traslación de las frecuencias centrales permite la inclusión de la adaptabilidad del método de discriminación, de manera que el método pueda ser utilizado, no solo para unas características específicas del sistema y el transformador de potencia, sino para cualquier condición posible, tanto de niveles de cortocircuito del sistema, como de características constructivas del transformador.

Finalmente, se realiza un post procesamiento de los coeficientes de la transformada, mediante la obtención de la *Entropía*, la cual permite obtener el criterio discriminante, objeto de la tesis y, adicionalmente, mediante los valores propios de la matriz del *Wavelet Correlation Mode*, a través de los cuales se realiza una discriminación más precisa del tipo de falla interna correspondiente con las señales de corriente analizadas.

El método adaptativo desarrollado permite una discriminación del 100% de los casi 1000 casos simulados y procesados, asociados con 14 tipos de eventos, logrando cumplir el objetivo de la tesis y comprobando así la hipótesis.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.2.1. Operación Errónea de la Función Diferencial	3
1.2.2. Inconvenientes con el Bloqueo Actual de la Función Diferencial	4
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Antecedentes	6
1.6. Estructura de la tesis	9
2. El Transformador de Potencia	12
2.1. Introducción al Transformador de Potencia	12
2.2. Modelo Eléctrico del Transformador	14
2.3. Corrientes de Energización	18
2.4. Fallas en el Transformador de Potencia	21
2.5. Protección Diferencial de Transformador	23
2.5.1. Principio de Funcionamiento y Característica	24
2.5.2. Operación Errónea de la Función Diferencial	27

2.5.2.1. Condiciones Operativas Inherentes al Sistema de Potencia	28
2.5.2.2. Eventos en el Sistema de Potencia	31
2.5.3. Bloqueo de la Función Diferencial ante <i>Inrush</i>	32
3. Simulación y Procesamiento Digital de las Señales	34
3.1. Modelo del Sistema de Potencia	34
3.2. Procesamiento de Señales	37
3.2.1. Convolución de Señales	39
3.2.2. Estimación Fasorial	40
3.2.3. Transformada Wavelet	42
3.2.3.1. Definición	42
3.2.3.2. Familias de Funciones <i>Wavelet</i> Madre	45
3.2.3.3. Representación de Filtros	45
3.3. O-Splines	48
3.4. Entropía de Coeficientes de la <i>DWT</i>	51
4. Discriminación de Corrientes de Energización	53
4.1. Banco de Filtros con O-Splines	53
4.2. Algoritmo de Discriminación	56
4.2.1. Aplicación del Método de Discriminación	59
5. Resultados	65
5.1. Resultados Obtenidos	65
5.1.1. Falla interna en bornes del transformador	66
5.1.2. Falla interna durante energización con carga	66
5.1.3. Falla interna durante energización en vacío	68
5.1.4. Energización en vacío	69
5.1.5. Falla interna al 25% del devanado secundario	71

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	x
5.1.6. Falla interna al 85% del devanado secundario	71
5.1.7. Sobreexcitación al 50%	74
5.2. Análisis de Resultados	75
5.3. Wavelet Correlation Modes	77
5.4. Conclusión	78
6. Conclusiones	80
6.1. Conclusiones	80
6.2. Trabajo futuro	83
7. Apéndice	85
7.1. Resultado Detallado	85

Índice de figuras

2.1. Transformador monofásico ideal.	14
2.2. Modelo circuital del transformador monofásico ideal.	16
2.3. Transformador monofásico real.	17
2.4. Modelo circuital del transformador monofásico real.	17
2.5. Curva de magnetización del núcleo del transformador.	19
2.6. Forma de onda de corriente de energización de transformador.	20
2.7. Principio de funcionamiento de la función diferencial de transformador.	24
2.8. Característica de operación de función diferencial de transformador.	27
3.1. Modelo de sistema de potencia en PSCAD.	35
3.2. Ventana móvil para procesamiento de señales.	38
3.3. Descomposición en tiempo y frecuencia realizada por la <i>DWT</i>	44
3.4. Algoritmo de operación de la <i>DWT</i> mediante banco de filtros.	47
3.5. Función <i>Wavelet</i> madre de la <i>DWT</i> - <i>Deubechies 4</i> o <i>db4</i>	48
3.6. Envolventes de filtros pasabajas de las <i>O-Splines</i>	50
4.1. <i>O-Spline</i> de orden 9 ($K=9$) y frecuencia fundamental de 60 Hz.	55
4.2. Banco de filtros de las <i>O-Spline</i> para la <i>DWT</i>	55
4.3. Diagrama de flujo con algoritmo de discriminación propuesto.	60
4.4. Corrientes <i>Inrush</i> y evolución de corriente diferencial.	61

4.5. Corrientes <i>Inrush</i> y coeficientes de la <i>DWT</i>	61
4.6. Coeficientes de la <i>DWT</i> en ventana móvil de 1 ciclo.	63
5.1. Resultados de evento de Falla Interna en Bornes.	67
5.2. Resultados de evento de Falla Interna + Inrush + Carga.	68
5.3. Resultados de evento de Falla Interna + Inrush en Vacío.	69
5.4. Resultados de evento de Energización en Vacío.	70
5.5. Resultados de evento de Falla Internal al 25 % del Devanado.	72
5.6. Resultados de evento de Falla Internal al 85 % del Devanado.	73
5.7. Resultados de evento de Sobreexcitación al 50%.	74

Índice de tablas

3.1. Datos de Entrada del Transformador de Potencia	35
3.2. Datos de Entrada de los Transformadores de Corriente	36
3.3. Datos de Entrada del Equivalente de Red	36
3.4. Eventos definidos para simulación y generación de señales.	37
3.5. Familias de <i>Funciones Madre</i> para la <i>Transformada Wavelet</i>	46
5.1. Resumen Global de Resultados Obtenidos	77
7.1. Resultado Detallado	92

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan las bases que dan lugar y sustentan el desarrollo del método de discriminación a través de la Justificación, el Planteamiento del Problema y la Hipótesis, así como los Objetivos establecidos para lograr obtener dicho método. Posteriormente se presentan los Antecedentes, donde se describen algunos de los métodos de discriminación relevantes y, finalmente, se presenta la estructura de la tesis.

1.1. Justificación

El transformador de potencia, como uno de los elementos más importantes de una subestación, requiere protecciones que, ante fallas mecánicas y fallas eléctricas internas, lo aislen del sistema de potencia instantáneamente con el fin de evitar su destrucción o comprometer sus características eléctricas y su vida útil. Para fallas eléctricas internas en transformadores con potencias superiores a 10 MVA, la protección se realiza de acuerdo con estándares internacionales y prácticas actuales de protección mediante relevadores digitales a través de la función de protección diferencial, código ANSI 87T, la cual tiene como principio de funcionamiento la ley de corrientes de *Kirchoff*, esto es, la corriente que ingresa por uno de sus devanados, debe ser igual a la corriente que sale

por el o los demás devanados. De esta manera la función diferencial debería discriminar de forma precisa entre fallas internas y eventos externos [1], [2].

Sin embargo, existen casos para los cuales la función de protección diferencial puede operar erróneamente, entre los que se destacan:

- *Energización*: Al momento de la energización del transformador de potencia, se establece siempre una corriente de energización (corriente *Inrush*), debido al proceso de magnetización del transformador [1], la cual fluye únicamente a través del devanado primario y genera una diferencia entre las corrientes involucradas en la protección diferencial, activando la protección y desconectando al transformador del sistema, impidiendo de esta manera su energización [1], [2], [3]. Por lo anterior, se requiere que la protección bloquee su operación al momento la energización del transformador, pero garantizando la operación en caso de existencia de fallas internas.
- *Saturación de CTs*: En casos de cortocircuitos externos a la protección diferencial, con valores de corrientes de falla elevados, se puede generar la saturación de los transformadores de corriente asociados. Esto implica que las corrientes sensadas por los dispositivos de protección difieran de la corriente que fluye a través del transformador y, por tanto, exista diferencia entre las corrientes involucradas en la función de protección, detectandose erróneamente esta condición como falla interna [4].
- *Sobreexcitación*: Ocurre cuando el transformador de potencia se ve sometido a una sobretensión y, simultáneamente, a una baja frecuencia causando la saturación del núcleo del transformador y generando diferencias entre las corrientes de la función diferencial.

De los casos mencionados, teniendo en cuenta que no necesariamente se presentará saturación especialmente si se tiene una adecuada selección de los transformadores de corriente con base en los niveles de cortocircuito del sistema, además de una baja probabilidad de presencia de sobreexcitación, el caso más importante, de reto significativo y que ha generado múltiples investigaciones, corresponde al de distinguir adecuadamente entre corrientes de energización y fallas internas [5], [6].

Sin embargo, el método de discriminación utilizado en la práctica por los relevadores actualmente disponibles en el mercado, basado en la componente de segundo armónico de la corriente de energización mediante el cual se realiza el bloqueo de la función de protección diferencial, presenta operaciones erróneas ante determinadas condiciones del sistema de potencia, como se presenta en la sección 1.2.1.

Debido a esto, se desarrolla un método que discrimine entre corrientes de energización y corrientes de falla interna en el transformador de potencia, con el fin de generar el bloqueo de la función de protección diferencial al momento de la energización del transformador, permitiendo así su conexión al sistema y, además, garantizando la operación de la función diferencial en caso de fallas internas.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Operación Errónea de la Función Diferencial

Debido a que la corriente de energización o corriente *Inrush* en transformadores de potencia fluye únicamente por el devanado primario con valores de hasta 10 veces la corriente nominal, se genera la actuación de la protección diferencial ante la energiza-

ción del transformador. Por tanto, con el fin de permitir la conexión del transformador al sistema de potencia, se requiere el bloqueo de la función diferencial durante su energización.

En la práctica, se restringe dicha actuación en los dispositivos de protección digitales, haciendo uso del contenido de segundo armónico presente en la corriente *Inrush*, típicamente mayor al 15% de la corriente de secuencia positiva [2].

1.2.2. Inconvenientes con el Bloqueo Actual de la Función Diferencial

Los transformadores de potencia modernos son construidos con materiales amorfos de alta calidad y bajas pérdidas, con una densidad de saturación baja, por lo que la corriente *Inrush* generada en el momento de su energización, se caracteriza por un contenido de segundo armónico inferior incluso al 7%, es decir, igual o incluso menor que el contenido presente en fallas eléctricas internas, por lo que el bloqueo convencional mediante contenido armónico, no sería confiable [5], [7].

Adicionalmente, para fallas eléctricas internas en presencia de: saturación de transformadores de corriente, sistemas de potencia con capacitancias en paralelo, sistemas con líneas largas de ultra alta tensión y cortocircuitos con resistencias de falla no lineales, se pueden tener contenidos de segundo armónico elevados, mayores al 15% utilizado por las protecciones digitales para el bloqueo de la protección diferencial. Bajo dichas condiciones, se bloquearía la activación de la función diferencial, impidiendo la desconexión instantánea del transformador e incrementando la posibilidad de un daño severo o irreparable en este [5], [7].

Adicionalmente, la forma de onda de la corriente *Inrush* variará tanto en magnitud como en duración entre transformador de potencia, debido a diferencias constructivas y diferencias en las características eléctricas del sistema de potencia que lo alimente; por tal motivo se requiere la implementación de un método de bloqueo que se adapte a las diferentes condiciones del sistema eléctrico.

1.3. Hipótesis

Si se realiza la adecuada descomposición y procesamiento de las señales de corriente involucradas en la protección diferencial, así como el análisis del fenómeno correspondiente a través de dicho procesamiento, se logrará implementar un esquema de protección diferencial adaptativo que permita discriminar entre corrientes de falla y corrientes de energización y el posterior bloqueo de la función de protección diferencial ante la energización del transformador de potencia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Discriminar entre corrientes de energización y corrientes de falla interna en transformadores de potencia mediante un esquema de discriminación adaptativo, con el propósito de realizar el bloqueo de la función de protección diferencial ante la energización del transformador.

1.4.2. Objetivos específicos

- Explorar los métodos y algoritmos utilizados para la discriminación de corrientes de energización con el fin de seleccionar el más adecuado para la implementa-

ción de bloqueo de la función diferencial.

- Implementar el modelo del transformador saturable en un programa de simulación EMTP, en el cual se realizará el modelado del sistema de potencia con el transformador saturable y, posteriormente, la simulación de alrededor de 1000 condiciones diferentes asociadas con 14 tipos de eventos.
- Realizar el procesamiento de las señales obtenidas a través del método seleccionado, de manera que pueda obtenerse un criterio de discriminación que identifique corrientes de energización y corrientes de falla interna.
- Desarrollar un esquema de bloqueo adaptativo de la función diferencial que actúe ante la energización del transformador y permita su conexión al sistema de potencia.

1.5. Antecedentes

El transformador de potencia, debido a su importancia en el sistema eléctrico, requiere una protección rápida, confiable y segura, que despeje instantáneamente fallas internas. Esto se logra, parcialmente, mediante la función de protección diferencial de transformador, la cual discrimina entre corrientes de falla interna y eventos externos al transformador (corrientes de carga, sobrecarga y falla externa), sin embargo, puede llegar a presentar operaciones erróneas en determinados casos, e.g., eventos normales de operación llegan a ser detectados como fallas internas y, fallas internas pueden no despejarse debido al bloqueo de la función.

De los eventos más comunes y de mayor probabilidad de ocurrencia, que generen la operación indeseada de la función diferencial, se encuentran las corrientes de

energización, las cuales generan la activación de la protección diferencial, impidiendo la conexión del transformador al sistema de potencia. Por lo que los dispositivos de protección en el mercado realizan el bloqueo de la función a través del contenido de segundo armónico presente en la señal de corriente *Inrush*. Sin embargo, existen diferentes casos en los cuales, las fallas eléctricas externas tendrán un contenido elevado de segundo armónico y, por el contrario, fallas internas tendrán un contenido bajo de segundo armónico.

De la literatura científica consultada, se observa una gran cantidad de herramientas y métodos de análisis de las señales de corriente entre las que se destacan el *Filtro Extendido de Kalman* [8], el *Segundo Momento Central* [9], la *Transformada de Clarke* [10] y *Morfología Matemática* [6] y la *Transformada Wavelet*, sin embargo, teniendo en cuenta las características de las corrientes *Inrush*, las cuales permiten evidenciar que el problema de análisis corresponde a un problema frecuencial, la *Transformada Wavelet* muestra ser la herramienta óptima al permitir la descomposición frecuencial de la señal bajo análisis.

Por tanto, en busca de la discriminación adecuada entre corrientes de energización y corrientes de falla, varios autores realizan el análisis de las señales de corriente a través de la *Transformada Wavelet* y diferentes herramientas matemáticas de post procesamiento de la información arrojada por la transformada, como se detalla a continuación.

A. M. Gaouda et. al. en [5], calcula el máximo local de los coeficientes que contengan la mayor cantidad de energía de la señal; M. Oliveira et. al. en [4], implementa un esquema de protección diferencial adaptativo a través de la transformada discreta *Wavelet* utilizando para ello un índice adaptativo mediante la obtención de la energía de

los coeficientes y su comparación con un ajuste variable de acuerdo con la corriente diferencial leída; R. Negreiros y A. Ferreura en [11], realizan la discriminación entre corrientes de energización y corrientes de falla interna mediante la aplicación del gradiente de energía de la transformada, *Wavelet Energy Gradient*, como el cambio de la energía de los coeficientes en el tiempo.

Daniel Guillen et. al. en [7], a través de la matriz de correlación de los coeficientes de la transformada, *Wavelet Correlation Modes*, discriminan entre corrientes de energización y corrientes de falla interna, este permite utilizar la información contenida en todos los coeficientes de la transformada a través de un único valor, el valor propio máximo de la matriz de correlación. Este artículo tendrá relevancia en el método de discriminación desarrollado y presentado en este documento.

O. Gouda et. al. en [12], obtiene la energía de los coeficientes de la transformada y a través de un índice y un umbral fijo, se realiza la discriminación requerida; Sajad Bagheri et. al. en [3] igualmente utiliza la energía de los coeficientes de la transformada, específicamente la transformada *Wavelet* discreta de máxima superposición, para luego realizar un post procesamiento de estos coeficientes a través de redes neuronales artificiales, las cuales se encargan de tomar la decisión del tipo de evento y, finalmente R. Medeyros y F. Costa en [13] y [14], realizan un esquema de protección diferencial basado en la transformada *Wavelet* para detectar fallas internas durante condiciones de energización del transformador de potencia, utilizando específicamente la *Transformada Wavelet Estacionaria (Real-Rime Boundary Stationary Wavelet Transform)*.

Sin embargo, las redes neuronales requieren no solo entrenamiento previo a su utilización, sino que en caso de no contar con entrenamiento para condiciones específicas o, en caso de ocurrencia de un evento atípico que se encuentre fuera de los con-

siderados en dicho entrenamiento, podría obtenerse una discriminación no adecuada. Por otro lado, la aleatoriedad que genera la selección de la función madre de la *Transformada Wavelet*, debido a la amplia disponibilidad de funciones, permiten introducir limitantes o puntos de falla en caso de seleccionar una función madre no adecuada para el transformador a proteger. Adicionalmente, la mayoría de casos observados en la literatura científicas se centran en el análisis de condiciones fijas o específicas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el método desarrollado en el presente estudio propone la discriminación entre corrientes de energización y corriente de falla interna, utilizando la unión de dos herramientas importantes en el análisis de señales eléctricas: la *Transformada Wavelet* orientada al análisis frecuencial y, las *O-Splines*, que permiten la construcción de un banco de filtros para la transformada a partir de traslaciones enteras de la *O-Spline* de frecuencia fundamental, permitiendo buenos resultados con el algoritmo de la *DWT*, al considerarse dicha *O-Spline* como función escalante y obtener las correspondientes onduletas como una simple modulación.

Se incorpora además en este estudio, a través de las *O-Splines*, la adaptabilidad del método propuesto, de manera que este sea independiente de las características del sistema de potencia y de transformador protegido incrementando su versatilidad y aplicabilidad.

1.6. Estructura de la tesis

A continuación se presenta la estructura bajo la cual se desarrolla y presenta en esta tesis el método de discriminación desarrollado:

Capítulo 1 - Introducción: Contiene las bases que dan lugar y sustentan el desarro-

llo del método de discriminación, estas son: Justificación, Planteamiento del Problema e Hipótesis, así como los Objetivos establecidos para lograr obtener dicho método. Posteriormente los Antecedentes, donde se describen algunos de los métodos de discriminación relevantes y, finalmente, se presenta la estructura de la tesis.

Capítulo 2 - *El Transformador de Potencia*: Se presenta en este capítulo la base teórica del transformador que incluye su modelo eléctrico, así como la base teórica de las corrientes de energización. Se presentan tipos de fallas eléctricas y se describe el principio de funcionamiento de la función diferencial de transformador.

Capítulo 3 - *Simulación y Procesamiento Digital de Señales*: Se presenta en este capítulo el modelo del sistema de potencia utilizado para la simulación de los eventos y la generación de las señales de corriente; así mismo, se describen las herramientas matemáticas utilizadas en el procesamiento de estas señales de corriente y a través de las cuales se obtiene el método de discriminación objeto de la presente tesis.

Capítulo 4 - *Discriminación de Corrientes de Energización*: Dado que el método de discriminación desarrollado une dos de las herramientas matemáticas presentadas en el capítulo previo, en este se describe dicha unión, así como el algoritmo implementado para el análisis y discriminación de las corrientes de energización y el bloqueo de la función diferencial de transformador.

Capítulo 5 - *Resultados y Análisis de Resultados*: Con el algoritmo de discriminación desarrollado, se presentan en este capítulo los resultados obtenidos de aplicar este algoritmo a las señales obtenidas a partir de simulación, inicialmente presentando un resultado por tipo de evento y, finalmente, un resumen global de aplicar dicho algoritmo a los cerca de 1000 casos simulados.

Capítulo 6 - *Conclusiones*: Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la implementación y desarrollo del método de discriminación y se presentan,

además, los trabajos futuros a desarrollar para complementar este método.

Capítulo 2

El Transformador de Potencia

Dado que el método de discriminación desarrollado en la presente tesis se aplica a la protección diferencial del transformador de potencia, se presenta en este capítulo la base teórica del transformador, iniciando con el modelo eléctrico ideal, para posteriormente presentar su modelo eléctrico real; igualmente se presenta la base teórica de las corrientes de energización, complementando posteriormente con tipos de fallas eléctricas y, finalmente se describe el principio de funcionamiento de la función diferencial de transformador.

2.1. Introducción al Transformador de Potencia

El transformador de potencia está compuesto por un núcleo de acero laminado típicamente rectangular en el cual se instalan mínimo dos arrollamientos, devanados o bobinas de cables conductores separados eléctricamente pero acoplados magnéticamente a través del núcleo laminado. Por medio de este arreglo, es posible transportar energía a través de los arrollamientos, con una eficiencia normalmente superior al 97 %.

Debido a este núcleo de acero laminado, siempre que se realice la energización del transformador o su conexión eléctrica al sistema de potencia, se generarán corrientes de energización o corrientes *Inrush* únicamente en el devanado sobre el cual se está realizando la conexión; estas corrientes están asociadas con la magnetización de dicho núcleo y, aunque poseen una forma de onda característica y definida, dependiendo de las características del sistema de potencia al cual se conecte, así como de las características constructivas del núcleo metálico, variará para cada transformador tanto en magnitud como en duración.

Respecto del sistema de potencia, el transformador se encuentra instalado en cada una de las etapas, desde generación, hasta el usuario final, pasando por transmisión, subtransmisión y distribución de energía eléctrica, dado que este permite llevar los niveles de tensión a los valores óptimos en cada una de las etapas, como altos valores (220 kV o superior) en transmisión de energía entre grandes áreas geográficas, de manera que se minimicen las pérdidas por conducción de corriente; valores de tensión intermedios (35 kV a 110 kV) para subtransmisión y valores de baja tensión (1 kV o menos) para consumo final y alimentación de industrias con procesos que incluyen motores y diferentes tipos de maquinaria, o cargas en instalaciones residenciales que requieren niveles de tensión bajos.

Cabe destacar que este elemento tiene un elevado costo, tanto de construcción como de reparación, respecto de los demás elementos, llegando incluso en caso de grandes transformadores, a ser mayor el costo de su reparación que los costos operativos asociados con su desconexión. De allí la importancia de contar con una protección que garantice el despeje instantáneo y *confiable* de fallas internas (que no se realice el bloqueo de la protección al momento de fallas internas) y que permita su conexión al sistema tras su energización.

2.2. Modelo Eléctrico del Transformador

En la Figura 2.1 [15] [16] se presenta el arreglo del transformador monofásico ideal de dos devanados, teniendo en cuenta que se llama *modelo ideal* debido a que se asume: la permeabilidad del núcleo, μ , del acero es infinita; todo el flujo establecido en el núcleo se encuentra dentro del mismo núcleo, es decir, no existe flujo disperso y que todas las pérdidas eléctricas se consideran despreciables [15] [16].

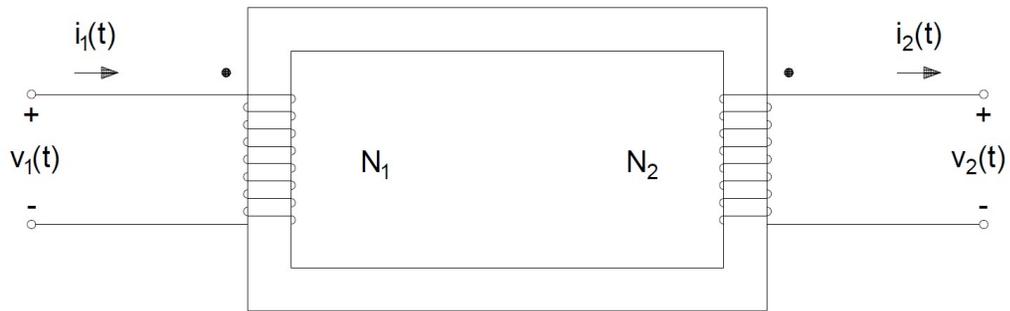


Figura 2.1: Transformador monofásico ideal.

Así, con base en el arreglo de la figura y teniendo en cuenta la *Ley de Inducción de Faraday* que establece que la tensión inducida en un circuito es directamente proporcional al cambio en el tiempo del flujo magnético que lo atraviesa, se obtiene para el devanado primario:

$$v_1(t) = e_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Y para el devanado secundario:

$$v_2(t) = e_2(t) = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Siendo N_i el número de vueltas o espiras de cada bobina, $\phi(t)$ el valor instantáneo del flujo magnético establecido en el núcleo, $v_i(t)$ la tensión en terminales del transfor-

mador, igual a la tensión inducida en la bobina, $e_i(t)$, debido a las condiciones ideales asumidas. Así, igualando el cambio del flujo magnético de las ecuaciones 2.1 y 2.2, se obtiene la relación entre las tensiones en bornes del devanado primario y secundario, a , correspondiente a la relación de transformación en placa del transformador:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.3)$$

De igual manera, con base en la *Ley de Ampere*, que establece que la intensidad de campo magnético, H , en un contorno cerrado, es directamente proporcional a la corriente neta que circule a través de este y con base en el arreglo del transformador presentado, se obtiene la relación entre las corrientes de los devanados:

$$\oint H \cdot dl = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (2.4)$$

Esta integral, alrededor de un camino cerrado, se hace cero debido a las consideraciones ideales establecidas, bajo las cuales el flujo magnético en el núcleo permanece invariante ante la presencia de carga en alguno de los devanados, por tanto:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (2.5)$$

Despejando se obtiene:

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.6)$$

El modelo circuital que representa el comportamiento eléctrico del transformador ideal presentado, se observa en la Figura 2.2 [15] [16].

Como puede observarse, este modelo considera la relación entre las tensiones y corrientes entre los devanados del transformador, pero no permite representar las no li-

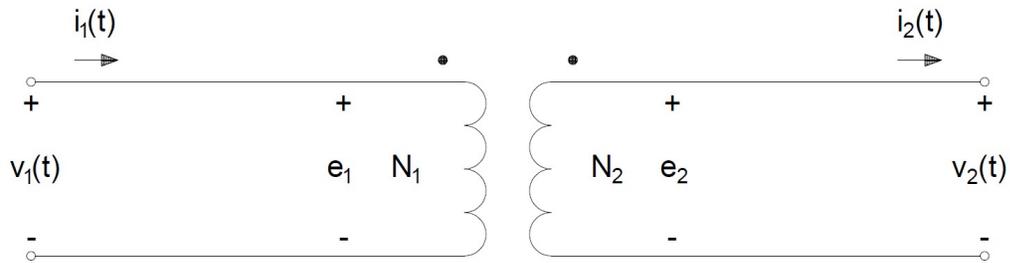


Figura 2.2: Modelo circuital del transformador monofásico ideal.

nealidades presentes en el núcleo ferromagnético, por tanto, es necesario presentar el comportamiento y el modelo real del transformador. Este es similar hasta cierto punto al transformador ideal, pero las consideraciones iniciales no aplican en el transformador real, por tanto: la permeabilidad del núcleo, μ , es finita; el flujo magnético no se encuentra completamente confinado en el núcleo, es decir, existe dispersión, por lo que el flujo a través de una de las bobinas puede ser diferente del flujo a través de las demás; se incluyen pérdidas por conducción y pérdidas debido al cambio del flujo magnético en el núcleo.

Para su análisis se utiliza el diagrama de la Figura 2.3 [15] [16], similar al utilizado para el transformador ideal. En este caso se alimenta el devanado primario con una fuente de tensión AC mientras que el devanado secundario se encuentra abierto. Ante dicha alimentación, se establece una corriente mínima de estado estable, que permite mantener el flujo magnético en el núcleo del transformador. Así mismo, se observa la característica no lineal del núcleo ferromagnético, representada a través de una curva de histéresis de flujo, ϕ , vs. fuerza magnetomotriz, $N \cdot i$.

Se parte de la *Ley de Faraday*, para la tensión inducida en la bobina: $e_{ind} = d\lambda/dt$, de esta manera, de acuerdo con la *Ley de Voltajes de Kirchoff*, se pueden obtener los

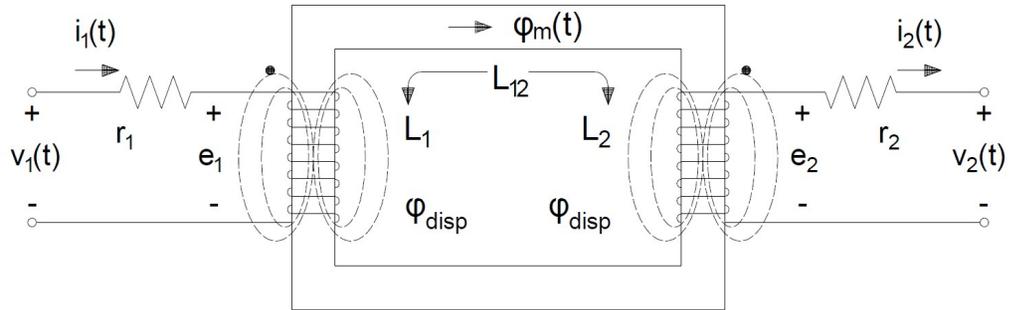


Figura 2.3: Transformador monofásico real.

voltajes en terminales del transformador:

$$v_1 = r_1 i_1 + e_1 = r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (2.7)$$

$$v_2 = r_2 i_2 + e_2 = r_2 i_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (2.8)$$

A partir de lo anterior es posible llegar a la representación circuital que más se aproxima al comportamiento del transformador real, que incluye en medio el modelo de transformador ideal. Este se presenta en la Figura 2.4 [15] [16].

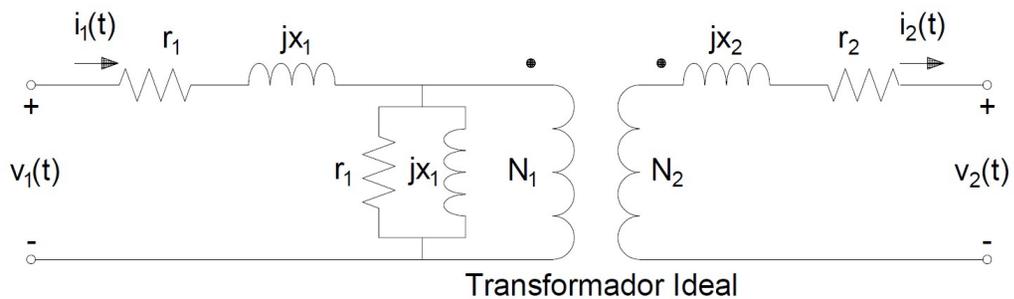


Figura 2.4: Modelo circuital del transformador monofásico real.

En caso de energización del transformador en vacío, la ecuación 2.9 se reduce debi-

do a la ausencia de la corriente del devanado secundario, existiendo aún una corriente en el devanado primario asociada con la corriente de magnetización del núcleo:

$$v_1 = r_1 i_\phi + e_1 \quad (2.9)$$

Adicionalmente, teniendo en cuenta que en grandes transformadores, la resistencia de pérdidas en vacío es prácticamente despreciable, el voltaje en terminales, v_1 , puede aproximarse al voltaje inducido, e_1 . De esta manera, al alimentar el devanado primario con una onda cosenoidal, $v_1 = V_{MAX} \sin(\omega t)$, a partir de la ecuación 2.1 se obtiene el flujo magnético en el núcleo:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{N_1} \int v_1(t) dt = \frac{1}{N_1} \int V_{MAX} \sin(\omega t) dt \\ \phi &= \frac{V_{MAX}}{\omega N_1} \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

El comportamiento de este flujo magnético está directamente relacionado con el comportamiento de la corriente de magnetización del transformador, teniendo en cuenta la curva de magnetización del núcleo, como puede observarse en la Figura 2.5 [15] [16].

2.3. Corrientes de Energización

En el momento de una energización, si se asume el caso crítico de aplicación de tensión sinusoidal, tras la solución de la integral en la ecuación 2.10 sobre un intervalo de 0 a π , el flujo magnético en el núcleo iniciará en fase con la tensión, lo que ocasionará un incremento del flujo durante medio ciclo de la onda de tensión, llegando este flujo a un valor del doble del valor pico de estado estable y, 2ϕ , [17] por consiguiente,

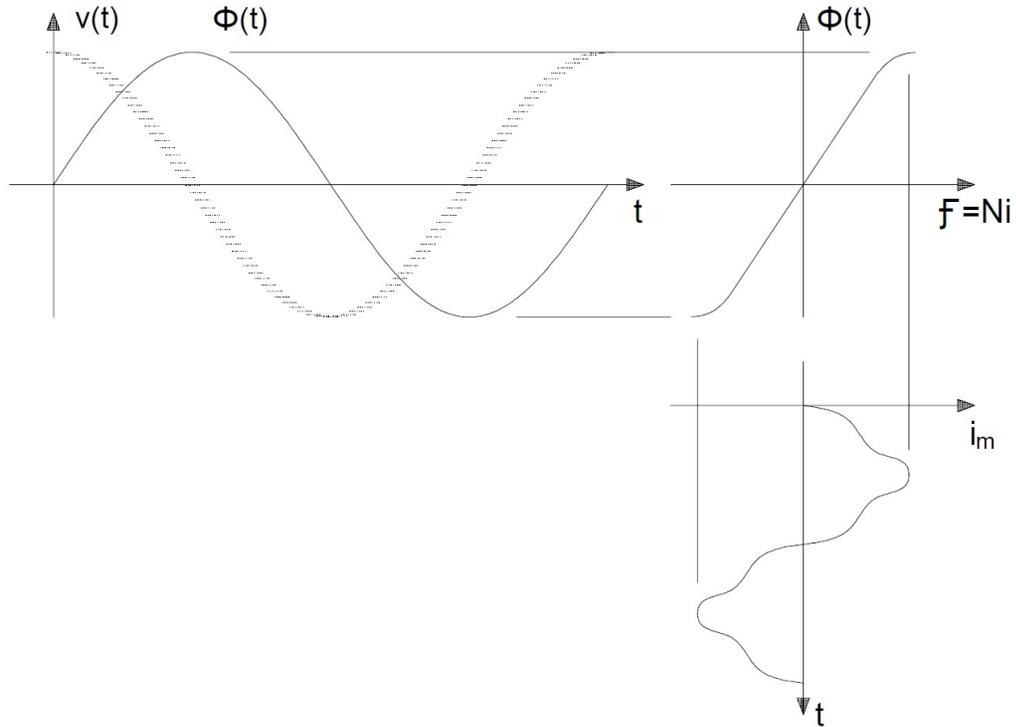


Figura 2.5: Curva de magnetización del núcleo del transformador.

entrando en la zona de saturación de la curva de magnetización. Para lograr establecer dicho flujo, se requiere una corriente de excitación elevada [17], como se observa en la Figura 2.6 [15] [16]. Es importante aclarar que como lo menciona Blackburn en [17], el transformador opera cerca al punto de saturación, de manera que cualquier valor superior al flujo esperado en el núcleo, resulta en altos valores de corrientes de excitación y, mayor aún, si el transformador posee flujo remanente.

De esta imagen se observa que la forma de onda de dicha señal no corresponde a una señal puramente sinusoidal, sino que está compuesta por componentes de alta frecuencia generadas por la saturación del núcleo ferromagnético. El pico de dicha corriente, puede llegar incluso a valores de hasta 10 veces la corriente nominal del transformador, dependiendo el punto en la onda de tensión en el cual se energice, las carac-

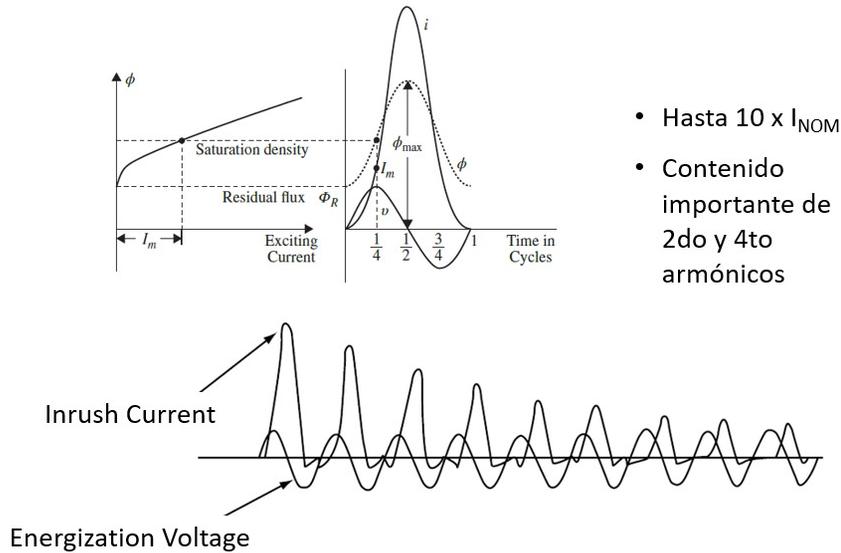


Figura 2.6: Forma de onda de corriente de energización de transformador.

terísticas constructivas del transformador y, además, el flujo magnético residual presente en el núcleo al momento de la energización. Teniendo en cuenta esto, dicha corriente variará entre transformadores, tanto en amplitud, como en duración y en contenido armónico e incluso para un mismo transformador, podría variar dependiendo las condiciones del sistema de potencia en el momento de energización.

De acuerdo con *Anderson* [18], algunas de los factores que determinan las características de la forma de onda de la corriente *Inrush* son:

- Potencia del transformador
- Características del sistema de potencia como nivel de tensión, nivel de cortocircuito, relación X/R
- Materiales constructivos del núcleo del transformador
- Condiciones magnéticas del núcleo, como flujo residual

- Transformadores en paralelo

2.4. Fallas en el Transformador de Potencia

A continuación se describen los posibles tipos de fallas en el transformador, las cuales se dividen principalmente en Externas e Internas [2], [18].

- **Sobrecargas:** afectan directamente el aislamiento del transformador y disminuyen su vida útil. Típicamente se utiliza protección por sobrecorrientes con curvas de tiempo inverso que permiten sobrecargas de entre el 130% y el 150%. Algunos dispositivos de protección permiten directamente la función de sobrecarga térmica con una curva de tiempo inverso aunque, en la práctica, es normal que dicha función actúe como alarma.
- **Sobretensiones:** estas se traducen en flujo excesivo en el núcleo del transformador incrementando las pérdidas, lo que incrementa la corriente de magnetización o de excitación, incrementando la temperatura del núcleo y los devanados internos, comprometiendo directamente el aislamiento del mismo núcleo así como de los devanados del transformador.
- **Bajas Frecuencias:** genera como consecuencia la misma condición descrita para sobretensiones. Es de especial cuidado la relación entre la tensión y la frecuencia: *Volts / Hertz*, que puede resultar severa para el transformador en caso de exceder valores fuera del rango del 10%.
- **Cortocircuitos Externos:** aunque el transformador está diseñado para soportar por determinado tiempo este tipo de eventos, que dependen de la impedancia de

cortocircuito del transformador y las relaciones X/R del sistema de potencia, estas corrientes pueden generar estrés mecánico en los devanados así como sobrecalentamiento y posterior deterioro del aislamiento. Estos eventos se protegen mediante curvas de sobrecorriente, buscando tiempos de operación adecuados respecto de coordinación con protecciones adyacentes y respecto de la curva de daño térmico del transformador.

■ **Fallas Incipientes:**

- **Sobrecalentamiento:** el sobrecalentamiento compromete directamente la integridad del aislamiento del transformador. Se utilizan diferentes funciones de protección para cubrir eventos externos y, además, se puede contar con un sistema de enfriamiento de acuerdo con la potencia que se encuentre entregando.
- **Sobreflujo:** en caso de no contar con protección adecuada, pueden llevar tanto al daño en el aislamiento de los devanados, como en el aislamiento del mismo núcleo.
- **Sobrepresión:** generado por la acumulación de gases en el aislamiento interno del transformador debido a calentamiento focalizado generado por fallas internas. Se cuenta con relés de sobrepresión que monitorean la acumulación de gases en el aislamiento.

■ **Fallas Activas:**

- **Cortocircuitos en Terminales:** aplica lo mencionado para los cortocircuitos externos, con la diferencia que en este tipo de eventos, se genera la operación de la función de protección principal: diferencial de transformador, detallada en la sección 2.5. Este tipo de evento comprende entre el 50% y el 60% de las fallas.

- **Cortocircuitos entre Espiras:** genera la circulación de elevadas corrientes de corto en la sección cortocircuitada, sin embargo, su magnitud en terminales puede llegar a ser suficientemente baja para ser indetectable por los elementos de protección por sobrecorriente o sobrecarga.
- **Fallas en el Núcleo:** fallas que involucren sobreflujo o sobrecalentamiento en el núcleo del transformador pueden deteriorar o comprometer la integridad del aislamiento de las láminas que lo comprenden. Este tipo de evento tiene un porcentaje de ocurrencia inferior al 15%.
- **Fallas en el Tanque:** ocasionadas por fallas en los sistemas de enfriamiento, como pérdida de flujo de aceite o fallo en el sistema de ventiladores, que generan el incremento de temperatura y compromiso del aislamiento interno. Este tipo de evento tiene un porcentaje de ocurrencia inferior al 15%.

2.5. Protección Diferencial de Transformador

Para cada una de las fallas descrita, se cuenta con funciones de protección generales o dedicadas, de manera que se realice la rápida desconexión del transformador, dependiendo del tiempo permisible de la falla y el tipo de evento, variando incluso su principio de funcionamiento entre fallas incipientes y fallas activas como el caso del relé *Bucholtz* para fallas por sobrepresión o el caso de relés de sobrecorriente para cortocircuitos externos.

De esta manera, en la práctica, la función de protección principal y más utilizada debido a la rapidez de operación además de la adecuada sensibilidad, selectividad y confiabilidad, para las fallas activas de la sección 2.4, corresponde a la función de protección diferencial de transformador, código ANSI 87T, [2] [17] encargada de detectar fallas internas en el transformador, desde cortocircuitos en terminales hasta cierto por-

centaje de fallas entre espiras.

De acuerdo con estándares internacionales, esta función de protección se recomienda implementar en transformadores con potencias iguales o superiores a 10 MVA, teniendo en cuenta lo mencionado en [17]: "la clave está en la importancia del transformador en el sistema de potencia".

2.5.1. Principio de Funcionamiento y Característica

Como su nombre lo indica, su principio de funcionamiento se basa en la diferencia de corrientes siguiendo la *Ley de Corrientes de Kirchoff*, que establece que la corriente que entra en un nodo, es igual a la corriente que sale del nodo. Este mismo principio se aplica específicamente al elemento protegido por la función diferencial que, para el caso de estudio, corresponde al transformador de potencia, por tanto, la corriente que entre en el transformador, debe ser igual a la corriente que sale de este. Esto se ejemplifica gráficamente en la Figura 2.7 [17] [2].

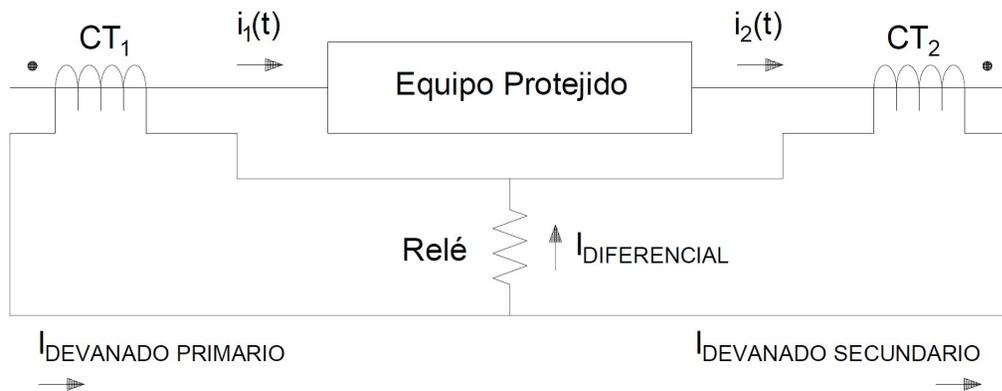


Figura 2.7: Principio de funcionamiento de la función diferencial de transformador.

La medida que llega a la protección diferencial es tomada por sensores, i.e. como

elemento fundamental en cualquier función de protección basada en corrientes, se cuenta en ambos devanados del transformador con transformadores de corriente o CTs (*current transformers*), cuya finalidad es disminuir los valores de corriente del sistema de potencia (corrientes primarias) a valores adecuados y soportados por los dispositivos de protección o relés (corrientes secundarias).

Como principio básico de operación, la función de protección diferencial responde a la suma vectorial de las corrientes en cada uno de los devanados del transformador, que para el caso de un transformador de dos devanados se expresa como:

$$I_{DIFF} = abs(\vec{I}_{DEVANADO PRIMARIO} + \vec{I}_{DEVANADO SECUNDARIO}) \quad (2.11)$$

Cabe mencionar que las corrientes secundarias que ingresan al relé en cada devanado se procesan previa e internamente en el dispositivo de protección (procesamiento digital de señales) de acuerdo con estimación fasorial mediante la *Transformada de Fourier* del *coseno* y el *seno*, filtros que extrae la parte real e imaginaria, respectivamente, de la componente de frecuencia fundamental de la señal de corriente de entrada a partir de las cuales se obtienen la magnitud y el ángulo de las componentes fasoriales. Así, la corriente diferencial se obtiene únicamente para la componente de 60 Hz.

De lo anterior se puede observar que la zona de protección se encuentra definida por los transformadores de corriente. Cualquier falla dentro de estos, se considera interna para la protección diferencial y cualquier falla fuera de esta zona será externa para la protección diferencial. Cabe destacar que es de vital importancia la polaridad de los transformadores de corriente en la implementación de la función de protección diferencial y su adecuado funcionamiento. De esta manera, si la corriente está asociada con un evento externo sea una falla o una condición de operación normal, asumiendo un

desfase angular de 180° , la corriente diferencial será $I_{DIFF} = I_{DEV.PRIM} - I_{DEV.SEC} \approx 0$, con valores típicamente alrededor del 10% debido a las pérdidas y los errores en las medidas de los transformadores de corriente. Si por el contrario se trata de un evento interno, la corriente diferencial será la suma de las corrientes, generándose una diferencia que activará a la función de protección y la desconexión del transformador de potencia del sistema que lo alimente.

Cuando el relé de protección del transformador detecta, a través de la función diferencial, una falla interna, se genera la activación o cierre del contacto de salida del relé programado para tal fin, asociado con el comando de apertura del interruptor que conecte el transformador al sistema de potencia. De acuerdo con esto, como característica fundamental, se debe cumplir que la función de protección diferencial [18]:

- No debe activarse ante operación normal o eventos de falla externos.
- Debe activarse ante fallas eléctricas internas, generando por consiguiente, la apertura del interruptor y posterior desconexión del transformador.
- Para el evento principalmente relevante en el desarrollo de esta tesis, correspondiente a la energización del transformador, debido al comportamiento de las corrientes, se generará la activación de la función, por lo tanto, deberá realizarse el **bloqueo** de la función de manera que, aunque esta se active, no se realice la operación del contacto de salida correspondiente y, de esta manera, no se generen comandos de apertura del interruptor asociado con el transformador.

En caso de presentarse eventos externos con valores de corrientes elevados, las pérdidas y errores mencionados tienden a incrementarse, además de problemas adicionales, esto se detallan en la sección 2.5.2, por tanto, se requiere la supervisión del valor de corriente diferencial de manera que no se generen operaciones o activaciones de

la función ante condiciones externas al transformador de potencia. Esto en la práctica como método más utilizado, se realiza en conjunto con la corriente de restricción y una característica de operación porcentual mediante la cual se logra “alta sensibilidad para fallas internas con alta seguridad para fallas externas” [17]. Dicha característica, con las corrientes asociadas y las zonas respectivas, se presenta en la Figura 2.8.

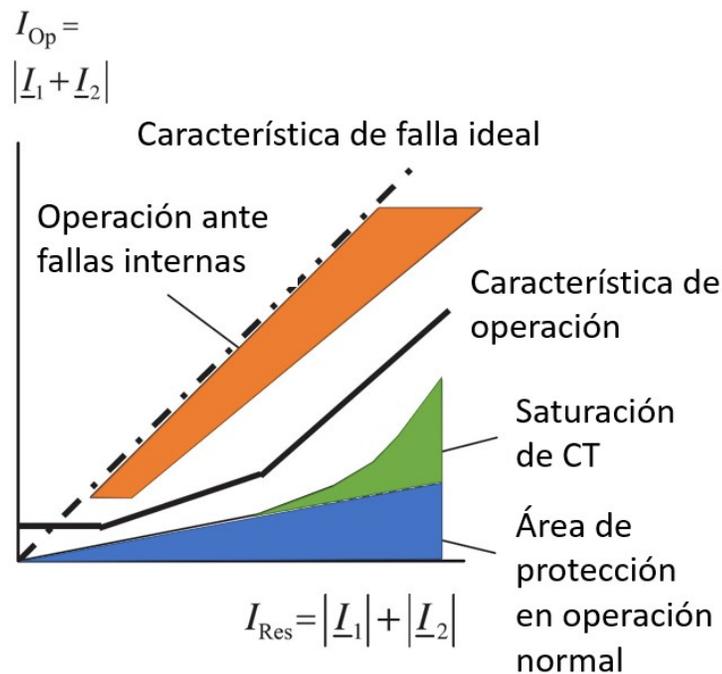


Figura 2.8: Característica de operación de función diferencial de transformador.

2.5.2. Operación Errónea de la Función Diferencial

Aunque la función de protección diferencial, gracias a su principio de funcionamiento, logra discriminar de manera confiable los diferentes eventos en el transformador, existen situaciones bajo las cuales se pueden llegar a presentar operaciones indeseadas, tanto de operación de la función ante condiciones normales de operación,

como de bloqueos ante fallas internas, los cuales, para su análisis, se pueden dividir principalmente en dos grupos: de acuerdo con las condiciones o características propias del sistema de potencia incluyendo el mismo transformador y que se encuentran siempre presente en la operación de la función y, de acuerdo con eventos temporales o transitorios en el sistema de potencia que generan diferencias en las corrientes involucradas en la protección.

2.5.2.1. Condiciones Operativas Inherentes al Sistema de Potencia

- **Errores en medida de CTs:** una de los parámetros que definen a los transformadores de corriente, además de la relación de transformación, corresponde a la clase de precisión acorde a la norma bajo la cual se haya especificado (*IEC* o *ANSI-IEEE*). Esta clase de precisión indica el error máximo garantizado dependiendo del nivel de corriente a través del mismo, sea de carga ante condiciones normales de operación que puede estar alrededor del 3% de la corriente nominal, o de falla ante corcotircuitos, con valores de 5% o 10% de la corriente nominal. Este tipo de condiciones se cubre seleccionando adecuadamente el arranque de la función diferencial, parámetro $I_{DIFF PICKUP}$ de la Figura 2.8, con un valor superior a la suma de todos los posibles errores en la medida, tomando típicamente el error del CT ante condición de falla.
- **Diferencias en magnitud de corrientes:** debido a las diferencias en las relaciones de transformación de los CTs, así como la diferencia en los niveles de tensión de cada devanado (equivalente a diferencia en magnitudes de corrientes en cada devanado como se presentó en la sección 2.2), se generan diferencias en las magnitudes de las corrientes secundarias de cada devanado al ingresar al relé, por tanto, los fabricantes incorporan un factor multiplicativo de compensación, además las corrientes utilizadas en la ecuación 2.11 se ingresan en *por unidad* o

$p.u.$ que no es mas que dividir la corriente por un valor base para cada devanado que típicamente corresponde a la corriente nominal del transformador en cada devanado. Lo anterior se realiza con el fin de obtener valores de corriente comparables. Un ejemplo de factor de compensación se da a continuación, partiendo de las corrientes primarias presentadas en la Figura 2.7:

$$\begin{aligned}
 I_{w1 \text{ pu}} &= \frac{I_{w1}}{I_{nom \ w1}} [p.u.] \\
 I_{w2 \text{ pu}} &= \frac{I_{w2}}{I_{nom \ w2}} [p.u.] \\
 I_{w1 \text{ sec pu}} &= \frac{I_{w1 \text{ pu}}}{RCT_{w1}} [p.u.] \\
 I_{w2 \text{ sec pu}} &= \frac{I_{w2 \text{ pu}}}{RCT_{w2}} [p.u.] \\
 I_{w1 \text{ sec pu comp}} &= I_{w1 \text{ sec pu}} \cdot \frac{kV_{w1} RCT_{w1}}{kV_{ref} RCT_{ref}} \\
 I_{w2 \text{ sec pu comp}} &= I_{w2 \text{ sec pu}} \cdot \frac{kV_{w2} RCT_{w2}}{kV_{ref} RCT_{ref}}
 \end{aligned}$$

Donde $I_{nom \ w1}$ e $I_{nom \ w2}$ corresponden a las magnitudes de los fasores de corrientes nominales primarias del devanado primario y del devanado secundario, respectivamente; I_{w1} e I_{w2} corresponden a las magnitudes de los fasores de corrientes primarias en del devanado primario y del devanado secundario, respectivamente; $I_{w1 \text{ sec pu}}$ e $I_{w2 \text{ sec pu}}$ corresponden a las magnitudes de los fasores de corrientes secundarias del devanado primario y del devanado secundario, respectivamente; RCT_{w1} y RCT_{w2} corresponden a las relaciones de transformación de los transformadores de corriente del devanado primario y del devanado secundario, respectivamente y kV_{w1} y kV_{w2} corresponden a las tensiones nominales del transformador de potencia en el devanado primario y secundario, respectivamente. Cabe recordar que: $I_{w2} = a \cdot I_{w1}$, siendo a la relación de transformación del transformador de potencia protegido por la función de protección

diferencial. Al final se obtendrán los valores de corriente compensados en magnitud a ingresar en la ecuación 2.11, $I_{w1 \text{ sec pu comp}}$ y $I_{w2 \text{ sec pu comp}}$ las cuales, en caso de despreciar errores en medidas, tendrán magnitudes idénticas.

- **Desfase angular:** de acuerdo con la configuración o conexión de los devanados del transformador de potencia en transformadores trifásicos, cuando existen devanados en *Delta* se genera un desfase angular debido a la suma de corrientes al interior de la conexión en *Delta*. Estas configuraciones se conocen como *Grupo Horario* del transformador y establece el desfase angular exacto existente entre las corriente de los devanados primarios y secundarios.

A modo de ejemplo, un grupo horario común corresponde a *Dyn5*, indicando que el devanado primario se encuentra en conexión *Delta*, el secundario en conexión *Y* o *estrella* con neutro aterrizado y el desfase angular será 5, teniendo en cuenta que este número corresponde a múltiplos de 30° , es decir, el desfase angular del grupo horario de ejemplo corresponde a 150° .

De esta manera, los fabricantes de relés realizan diferentes tipos de operaciones matemáticas mediante matrices o simplemente restando o sumando el ángulo requerido para compensar dicho desfase angular, teniendo en cuenta que el desfase es un parámetro de entrada en los ajustes del dispositivo a través del grupo horario, de manera que se compense adecuadamente el desfase.

- **Corriente de secuencia cero:** Al momento de presentarse fallas a tierra externas a la protección diferencial en el lado del devanado con conexión en *Y*, circulará por este una corriente de secuencia cero que no existe en los devanados en *Delta* [15], por tanto, existirá una diferencia en las corrientes involucradas en el cálculo de corriente diferencial de la ecuación 2.11. Debido a esto, en la práctica se mide directamente o se calcula esta componente de secuencia cero y se resta de la corriente fundamental de dicho devanado en *y*, de manera que se elimine la causa

de la diferencia.

- **Cambiador de tomas:** al momento de utilizar un *TAP* diferente del base (asociado con la relación de transformación), se genera igualmente un cambio en la magnitud de corriente del devanado con cambiador de tomas, que conlleva a diferencias en las corrientes de la función diferencial. Estas diferencias tienden a ser mínimas dado que los cambios en cada paso o *TAP* están entre el 2% y el 3% de la tensión nominal, por lo que esta diferencia es fácilmente tenida en cuenta desde el momento del cálculo de ajustes de la característica de operación de la función de protección diferencial, restando sensibilidad a la función con ajustes incrementados levemente, de manera que el transformador pueda operar en cada *TAP* sin riesgo de actuación de la función.

2.5.2.2. Eventos en el Sistema de Potencia

- **Corriente de energización:** tal y como se mencionó en la sección 2.3, debido al comportamiento del flujo magnético en el núcleo del transformador que involucra la zona de saturación de la característica de magnetización, fluye únicamente a través del devanado primario una corriente de magnetización, energización o *Inrush* “sin corriente equivalente en el devanado secundario” [2] que genera la activación de la función de protección diferencial. Se recuerda que esta corriente está compuesta principalmente por componentes de 2^{do} y 4^{to} armónicos, siendo relevante el contenido de 2^{do} armónico.
- **Sobreexcitación:** el tener sobreexcitación implica una mayor cantidad de flujo magnético circulando en el núcleo del transformador, igualmente entrando en la zona de saturación de la característica de magnetización, incorporando componentes de 3^{ro} y 5^{to} armónicos en la corriente del devanado primario y generando, por consiguiente, diferencias con la corriente del devanado secundario.

- **Saturación de CTs:** ante presencia de cortocircuitos externos con valores muy altos de corrientes de falla, o cuando el sistema al cual se encuentra conectado el transformador posee valores en la relación X/R que introducen una componente significativa de DC en la corriente de falla, se puede llegar a ocasionar la saturación de alguno de los transformadores de corriente asociados con la protección diferencial, situación bajo la cual la señal de corriente en el lado secundario del CT no corresponde fielmente a la corriente primaria, por tanto, las corrientes secundarias que ingresan a la ecuación de cálculo de corriente diferencial, tendrán diferencias de acuerdo con el grado de saturación presente.

En cierta parte, este tipo de eventos se encuentra cubierto por la misma característica de operación de la función diferencial. La zona bajo la segunda pendiente de la característica, como se observa en la Figura 2.8, tiene un mayor rango de bloqueo de manera que puedan incluirse casos de saturación de CTs, donde se tienen altos valores de corriente de restricción y, debido a la saturación presente, niveles importantes de corriente diferencial.

A diferencia de los casos mencionados en la sección 2.5.2.1 generados por condiciones propias del sistema, que se compensan fácilmente a través de factores o matrices y operaciones matemáticas básicas, los casos ocasionados por eventos temporales o transitorios requieren algoritmos más complejos con el fin de lograr una adecuada discriminación de estos eventos y tomar, posteriormente, las medidas necesarias.

2.5.3. Bloqueo de la Función Diferencial ante *Inrush*

De acuerdo con lo mencionado en las secciones 2.3 y 2.5.2.2, la corriente *Inrush* logra generar una diferencia de corrientes suficiente para lograr la activación de la fun-

ción de protección diferencial, ocasionando la desconexión inmediata del transformador e impidiendo su energización. Por tal motivo se requiere bloquear, restringir o retardar (entre otros) [2] [18] la función diferencial, de manera que se logre la energización del transformador y la función diferencial se mantenga activa y operativa en caso de ocurrencia de fallas internas durante la energización.

Debido a que la corriente de energización podría durar segundos, dependiendo de las condiciones mencionadas en la sección 2.3, incluir retardos no es conveniente a la hora de proteger el transformador en caso de fallas internas que puedan llevar a la destrucción del transformador, por tanto, este método no es utilizado [2].

En la práctica, el método más común corresponde a la restricción de la característica ante contenido de 2^{do} armónico principalmente, aunque en algunos casos cuenta con verificación de contenido de 4^{to} armónico, consecuente con la posición de *Blackburn* [17], utilizarlo incrementa la seguridad de la restricción. De esta manera, se establece un umbral a partir del cual se restringe la operación de la función diferencial, teniendo en cuenta que, de acuerdo con *Anderson* [18], el mínimo contenido de 2^{do} armónico fue alrededor del 23%, luego de realizar diferentes pruebas de corrientes de energización en transformadores. De esta manera y acorde a prácticas de protección típicas, umbrales alrededor del 15% son utilizados.

Sin embargo, de acuerdo con lo establecido en la sección 1.2.2, este método de bloqueo puede presentar operaciones erróneas bajo determinadas condiciones del sistema de potencia, por lo que es materia de investigación el encontrar una técnica de bloqueo o restricción que brinde mayor confiabilidad en la operación de la función.

Capítulo 3

Simulación y Procesamiento Digital de las Señales

En este capítulo se presenta el modelo del sistema de potencia utilizado para la simulación de los eventos y la generación de las señales de corriente; así mismo, se describen las herramientas matemáticas utilizadas en el procesamiento de estas señales de corriente y a través de las cuales se obtiene el método de discriminación.

3.1. Modelo del Sistema de Potencia

Con el propósito de analizar diferentes casos de estudio, es importante la adquisición de señales, las cuales serán posteriormente procesadas por la metodología propuesta en esta tesis. Para esto, se modela el sistema de prueba presentado en la Figura 3.1 en la herramienta computacional especializada PSCAD. Este se encuentra compuesto por una fuente de tensión ideal en serie con una impedancia equivalente que representa el sistema al cual el transformador se encuentra conectado; este tendrá una relación X/R determinada y un nivel de cortocircuito específico de acuerdo con las características del sistema reducido. Se observa igualmente el transformador de potencia

saturable bajo análisis así como, los transformadores de corriente necesarios para obtener los valores secundarios de las corrientes. La herramienta computacional PSCAD permite la automatización en la simulación de eventos y su exportación en formato de texto *.out*, así como ejecución de código en su interfaz propia en lenguaje *Fortran* para la programación del algoritmo requerido por el modelo de transformador para incluir fallas internas. Este modelo es tomado de [19].

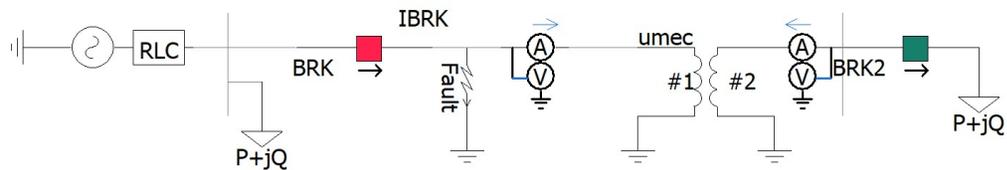


Figura 3.1: Modelo de sistema de potencia en PSCAD.

La información correspondiente al sistema de potencia se presenta en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3, para el transformador, los transformadores de corriente y el equivalente de red, respectivamente.

Tabla 3.1: Datos de Entrada del Transformador de Potencia

Parámetro	Valor
Potencia Nominal	150 MVA
Tensión de Devanado Primario	500 kV
Tensión de Devanado Secundario	230 kV
Impedancia de Cortocircuito a 150 MVA	19 %
Pérdidas	500 kW

Tabla 3.2: Datos de Entrada de los Transformadores de Corriente

Parámetro	Valor
Relación de CTs en Alta Tensión	600A/5A
Relación de CTs en Baja Tensión	1200A/5A
Saturación	N.A.

Tabla 3.3: Datos de Entrada del Equivalente de Red

Parámetro	Valor
Tensión	500 kV
Frecuencia	60 Hz
Resistencia	10 Ω
Inductancia de secuencia positiva	0.1326 H
Capacitancia	0 μ F

La curva de magnetización del transformador, es tomada de [20]:

$$I_{p.u.} = [0, 0, 0.015, 0.03, 0.06, 0.09, 0.12]$$

$$U_{p.u.} = [0, 0.85, 1.2, 1.35, 1.5, 1.56, 1.572]$$

Mediante este modelo se generan catorce eventos diferentes, que abarcan las diferentes condiciones a las cuales puede estar sometido un transformador. Estos eventos tienen las siguientes consideraciones:

- Se generan con un muestreo de 64 muestras por ciclo para una frecuencia fundamental de 60 Hz, acorde a un muestreo típico en los relevadores del mercado.
- Con el fin de verificar el desempeño del método de discriminación propuesto en el presente estudio, se realiza para cada uno de estos eventos, la simulación de diferentes tiempos de inicio de falla, para un total de 70 tiempos diferentes en un

rango de un ciclo de la frecuencia fundamental, es decir, aproximadamente cada $0.238ms$, incluyendo así diferentes comportamientos de la corriente de acuerdo con el valor de tensión al momento del evento, para un total final de casi 1000 casos de simulación.

Tabla 3.4: Eventos definidos para simulación y generación de señales.

Número	Evento	Tipo
1	Falla interna en bornes del transformador	Interno
2	Falla externa en bornes del transformador	Externo
3	Falla interna durante energización con carga	Interno
4	Falla externa durante energización con carga	Externo
5	Energización con carga	Ambos
6	Falla interna durante energización en vacío	Interno
7	Falla externa durante energización en vacío	Ambos
8	Energización en vacío	Interno
9	Falla interna al 25% del devanado secundario	Devanado
10	Falla interna al 85% del devanado secundario	Devanado
11	Corrientes de flujo residual	Interno
12	Corrientes de flujo residual con carga	Ambos
13	Sobreexcitación al 25%	Interno
14	Sobreexcitación al 50%	Interno

3.2. Procesamiento de Señales

Con el fin de utilizar las señales analógicas que ingresan a los dispositivos numéricos de protección o relés numéricos, se realiza la conversión *Análogo a Digital* de dicha señal. Esto permite capturar una señal continua en una secuencia de datos de deter-

minado tamaño que depende del muestreo aplicado a la señal y el ancho de la ventana sobre la cual se realice la conversión.

En la práctica se utilizan un ancho de ventana móvil, típicamente de un ciclo (1 ciclo) de la frecuencia fundamental, como se observa en la Figura 3.2, con la cual se logra dar rapidez en el cálculo y decisión de las funciones de protección. Adicionalmente, muestreos convencionales de 16, 32, 64 y 128 muestras por ciclo de la frecuencia fundamental del sistema de potencia son utilizados en los fabricantes en los relévores del mercado.

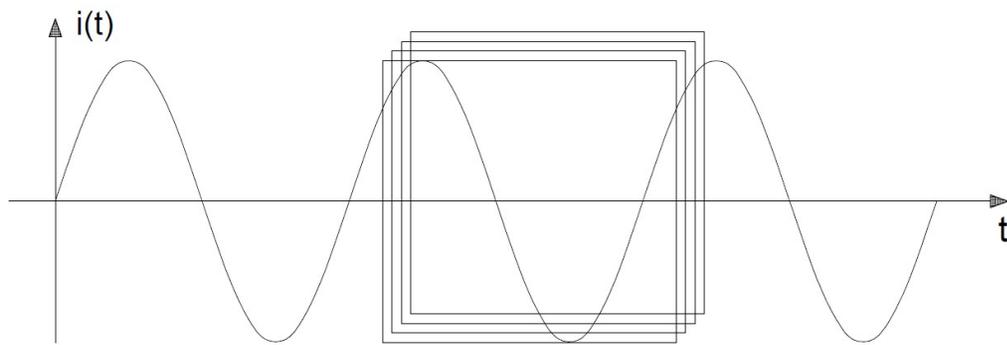


Figura 3.2: Ventana móvil para procesamiento de señales.

El muestreo utilizado determinará la máxima frecuencia detectable por el dispositivo de protección que, de acuerdo con teorema de *Nyquist* corresponde a un medio de la frecuencia de muestreo [21]:

$$f_{max} = \frac{1}{2} f_{muestreo} \quad (3.1)$$

De acuerdo con la ecuación 3.1, si las frecuencias de muestreo convencionales corresponden a 960 Hz, 1920 Hz, 3840 Hz y 7680 Hz, respectivamente, para una frecuen-

cia fundamental de 60 Hz, las máximas frecuencias detectables serán 480 Hz, 960 Hz, 1920 Hz y 3840 Hz, respectivamente.

El procesamiento de señales puede realizarse mediante dos líneas diferentes: espacio continuo y espacio discreto. Pero, debido a las restricciones de *hardware* impuestas por los dispositivos de protección, el procesamiento se realiza en el campo discreto. Sin embargo, se presentará la representación matemática de ambos casos.

3.2.1. Convolución de Señales

Matemáticamente, de acuerdo con *Mallat* [22], la convolución corresponde a una operación (y su resultado) lineal invariante en el tiempo y, para dos funciones $f(t)$ y g , dicha convolución está dada por:

$$g \otimes f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u)g(t-u)du = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u)f(t-u)du \quad (3.2)$$

Conceptualmente, la convolución puede considerarse como la correlación de una de ellas con la reflejada en el tiempo de la otra o, de una manera más simple, puede dar una medida de la existencia de una las dos funciones en la otra (de la función g en la función $f(t)$, por ejemplo), como se verá más adelante en la estimación fasorial en cuyo caso se aplica específicamente la versión discreta, dada por [22]:

$$g \otimes f[n] = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} f[p]g[n-p] \quad (3.3)$$

Siendo f y g secuencias de datos (vectores). Para la estimación fasorial y el tratamiento de datos, la longitud de dichas secuencias de datos está dada de acuerdo con el muestreo y el ancho de la ventana utilizados.

3.2.2. Estimación Fasorial

Los relés de protección operan las funciones de protección asociadas con tensiones y corrientes, a excepción de algunos casos específicos, con señales fasoriales obtenidas a partir de la frecuencia fundamental del sistema de potencia [23] mediante la cual se descompone la señal bajo análisis en una parte asociada con el eje real y una parte asociada con el eje imaginario y a una frecuencia específica. Esto se realiza a través de la *Transformada de Fourier*, la cual está dada, en su forma continua, por [22]:

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.4)$$

$$i = \sqrt{-1}$$

Con esta misma transformada, es posible extraer diferentes componentes armónicas (múltiplos de la frecuencia fundamental) contenidas en la señal analizada.

De acuerdo con la identidad de *Euler* la exponencial de la ecuación anterior, al tener una potencia imaginaria, puede descomponerse como se muestra a continuación:

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) (\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)) dt \quad (3.5)$$

De la ecuación 3.5, es posible descomponer la transformada en el plano imaginario, obteniendo así una componente en el eje real (coseno), f_r , y una componente en el eje imaginario (seno), f_i . Por tanto, es posible reescribirla como se muestra a continuación:

$$f_r(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad (3.6)$$

$$f_i(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \sin(\omega t) dt$$

Adicionalmente, como se ha mencionado, la estimación fasorial implementada en

los relés debe obtenerse a partir de elementos discretos, por tanto, de manera análoga se obtienen las ecuaciones de la *Transformada Discreta de Fourier* para la parte real e imaginaria necesarias para obtener el fasor de la señal bajo análisis, partiendo de la convolución de la señal de entrada con la exponencial presentada [22]:

$$f \otimes e_h = \sum_{n=1}^N f[n] e^{(h \frac{2\pi n}{N})} \quad (3.7)$$

Finalmente, de acuerdo con *Mallat* [22] y las ecuaciones dadas por *Silva* en [24], para un ciclo de la frecuencia fundamental se obtiene:

$$\begin{aligned} F_r[k] &= \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N f[k-N+n] \cos\left(h \frac{2\pi n}{N}\right) \\ F_i[k] &= -\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N f[k-N+n] \sin\left(h \frac{2\pi n}{N}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde n representa la muestra de entrada, N el número de muestras por ciclo que depende de la frecuencia de muestreo. En la práctica en relevadores convencionales, el muestreo corresponde a 16, 32, 64 o 128. Así, aplicando esta ecuación al procedimiento de esta tesis, la función f corresponderá a las señales de corriente secundarias de cada devanado del transformador de potencia, de acuerdo con lo presentado en la sección 2.5. Posteriormente, de acuerdo con la teoría de fasores, bastará con obtener la magnitud, F_h , y el ángulo F_ϕ , del fasor correspondiente, como:

$$\begin{aligned} F_h[k] &= \sqrt{f_r[k]^2 + f_i[k]^2} \\ F_\phi[k] &= \tan^{-1}\left(\frac{f_i[k]}{f_r[k]}\right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Para $h = 1$, la magnitud y ángulo del fasor obtenido corresponderán con la frecuencia fundamental del sistema de potencia. Si se requiere la obtención de componentes armónicas, como en el caso de bloqueo clásico de la función diferencial ante corrientes

Inrush, se deberá variar el factor h para el valor equivalente al componente armónico deseado (i.e., para el componente de 2^{do} armónico, $h = 2$).

La ecuación 3.9 se utiliza en la presente tesis para obtener los fasores, a frecuencia fundamental, de las corrientes en el devanado primario y en el devanado secundario del transformador de potencia, en cada ventana de 1 ciclo analizada. Posteriormente, con estos fasores se realiza el cálculo de corriente diferencial en cada una de las ventanas, de acuerdo con lo presentado en la sección 2.5 y la ecuación 2.11.

3.2.3. Transformada Wavelet

3.2.3.1. Definición

La *Transformada Wavelet* permite realizar un análisis de *tiempo-frecuencia* a través del cual es posible obtener el contenido frecuencial en cada instante de tiempo, de acuerdo con el nivel de descomposición utilizado, dando como resultado una superficie (eje z) que refleja el nivel de contenido frecuencial de acuerdo con el instante de tiempo (eje u) y la escala (eje s).

Esta transformada puede definirse como la convolución entre una *Función Wavelet Madre* y la señal bajo análisis, como se muestra a continuación para la *Transformada Wavelet Continua* [22] [25], dando como resultado una serie de coeficientes de detalle para cada escala de análisis s :

$$Wf(u, s) = \langle f(t), \psi_{u,s}(t) \rangle = f \otimes \bar{\psi}_s(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (3.10)$$

Siendo ψ la función *Wavelet* madre mencionada, u el instante de tiempo en cálculo y s la escala o nivel de descomposición. Al tratarse de una transformada continua, su re-

sultado tendrá un nivel de detalle infinitesimal para cada uno de sus ejes. Pero, como se ha mencionado, con el fin de utilizar la transformada en dispositivos de protección, se requiere una aplicación discreta, por tanto, se presenta a continuación la *Transformada Wavelet Discreta* que sigue la misma base de convolución entre la función *Wavelet* madre y la señal bajo análisis, pero a partir de secuencias de datos con un muestreo N en una ventana de tiempo específicamente definida [22] [25]:

$$Wf[u, a^j] = f \otimes \tilde{\psi}_j[n] = \sum_{m=0}^{N-1} f[m] \psi_j^*[m-n] \quad (3.11)$$

Donde:

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi\left(\frac{n}{a^j}\right) \quad (3.12)$$

ψ corresponde a la función *Wavelet* madre y a^j corresponde a su escalamiento, tanto en amplitud como en fase, de manera que pueda recorrerse cada una de las escalas establecidas. El número máximo de escalas o nivel máximo de descomposición de la *Transformada Wavelet Discreta* está dado por $\log_2 N$ [22], que corresponde igualmente con el número de coeficientes de detalle arrojados por la transformada.

Una de las opciones más utilizada en literatura para realizar el escalamiento mencionado, corresponde a la escala diádica, bajo la cual $a = 2$, de manera que el escalamiento a la función *Wavelet* madre se realice en múltiplos de 2^j , es decir:

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{n}{2^j}\right) \quad (3.13)$$

Con el fin de permitir la visualización del escalamiento, asociado con el principio de incertidumbre de *Heisenberg* que establece la relación inversamente proporcional entre la frecuencia y el tiempo, que implica una baja precisión en tiempo cuando se logre una alta precisión en frecuencia y *vice versa*, se presenta en la Figura 3.3 la variación

de la función respecto de la escala, nivel de descomposición o frecuencia, en el tiempo.

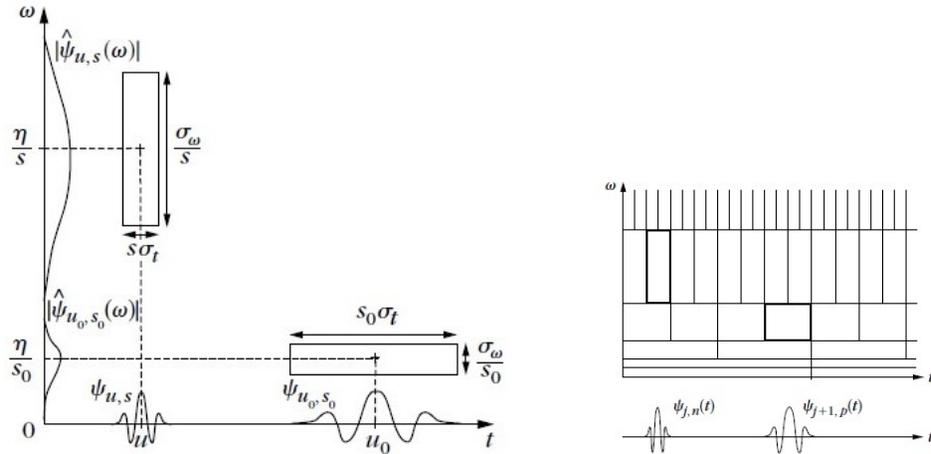


Figura 3.3: Descomposición en tiempo y frecuencia realizada por la DWT.

Se observa de la gráfica izquierda en la figura anterior que, al realizar el cálculo de la transformada con la función *Wavelet* madre comprimida, se tendrá una mayor precisión del instante de tiempo en el cual se presentan las componentes frecuenciales, pero este resultado abarcará un rango amplio de frecuencias; por el contrario, cuando la función *Wavelet* madre se expande en el tiempo, se tendrá una baja precisión sobre el instante de tiempo en el cual se presentan las componentes, pero se tendrá un valor preciso de contenido frecuencial. De esta manera, al realizar el escalamiento de la función *Wavelet* madre mediante la escala diádica a lo largo de los ejes de tiempo u y nivel de descomposición 2^j , se obtiene la estructura de la gráfica derecha, presentando niveles de precisión en tiempo bajos en la parte inferior, donde la precisión en frecuencia se incrementa y, niveles de precisión en tiempo altos, con baja precisión en frecuencia hacia la parte superior.

3.2.3.2. Familias de Funciones *Wavelet* Madre

La función *Wavelet* madre seleccionada es de gran importancia en el resultado obtenido dado que, de acuerdo con la definición de convolución, se extraerá de la función bajo análisis, su similitud con la función *Wavelet* madre, por tanto, esta debe ser seleccionada con especial cuidado de acuerdo con el tipo de señal a procesar y el tipo de información que se desee extraer. Para esto, existe una gran cantidad de familias de funciones madre diferentes y en cada familia, además, diferentes sub tipos que permiten una respuesta en frecuencia específica. Adicionalmente, algunas pueden emplearse tanto en la *Transformada Wavelet Continua* como en la *Transformada Wavelet Discreta*, mientras que algunas otras están específicamente diseñadas para una de las dos.

A continuación, en la Tabla 3.5, se presentan las familias de funciones *Wavelet* madre disponibles así como sus tipos y algunas de sus propiedades [22] [25] [26] [27].

Cada una de estas funciones puede representar un resultado completamente diferente y, en caso de utilizar una función *Wavelet* madre no adecuada, podrían obtenerse resultados poco prácticos en el análisis de señales. Para un mayor detalle en las implicaciones de cada una de las propiedades, ver [22] y [25].

3.2.3.3. Representación de Filtros

Una manera alternativa de aplicar la *Transformada Wavelet* corresponde a la convolución en cascada de la señal bajo análisis, con un par de filtros basa baja y pasa alta llamados *Filtros de Descomposición*, h_H y h_L , obtenidos a partir de la función *Wavelet* madre.

La convolución del filtro pasa alta con la señal de entrada, genera un coeficiente de

Tabla 3.5: Familias de *Funciones Madre* para la *Transformada Wavelet*.

Familia	Funciones	Propiedades	Comentarios
Haar	Haar	asimétrica, ortogonal	–
Daubechies	db1 a db20	asimétrica, ortogonal, biortogonal	<i>db4</i> ampliamente utilizada en aplicaciones de potencia por su tipo de onda
Symlets	sym2 a sym20	cuasi simétrica, ortogonal	Propuestas por Daubechies como modificación a las <i>dbn</i>
Coiflets	coif1 a coif5	cuasi simétrica, ortogonal	Solicitadas por Coifman a Daubechies para aplicación en análisis numérico
Biorthogonal	bior1.1, bior1.3, ... bior 6.8	simétrica, biortogonal	Utilizada en reconstrucción de imágenes gracias a su <i>fase lineal</i>
Meyer	meyer	simétrica, ortogonal	Posee una <i>Transformada de Fourier</i> suave que provee una atenuación exponencial en tiempo
Morlet	morlet	simétrica, no ortogonal	–
Mexican hat	mexican hat	–	–

detalle asociado con el contenido de alta frecuencia de la señal y la convolución con el filtro pasa baja, genera un coeficiente de aproximación, al cual se aplica, de nuevo, la convolución con ambos filtros. De esta manera se repite e itera el proceso de acuerdo con el límite presentado anteriormente, de $\log_2(N)$, siendo N el número de muestras por ciclo de la frecuencia fundamental bajo el cual se obtuvo la señal de entrada.

La aplicación de la *Transformada Wavelet* mediante bancos de filtros se presenta en la Figura 3.4, en la cual se adiciona un paso de *Downsampling* requerido para la reconstrucción exacta de la señal de entrada al aplicar el banco de filtros de reconstrucción.

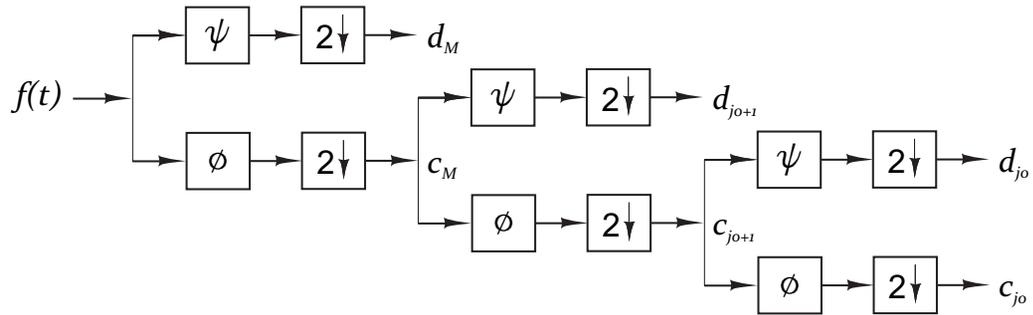


Figura 3.4: Algoritmo de operación de la *DWT* mediante banco de filtros.

Cada una de las funciones presentadas en la Tabla 3.5 posee un banco de filtros de descomposición y, además, un par de filtros adicionales llamados *Filtros de Reconstrucción*, mediante los cuales es posible obtener la señal de entrada original a partir de los coeficientes obtenidos tras la aplicación de la *Transformada Wavelet*.

El resultado obtenido tras la aplicación de la transformada, dependerá estrechamente de la frecuencia de muestreo de la señal de entrada, teniendo en cuenta que la máxima frecuencia identificable corresponde a $F_{maxima}/2$; posteriormente, cada filtro dividirá esta frecuencia máxima en 2, en cada aplicación de la convolución. De esta manera, el resultado de la transformada serán los coeficientes de detalle cD_1 a cD_n además del coeficiente de aproximación que contiene la componente de 0 Hz o de DC de la señal de entrada.

En la Figura 3.5 se presenta un ejemplo de *Función Wavelet Madre* [26], correspon-

diente a la familia de funciones *Daubechies*, específicamente la *db4*.

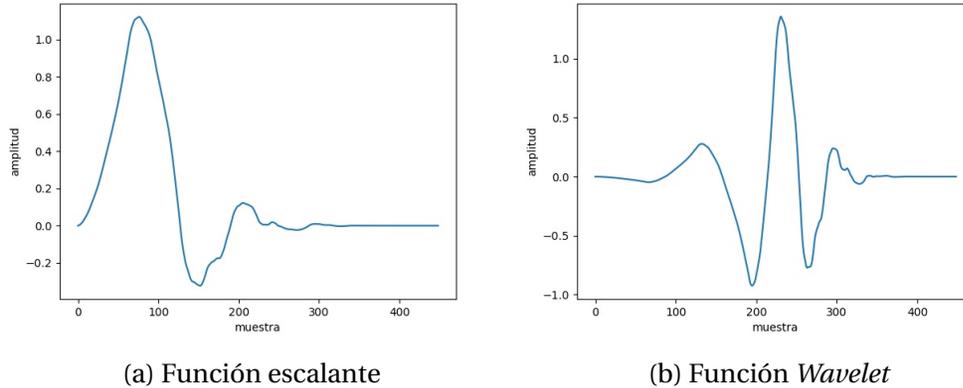


Figura 3.5: Función *Wavelet* madre de la *DWT* - *Deubechies 4* o *db4*.

3.3. O-Splines

Teniendo en cuenta que las *Splines* representan una herramienta fundamental en el análisis y procesamiento de señales, *De La O* [28] [29] introduce las *O-Splines* con el fin de dar solución al problema de medida de oscilaciones de potencia en las unidades de medida fasoriales teniendo en cuenta que, como allí se menciona, la *Transformada Discreta de Fourier* mediante la cual se realiza la estimación fasorial funciona de manera precisa ante señales con amplitud y fase constante, condiciones variables ante las oscilaciones mencionadas. Adicionalmente, se generan las *O-Splines* con el fin de mejorar el análisis de los modelos electromecánicos en oscilaciones de potencia del sistema.

Dado que la *Transformada de Fourier* - *DFT* posee coeficientes constantes, las *O-Splines* permiten su variación al substituirlos por polinomios de *Taylor*, es decir, realiza

una expansión en polinomios de *Taylor* de los coeficientes de la *DFT*, nombrandose, por tanto: *Discrete-Time Taylor-Fourier Transform - DTTFT*.

Matemáticamente, una función x muestreada a N muestras por ciclo de la frecuencia fundamental, quedará definida, aplicando el concepto de *DTTFT* para una expansión en polinomios de *Taylor* de grado K , como sigue:

$$x = \left(I \begin{pmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} T \begin{pmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} \dots \frac{1}{K!} T^K \begin{pmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \xi_N \\ \xi_N^1 \\ \vdots \\ \xi_N^K \end{pmatrix} \quad x = \Phi \xi \quad (3.14)$$

Donde I corresponde a la matriz identidad, W_N a la matriz de coeficientes constantes de la *Transformada Discreta de Fourier*, la matriz T contiene en su diagonal el primer término de la expansión de *Taylor* y los sub vectores ξ_N^k , siendo $k = 0, 1, \dots, K$, contienen las K -ésimas derivadas de los fasores armónicos dinámicos o coeficientes *Taylor - Fourier* de grado K , $\xi_N(h)$, con $h = 0, 1, \dots, N - 1$. De esta ecuación y luego de factorizar, se obtiene la matriz de vectores base, Φ , siendo $C = K + 1$ [28] [29]:

$$\Phi = \begin{pmatrix} I & Y_1 & \dots & \frac{1}{K!} Y_1 K \\ I & Y_2 & \dots & \frac{1}{K!} Y_2 K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & Y_C & \dots & \frac{1}{K!} Y_C K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_N \end{pmatrix} \quad \Phi = \Upsilon \Omega \quad (3.15)$$

Tras algunas consideraciones respecto de la proyección de x en el sub espacio *Tay-*

lor - Fourier, se obtiene la matriz dual $\tilde{\Phi}$ de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\tilde{\Phi} = \Phi(\Phi^H \Phi)^{-1} = \Upsilon(\Upsilon^H \Upsilon)^{-1} \frac{\Omega}{N} = \tilde{\Upsilon} \frac{\Omega}{N} \quad (3.16)$$

Esta relación implica que las columnas de la matriz $\tilde{\Phi}$ son modulaciones armónicas de las columnas de sub matrices diagonales en $\tilde{\Upsilon}$, de manera que cada columna de las sub matrices diagonales en $\tilde{\Upsilon}$ contienen una envolvente común para el set de frecuencias armónicas en W_N .

Tras resolver esta ecuación para un grado de polinomio de *Taylor* determinado, K , se obtiene un set de polinomios de $\tilde{\phi}_0^K(u)$ para cada intervalo de tiempo definido en su solución, correspondientes con las envolventes mencionadas, siendo u el tiempo normalizado en un período T , es decir, $u = t/T$. En la Figura 3.6 se presentan las envolventes de los filtros obtenidos, con su respectiva respuesta en frecuencia.

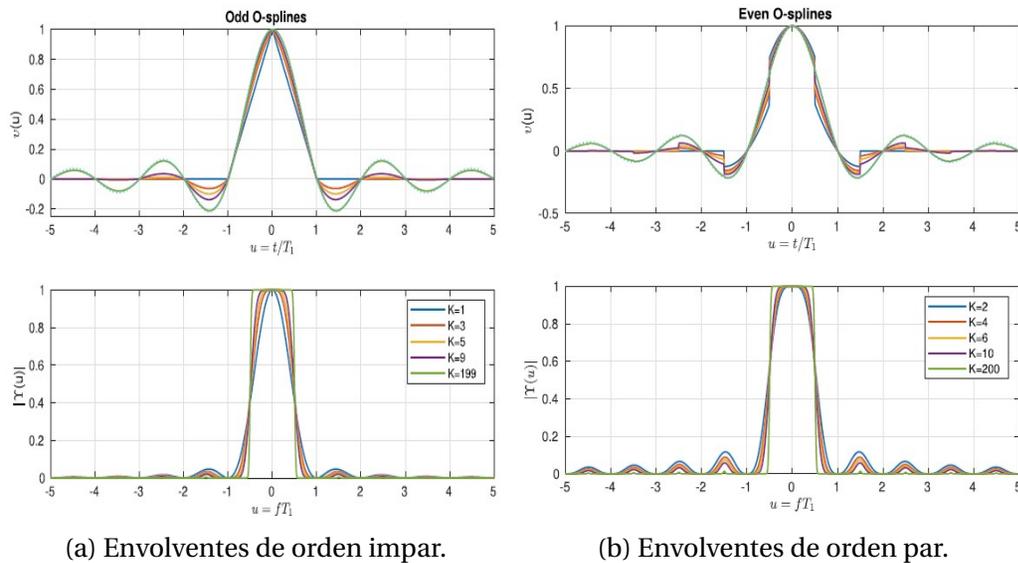


Figura 3.6: Envolventes de filtros pasabajas de las *O-Splines*.

De la gráfica inferior izquierda en la figura anterior, se observa que al incrementar el orden (grado del polinomio de *Taylor*) de la *O-Spline*, la banda de paso es principalmente lisa, como sucede con las *Wavelets* y la banda de transición cumple, a mayor grado, cada vez más con el criterio espectral de ortonormalidad requerido por estas. Esta característica es crucial para los resultados obtenidos en la presente tesis.

Finalmente la envolvente obtenida se multiplicará por la exponencial completa con el fin de obtener la versión modulada del filtro a una frecuencia específica, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\tilde{\phi}_h^K(u) &= \tilde{\phi}_0^K(u)e^{2\pi jhu} \\ h &= 0, 1, \dots, N-1\end{aligned}\tag{3.17}$$

Donde h corresponde al modulador de la frecuencia de la exponencial. Con las *O-Splines* de la ecuación 3.17 se realizará la construcción del banco de filtros basabanda para la *Transformada Wavelet Discreta*, con base en el algoritmo de la Figura 3.4 y las consideraciones de la sección 3.2.3.

3.4. Entropía de Coeficientes de la DWT

El post procesamiento de los coeficientes de la transformada se realiza a través del cálculo de la entropía de los mismos la cual condensa la información de energía de todos los coeficientes de acuerdo con la ecuación 3.18 [30].

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log(p_i)\tag{3.18}$$

Siendo p_i el espectro de densidad de energía de cada coeficiente.

De acuerdo con lo presentado en este capítulo, la *Transformada Wavelet Discreta*

permite realizar el procesamiento de las señales de corriente involucradas en la transformada y simuladas mediante la herramienta de simulación *PSCAD*, gracias a la descomposición frecuencial realizada en conjunto con el banco de filtros obtenido de las *O-Splines*. Mediante este banco de filtros y gracias a las características de las *O-Splines*, es posible modificar las frecuencias centrales de los filtros, de acuerdo, no solo con las necesidades propias de la transformada, sino con las necesidades de adaptabilidad del método de discriminación.

Posteriormente, luego de la obtención de los coeficientes de detalle y de aproximación de la *Transformada Wavelet* a través del banco de filtros obtenido de las *O-Splines*, se realiza su post procesamiento a través del cálculo de entropía de los coeficientes, de manera que, a partir de estos resultados, se genere el criterio de discriminación buscado.

Como se presentará en el Capítulo 5, el valor de entropía obtenido de cada caso o evento simulado, permite la obtención de un factor de discriminación mediante el cual es posible detectar si la señal de corriente bajo análisis corresponde a un evento de energización que requiere el bloqueo de la protección diferencial o si, por el contrario, corresponde a una falla interna que requiere la desconexión del transformador a través de la actuación de la función de protección diferencial.

Capítulo 4

Discriminación de Corrientes de Energización

Dado que el método de discriminación desarrollado en esta tesis une dos de las herramientas matemáticas presentadas en el capítulo anterior, en este capítulo se describe esta unión, esta es: *Transformada Wavelet Discreta* a través de banco de filtros generados con las *O-Splines*; así mismo, se presenta el algoritmo implementado para el análisis y discriminación de las corrientes de energización y el posterior bloqueo de la función diferencial de transformador.

4.1. Banco de Filtros con O-Splines

La *Transformada Wavelet Discreta* puede ser aplicada mediante un banco de filtros obtenido con la escala diádica, en correspondencia con lo presentado en el Capítulo 3. Así mismo, las *O-Splines* permiten un control frecuencial a través de las *O-Spline Harmónicas* de la ecuación 3.17, con la cual es posible obtener un banco de filtros a frecuencias centrales específicas que, para el caso de estudio, corresponderán con las obtenidas mediante la escala diádica de la *DWT*.

Debido a que las señales simuladas para cada uno de los eventos descritos en el Capítulo 3, se obtienen a 64 muestras por ciclo, el nivel de descomposición máximo posible para la *Transformada Wavelet Discreta*, de la sección 3.2.3, corresponde a:

$$\log_2 N = \log_2 64 = 6$$

Es decir, el número máximo de filtros aplicables en la transformada será de 6, para una distribución diádica de las frecuencias centrales: $32xF_0$, $16xF_0$, $8xF_0$, $4xF_0$, $2xF_0$, $1xF_0$. Nótese que la frecuencia central máxima corresponde a 32 veces la frecuencia fundamental de la señal, de 60 Hz para el caso de estudio, dado que la máxima frecuencia identificable corresponde a la frecuencia de muestreo dividida por 2, de acuerdo con el teorema de *Nyquist* dado en la ecuación 3.1.

En la Figura 4.1 en la gráfica izquierda, se presenta la *O-Spline* envolvente a partir de la cual se obtienen las señales armónicas a utilizar en la *DWT*. Esta envolvente, de acuerdo con las variables de entrada requeridas [28] [29], se obtiene para $N = 64$, dado que este es el muestreo utilizado para la obtención de las señales de corriente y, un grado de polinomio de *Taylor* de $K = 9$, el cual permite un mejor nivel de precisión en los resultados, especialmente para los resultados con altas frecuencias. Así mismo, en la gráfica derecha se presenta la *O-Spline* armónica con frecuencia central de 60 Hz.

De esta manera se obtiene el banco de filtros para las frecuencias centrales dadas anteriormente, presentando en la gráfica izquierda de la Figura 4.2 las funciones correspondientes para las cuales se aplica la escala diádica tanto en la frecuencia central de la armónica, como en el escalamiento en magnitud de la ecuación 3.13, requerido por la transformada para mantener la energía de la señal de entrada al momento de aplicar la transformada inversa. Se presenta, además, en la gráfica derecha, la respues-

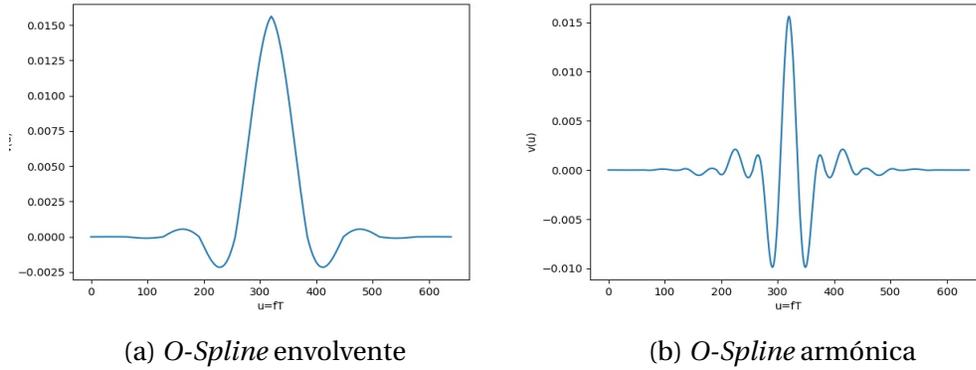


Figura 4.1: *O-Spline* de orden 9 ($K=9$) y frecuencia fundamental de 60 Hz.

ta en frecuencia de dicho banco de filtro para cada una de las *O-Spline* armónicas. Este banco será el utilizado en el algoritmo de la *DWT* detallado en la Figura 3.4.

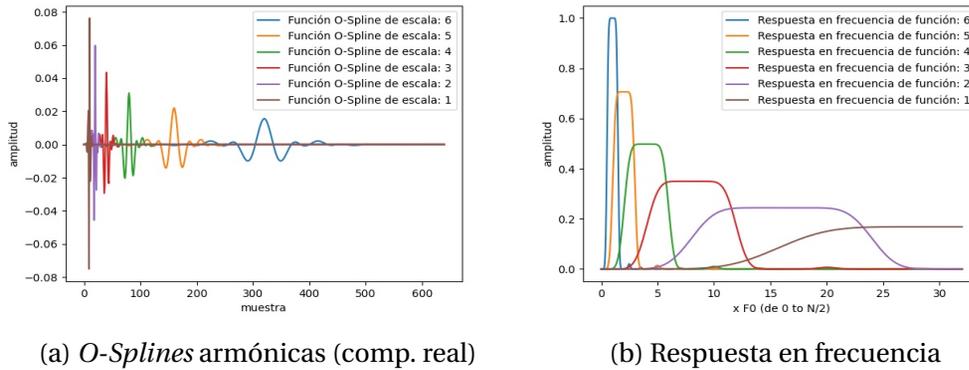


Figura 4.2: Banco de filtros de las *O-Spline* para la *DWT*.

Cada una de las funciones *O-Spline* de la figura anterior se obtiene mediante compresión e interpolación de la *O-Spline* inicial presentada en la gráfica derecha en la Figura 4.1; dicha compresión e interpolación se realiza de acuerdo con la escala diádica de la *Transformada Wavelet Discreta*. Nótese además, de la Figura 4.2, la correspon-

dencia de la respuesta en frecuencia con las frecuencias centrales dadas anteriormente y, además, cómo disminuye la ganancia de cada filtro con base en la escala diádica, a razón de $1/\sqrt{2}$.

Con estas funciones y su banco de filtros correspondiente, es posible aplicar la *Transformada Wavelet Discreta* a las señales de entrada simuladas, a través de la convolución de cada una de las funciones, en ventanas móviles de 1 ciclo de la frecuencia fundamental, como se describió en la sección 3.2. Se obtienen así 6 coeficientes de detalle que contienen la información del rango frecuencial asociado a cada filtro y, 6 coeficientes de aproximación que contienen la información principalmente de la componente de DC de la señal.

4.2. Algoritmo de Discriminación

El algoritmo de discriminación entre corrientes de energización y corrientes de falla interna, que comprende las herramientas tanto computacionales como matemáticas presentadas hasta ahora, se resume a continuación y el algoritmo completo utilizado para el análisis de las señales de corriente se presenta en el flujograma de la Figura 4.3.

- **1. Simulación** de los eventos definidos en la sección 3.1 en el programa PSCAD y obtención de las señales de corriente el devanado primario y devanado secundario del transformador de potencia. Estos eventos se simulan con una duración de 1 segundo, para un total de 3840 muestras de acuerdo con la frecuencia de muestreo de 3840 Hz (64 muestras por ciclo).
- **2. Pre-procesamiento** de las señales de corriente obtenidas, iniciando con la nor-

malización de las señales de corriente, aplicando los factores de escalamiento requeridos por la función de protección diferencial de acuerdo con lo presentado en la sección 2.5. Así mismo se llevan estas señales de corriente a valores en *por unidad* de acuerdo con las relaciones de transformación de los transformadores de corriente en cada devanado.

- **3. Estimación Fasorial** aplicada a ventanas móviles de 1 ciclo de la frecuencia fundamental (60 Hz) a través de la *Transformada de Fourier*. A partir de este punto, **todos los cálculos se realizan sobre ventanas móviles de 1 ciclo**.
- **4. Cálculo de la corriente diferencial** a partir de los fasores obtenidos y, ubicación de la corriente diferencial en la característica de operación. En este punto se determina inicialmente si las corrientes calculadas en la ventana móvil en curso corresponden a un evento de operación normal o a un evento de falla.

En caso de generarse una operación de la función diferencial, i.e., la corriente diferencial se ubica en la parte superior de la característica presentada en la Figura 2.8, se procede con el procesamiento de la señal de corriente del devanado de alta del transformador a través de la *Transformada Wavelet Discreta*.

- **5. Obtención de la función *O-Splines*** de acuerdo con los parámetros de entrada definidos, es decir, el número de muestras por ciclo de las corrientes simuladas, N , y el orden de la *O-Spline* o grado de polinomio de *Taylor*, K . A partir de esta *O-Spline*, se obtiene la *O-Spline* armónica a frecuencia fundamental.
- **6. Obtención de banco de filtros *O-Spline*** a partir de la *O-Spline* armónica del punto anterior, mediante compresión en amplitud e interpolación en longitud de manera que se obtenga la respuesta en frecuencia requerida por la *Transformada Wavelet*. Así mismo para cada una de las funciones obtenidas, se modifica la frecuencia central de la *O-Spline* armónica de acuerdo con la escala diádica de

la *Transformada Wavelet*.

- **7. Cálculo de la *Transformada Wavelet Discreta*** a través de la aplicación del banco de filtros de las *O-Splines* armónicas con la cual se obtienen los coeficientes de detalle y aproximación.
- **8. Cálculo de la *Entropía***, con método no adaptativo, de los coeficientes de la *Transformada Wavelet*. Este proceso se realiza para 1 ciclo completo a partir de la detección del evento por la función diferencial, para un total de 64 ventanas analizadas. De estas, se toma el mínimo valor de entropía sobre el cual se evidencia la detección del evento.
- **9. Cálculo de la *Entropía con método adaptativo***, de los coeficientes de la *Transformada Wavelet* mediante los pasos 5 al 8, modificando la frecuencia central de la función *O-Spline* armónica asociada con el coeficiente número 3 de la *Transformada Wavelet Discreta*, con base en el valor de corriente diferencial de la ventana móvil en curso y de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$f_{3^{rd} \text{ coef mod}} = f_{3^{rd} \text{ coef}} * (1 - I_{diff})$$

- **Obtención de factor de discriminación, R** , de acuerdo con la siguiente ecuación, que relaciona la entropía calculada inicialmente, $H_{conv.}$, con la entropía del método adaptativo, $H_{adap.}$:

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}}$$

- **Discriminación** entre corrientes de energización y corrientes de falla interna de acuerdo con el valor obtenido en el factor de discriminación, R .

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del procesamiento y análisis de los casi 1000 eventos, se obtienen que el valor de umbral óptimo para R es de 0.7.

De esta manera, un valor de R superior a 0.7 corresponderá a una condición que requiere el bloqueo de la función de protección diferencial, como el caso de corrientes de energización y, valores de R inferiores a 0.7, corresponderán a eventos de falla interna que requieren disparo u operación de la función de protección.

Del diagrama de flujo, es importante notar que, de acuerdo con el algoritmo propuesto, buscando disminuir la utilización de recursos de procesamiento y, dado que no es necesaria la aplicación de la transformada en cada ventada de 1 ciclo analizada, se realiza su aplicación únicamente si la corriente diferencial alcanza la zona de operación, de manera que al calcular los coeficientes, se confirme si dicho valor de corriente diferencial corresponde efectivamente a una condición de falla interna o si por el contrario, corresponde a una condición que deba bloquearse.

El algoritmo descrito, que incluye la lectura de las señales de corriente simuladas, la generación de las *O-Splines*, la creación del banco de filtros, la aplicación de la *Transformada Wavelet Discreta*, el cálculo de *Entropía* y el cálculo de los *Wavelet Correlation Modes* y, obviamente, la generación de resultados tabulados e imágenes, se implementó en la herramienta computacional *Python 3.9*.

4.2.1. Aplicación del Método de Discriminación

En la gráfica izquierda de la Figura 4.4 se presentan las corrientes en ambos lados del transformador de potencia, asociadas con un evento de energización en vacío del transformador de potencia y, en la gráfica derecha, la incursión de la corriente diferencial en la característica de operación.

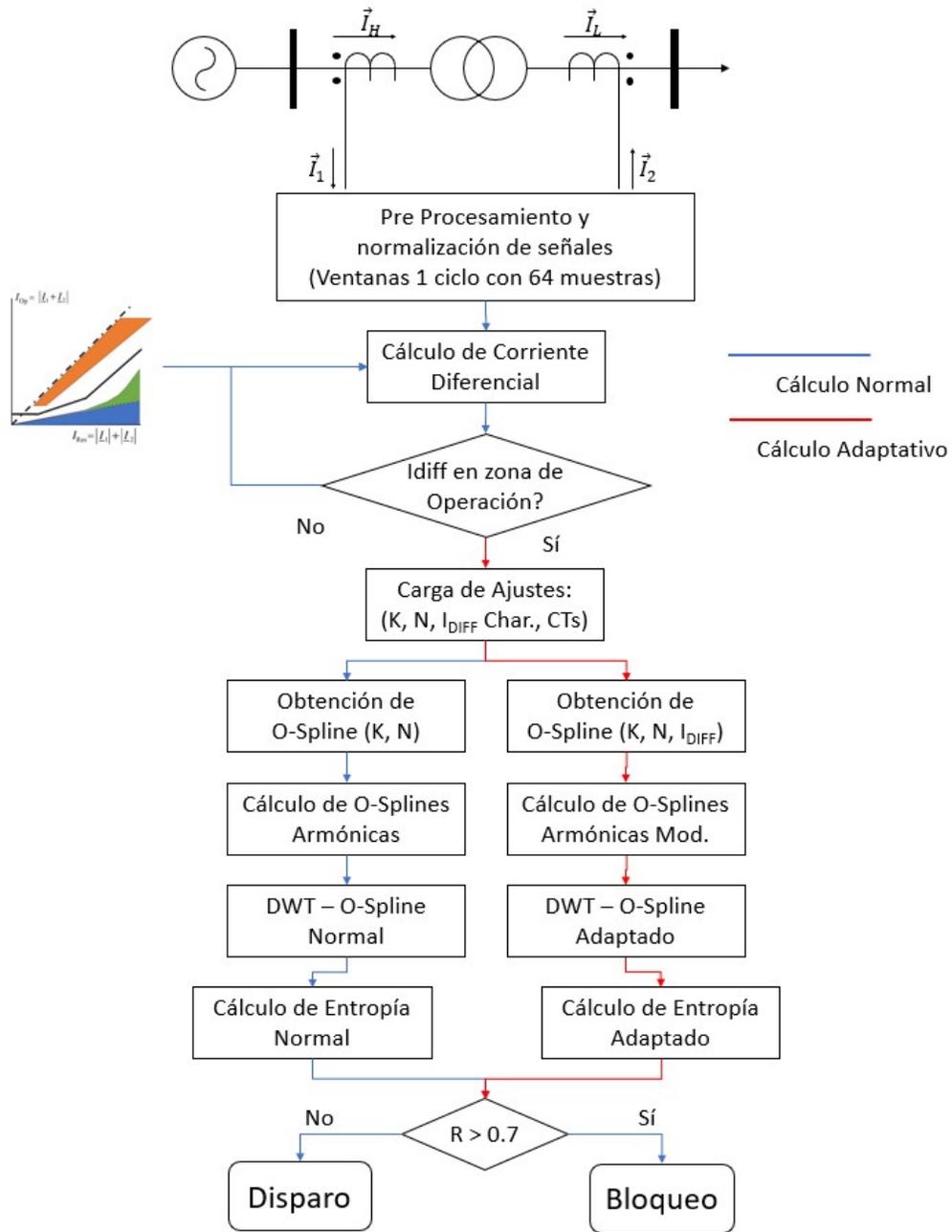


Figura 4.3: Diagrama de flujo con algoritmo de discriminación propuesto.

Dado que para dicho evento se tiene la operación de la función diferencial, se realiza el cálculo de los coeficientes de detalle y aproximación de la *Transformada Wavelet*

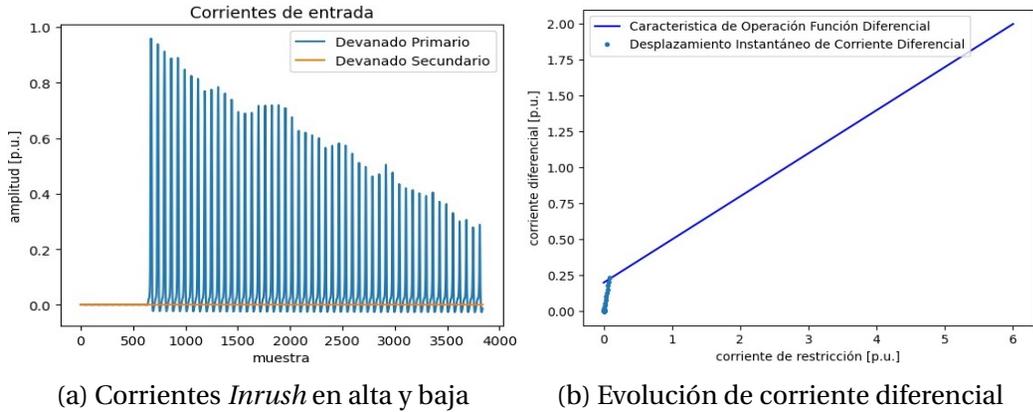


Figura 4.4: Corrientes *Inrush* y evolución de corriente diferencial.

Discreta mediante la convolución del banco de filtros de las *O-Splines* de acuerdo con el algoritmo de la Figura 3.4. En la Figura 4.5 se presenta el comportamiento de los coeficientes de detalle de la transformada, obtenidos para cada uno de los niveles de descomposición posibles.

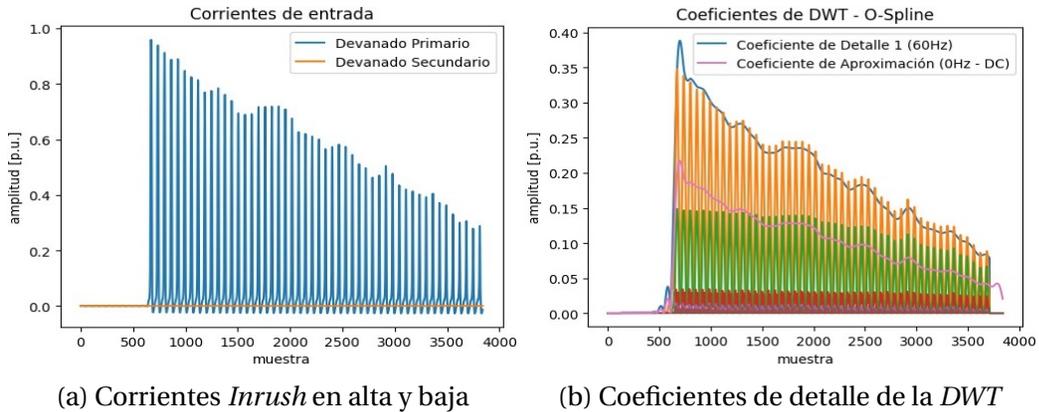


Figura 4.5: Corrientes *Inrush* y coeficientes de la *DWT*.

De la figura anterior, el primero de los seis coeficientes de aproximación correspondiente a la componente DC de la señal de corriente de entrada. El coeficiente de

detalle 1, representa la componente de frecuencia fundamental a 60 Hz. Los demás coeficientes contienen el comportamiento frecuencial de la señal de entrada para cada uno de los rangos establecidos por las frecuencias centrales y anchos de banda de los filtros.

La *Transformada Wavelet* a través del banco de filtros de *O-Splines*, se aplica únicamente a la corriente del devanado primario, dado que la corriente de energización se encuentra presente únicamente en este. Realizar el proceso de descomposición y análisis a una corriente diferencial instantánea eliminaría componentes y detalles utilizables en el análisis de las señales y, así mismo, el realizar el proceso sobre la corriente secundaria no arroja resultados relevantes. Lo anterior se comprobó mediante la comparación de resultados obtenidos analizando la corriente primaria, la corriente secundaria y la corriente diferencial instantánea.

Se presenta en la Figura 4.6 los coeficientes de la *Transformada Wavelet*, obtenidos para una ventana móvil de 1 ciclo de frecuencia fundamental a 60 Hz, justo al inicio de la detección del evento de energización por la función diferencial de transformador. En la gráfica izquierda de la figura se presentan los coeficientes en la primera ventana móvil y, en la gráfica derecha, se observan los mismos coeficientes en la ventana móvil número 32, es decir, medio ciclo posterior a la detección de la falla.

Se realizó la sensibilidad al tipo de señal de entrada a analizar mediante la transformada, esto es, en valores *absolutos* (amperios secundarios) y valores en *por unidad - p.u.*, obteniendo mejores resultados al ingresar las corrientes primarias en *p.u.*

Una vez se obtienen los coeficientes, se realiza el cálculo de entropía de estos a partir de la ecuación 3.18 como se describió previamente, tanto para el cálculo no adap-

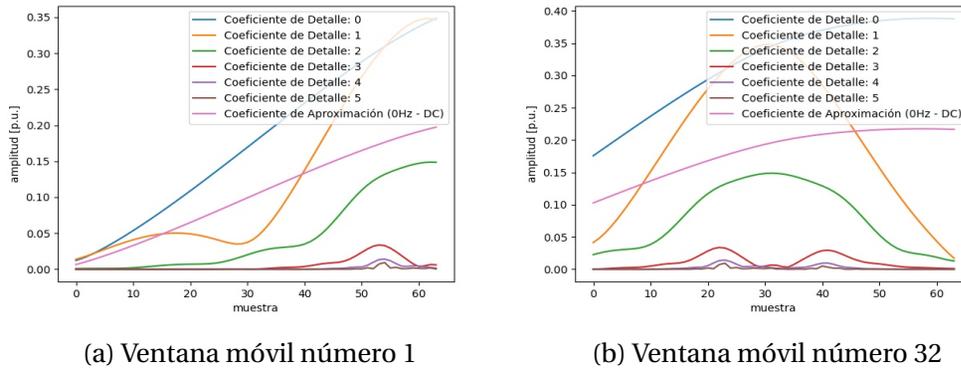


Figura 4.6: Coeficientes de la *DWT* en ventana móvil de 1 ciclo.

tativo con un valor de 0.914, como para el cálculo adaptativo con un valor de 0.968, obteniendo posteriormente, de acuerdo con el algoritmo descrito, el factor de discriminación cuyo valor se presenta a continuación:

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.968}{0.914} = 1,06$$

De acuerdo con el umbral del factor discriminante seleccionado ($R > 0.7$), se requiere, como es lógico ante una corriente de energización, bloquear la operación de la función diferencial.

Cabe aclarar que el modificar la frecuencia central de acuerdo con el valor de corriente diferencial, es producto de una importante sensibilización del resultado de modificar cada uno de los coeficientes y a través de diferentes valores base, arrojando mejores resultados el método adaptativo presentado.

El aplicar dicha adaptabilidad, gracias a la utilización de un parámetro que no es fijo para un transformador de potencia sino que varía de acuerdo con todas las condi-

ciones y características del sistema de potencia (relaciones de transformación, errores, niveles de falla, niveles de DC), como lo es el valor de corriente diferencial, además de la flexibilidad de aplicar la *DWT* en unión con las *O-Splines*, permite lograr una precisión absoluta en la discriminación entre corrientes de energización y corrientes de falla interna incluso para casos de fallas de espira a tierra hasta el 80%. De esta manera dicha adaptabilidad aplicará para cualquier condición del sistema de potencia y es independiente de las características del transformador.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de aplicar el algoritmo de discriminación de corrientes de energización a los eventos simulados, inicialmente presentando un resultado por tipo de evento y, finalmente, un resumen global de aplicar dicho algoritmo a los cerca de 1000 casos simulados.

5.1. Resultados Obtenidos

Se presenta el resultado del método de discriminación descrito en el Capítulo 4, siguiendo el algoritmo de la Figura 4.3, para cada uno de los eventos descritos en la Tabla 3.4 del Capítulo 3.

De acuerdo con lo establecido en la sección 3.1, se realizan alrededor de 1000 casos de simulación diferentes y a cada uno de estos se aplica el algoritmo de discriminación, sin embargo, en esta sección solo se presentarán los resultados de los eventos que generen activación de la función diferencial y, adicionalmente, de los 70 casos por evento, solo el correspondiente al tiempo $t = 0$.

5.1.1. Falla interna en bornes del transformador

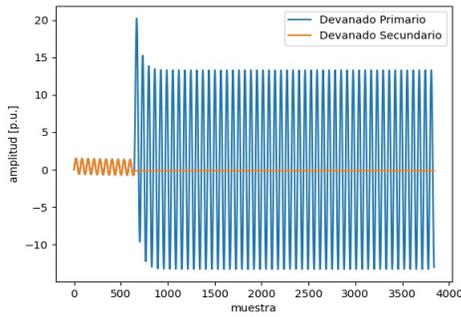
Al tratarse de una falla franca en bornes del transformador, se caracteriza por una corriente de cortocircuito de considerable magnitud en solo uno de los dos devanados, que depende de la potencia de cortocircuito de la fuente que alimente al transformador y, en caso de tratarse de una falla en bornes del lado de baja, dependerá además de la impedancia de corto del transformador. De esta manera, se observa en la gráfica superior izquierda de la Figura 5.1 una elevada corriente en el devanado de alta y una corriente nula en el devanado de baja durante la falla, lo que genera la adecuada activación inmediata de la función diferencial de transformador presentada en la gráfica superior derecha. Es en dicho instante, cuando la función diferencial se activa, en el que se aplica la *DWT* y se obtienen sus coeficientes y la *Entropía* asociada. Estos coeficientes se observan en la gráfica inferiores derecha, para el método no adaptativo.

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.3446}{0.837} = 0.4117 \rightarrow \text{disparo de función ANSI 87T}$$

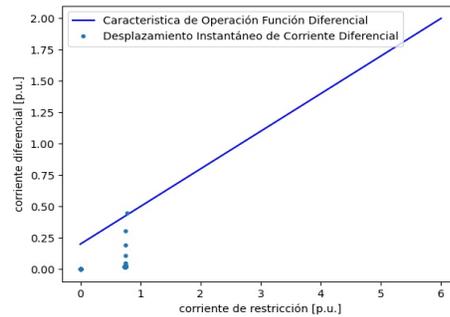
Al obtener estos coeficientes y sus *Entropías*, se realiza el cálculo del factor discriminante, *R*, cuyo resultado, influenciado por el incremento en el coeficiente de detalle número 3 debido a la modificación de la frecuencia central del filtro correspondiente para el método adaptativo, al obtenerse inferior al umbral seleccionado, permitirá la actuación de la función de protección.

5.1.2. Falla interna durante energización con carga

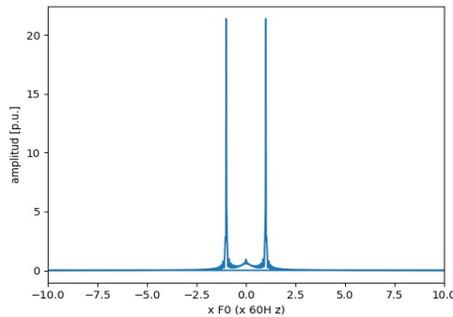
Aunque este evento contiene corrientes de energización en el devanado de alta, la corriente de falla es mayor en magnitud a la de energización, lo que implica que la componente de secuencia positiva tiene mayor relevancia y, por tanto, el comportamiento de las señales es casi idéntico al caso anterior, tanto de corrientes de falla como de co-



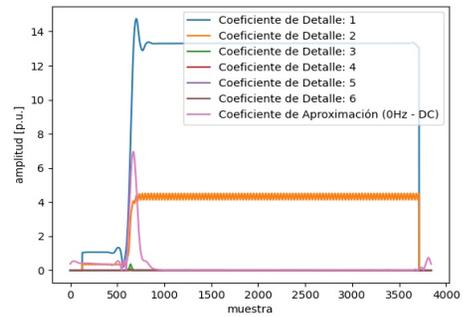
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta



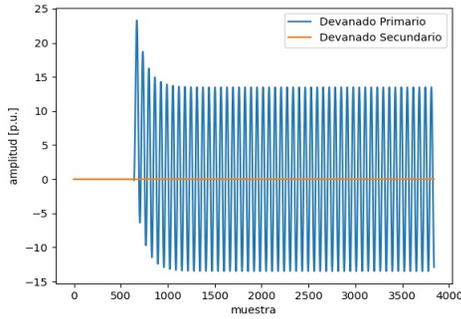
(d) Coeficientes de la DWT

Figura 5.1: Resultados de evento de Falla Interna en Bornes.

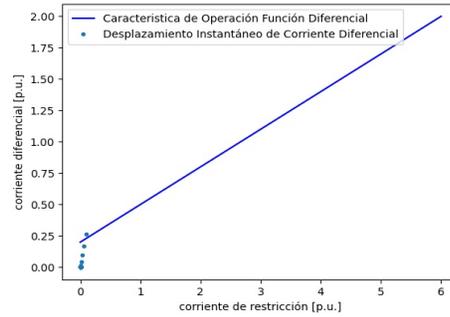
eficientes de la transformada y de valores de entropía. Su resultado se presenta en la Figura 5.2.

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.3469}{0.85} = 0.40812 \rightarrow \text{disparo de función ANSI 87T}$$

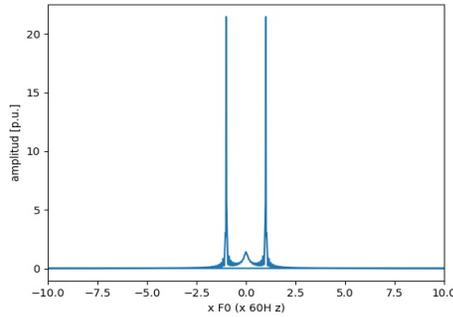
Se obtiene incluso un factor discriminante similar al caso anterior, permitiendo la operación de la función diferencial, actuación adecuada teniendo en cuenta que debe despejarse instantáneamente al transformador para evitar comprometer su integridad.



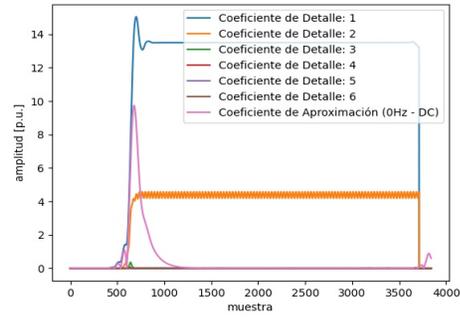
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta

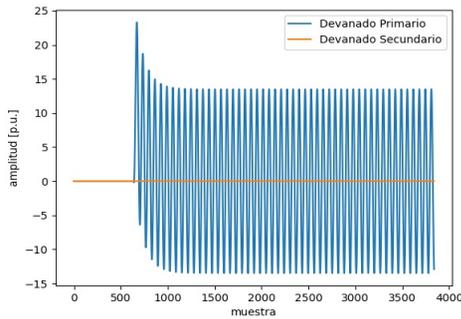


(d) Coeficientes de la DWT

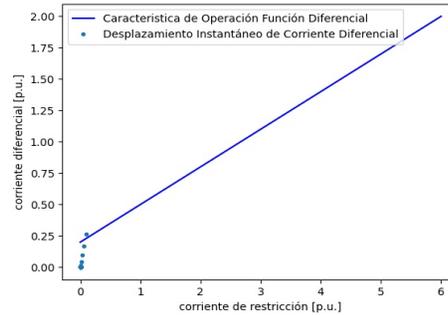
Figura 5.2: Resultados de evento de Falla Interna + Inrush + Carga.

5.1.3. Falla interna durante energización en vacío

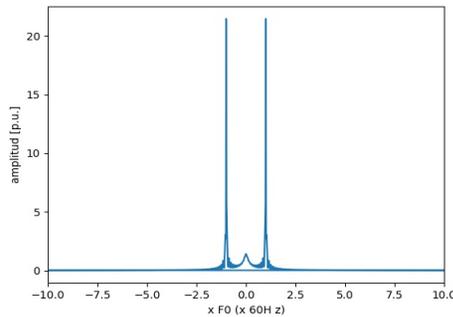
Debido a que este evento, cuyo resultado se observa en la Figura 5.3, en esencia es similar al anterior con la diferencia de que el transformador no cuenta con carga conectada, se tiene un mayor impacto de la corriente de energización en la corriente total del evento simulado, sin embargo, debido a la magnitud de la corriente de falla, sigue siendo despreciable su efecto y, por tanto, el resultado es similar al de falla interna franca en bornes. Las diferencias se tendrán principalmente en la magnitud de los coeficientes de altas frecuencias y su efecto se verá reflejado en el valor de *Entropía* asociado.



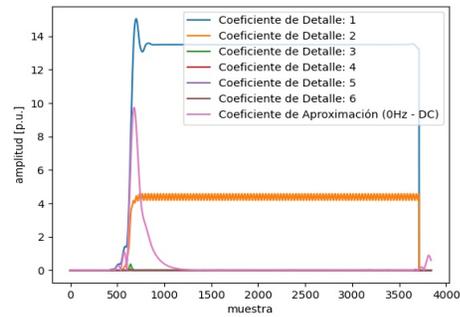
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta



(d) Coeficientes de la DWT

Figura 5.3: Resultados de evento de Falla Interna + Inrush en Vacío.

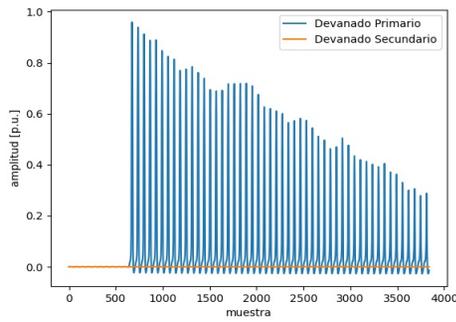
$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.3469}{0.85} = 0.40812 \rightarrow \text{disparo de función ANSI 87T}$$

El valor del coeficiente discriminante permitirá la operación de la función diferencial de transformador y, por consiguiente, la desconexión del transformador de potencia del sistema que lo alimenta.

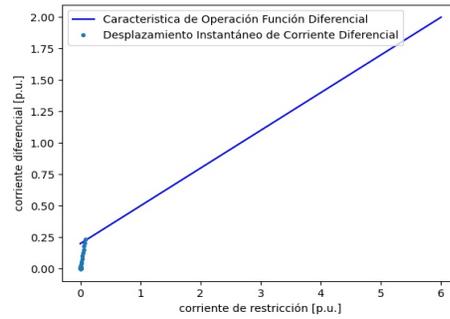
5.1.4. Energización en vacío

Como puede observarse en la Figura 5.4, la señal de corriente en la gráfica superior izquierda muestra una corriente primaria no sinusoidal debido al fenómeno de saturación del núcleo ferromagnético del transformador, fenómeno detallado en la sec-

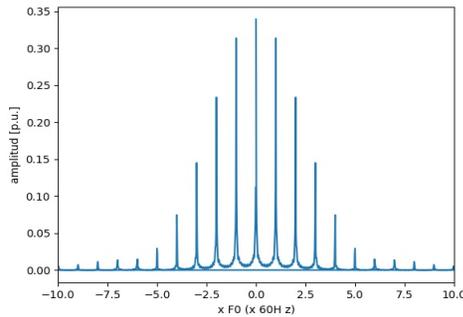
ción 2.3. Adicionalmente, de acuerdo con el tipo de evento (de energización en vacío), no fluirá corriente en el devanado secundario, lo que genera la operación, igualmente instantánea, de la función de protección diferencial, como puede verse en la gráfica superior derecha.



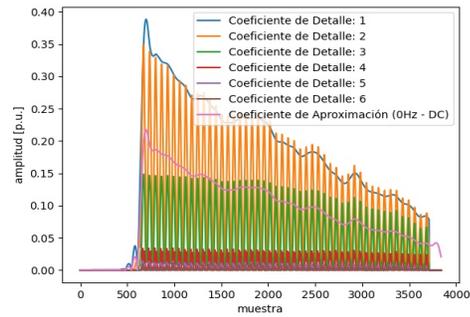
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta



(d) Coeficientes de la DWT

Figura 5.4: Resultados de evento de Energización en Vacío.

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.9677}{0.9138} = 1,0590 \rightarrow \text{bloqueo de función ANSI 87T}$$

Por otra parte, los coeficientes de la DWT obtenidos, presentan valores importantes para altas frecuencias comparados con los de bajas frecuencias, así, al aplicar la trans-

formada con el método adaptativo, el cambio en el coeficiente de detalle modificado no representa una variación relevante para el cálculo de entropía y, por consiguiente, el factor discriminante obtenido es cercano a la unidad, permitiendo así el bloqueo de la función diferencial y, por tanto, logrando la energización del transformador.

5.1.5. Falla interna al 25% del devanado secundario

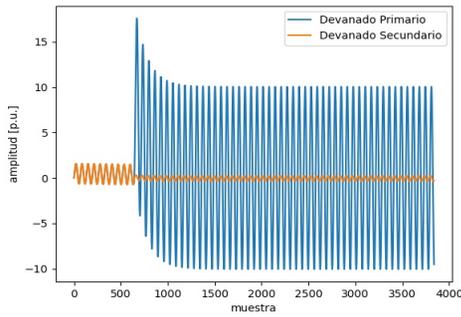
Dado que no es un gran porcentaje del devanado el involucrado en el evento, el resultado de la simulación y análisis de las señales de corriente presentado en la Figura 5.5 es similar al primer evento analizado, de falla interna, presentando un poco más de componente DC respecto de la magnitud del coeficiente de detalle número 1, debido a la disminución de la magnitud de la corriente de falla por la impedancia adicional del porcentaje de devanado fallado; aun así, se obtiene un comportamiento casi idéntico de los coeficientes de la transformada.

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.3642}{0.8484} = 0.4293 \rightarrow \text{disparo de función ANSI 87T}$$

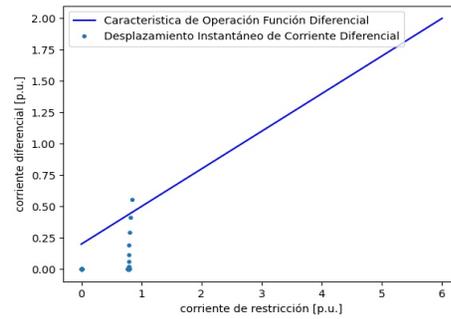
Como es de esperarse, incluso el coeficiente de discriminación obtenido es similar a los eventos previos de falla interna, generándose de esta manera la operación de la función de protección diferencial.

5.1.6. Falla interna al 85% del devanado secundario

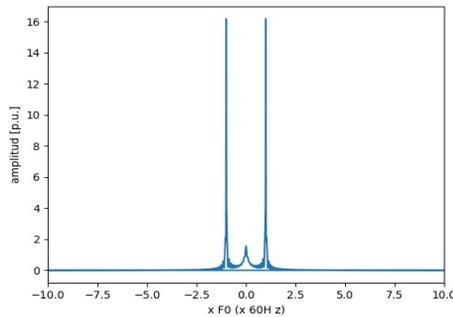
De la Figura 5.6, se observa la diferencia en magnitudes de las corrientes en ambos devanados del transformador, respecto de los eventos previos. Aun así, aunque la diferencia no es tan drástica como en casos anteriores, es suficiente para hacer operar la función diferencial.



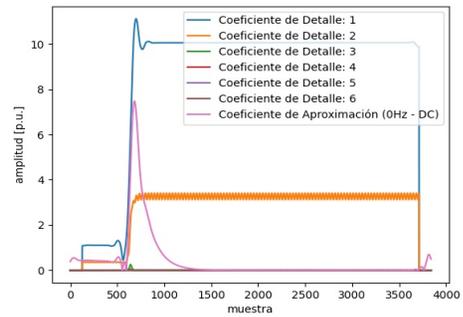
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta

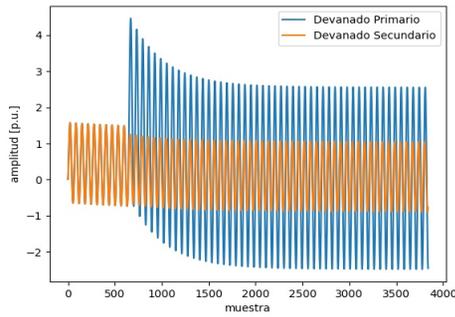


(d) Coeficientes de la DWT

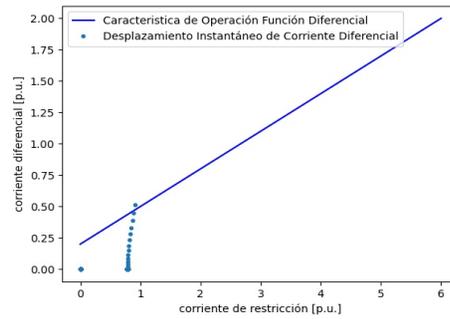
Figura 5.5: Resultados de evento de Falla Interna al 25% del Devanado.

Se tendrá un incremento en las magnitudes de los coeficientes de detalle de alta frecuencia en los ciclos cercanos al inicio de la falla debido a la distorsión generada por la interacción de las inductancias mutuas. Aunque no es apreciable dicho incremento en las gráficas presentadas gracias a la magnitud de los coeficientes de baja frecuencia, se observa la reducción en la entropía calculada para el método adaptativo respecto del no adaptativo, del 64%, logrando así discriminar adecuadamente este tipo de condiciones:

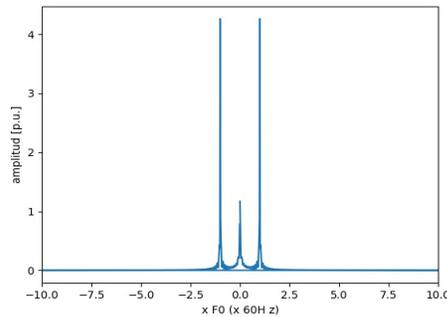
$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{0.3756}{0.8233} = 0.4562 \rightarrow \text{disparo de función ANSI 87T}$$



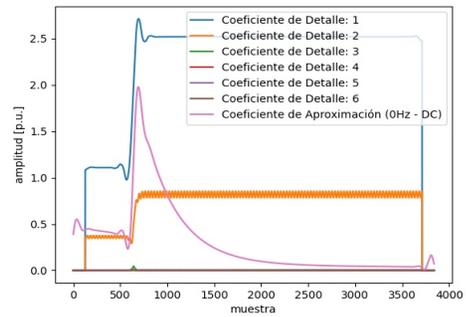
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta



(d) Coeficientes de la DWT

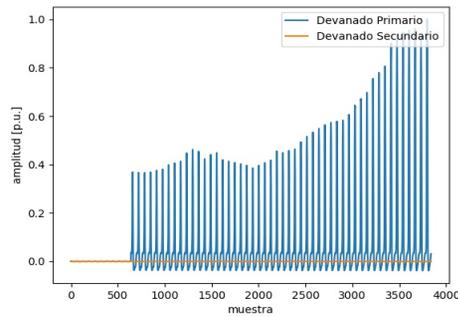
Figura 5.6: Resultados de evento de Falla Interna al 85% del Devanado.

Se obtiene igualmente, un coeficiente adecuado para permitir la operación de la función de protección diferencial de transformador.

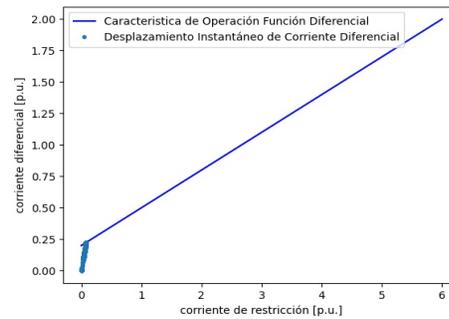
Para este evento, existirán en la práctica casos en los que la función de protección no llegue a detectar una condición de falla debido a las bajas magnitudes de corriente de falla obtenidas por la impedancia que representa el devanado fallado al sistema que alimente la falla. En dichos casos, el método propuesto no actuará dado que requiere de la activación de la función diferencial.

5.1.7. Sobreexcitación al 50%

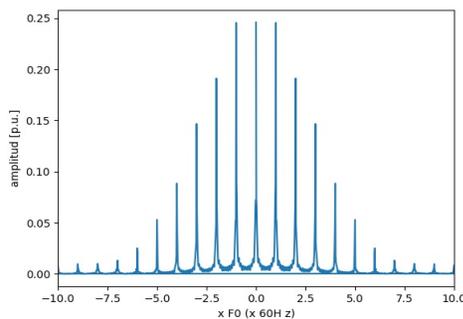
Este tipo de evento se caracteriza por su contenido de 5^{to} armónico, debido a la saturación del núcleo del transformador, generando el tipo de señal presentado en la gráfica superior izquierda de la Figura 5.7. Sin embargo, se trata de una condición operativa del sistema de potencia y no una falla interna del transformador, por lo que la función de protección diferencial no debería operar. Sin embargo, como se aprecia en la gráfica superior derecha, al igual que todos los eventos anteriores, la función se activa gracias a la diferencia de corrientes en ambos devanados del transformador.



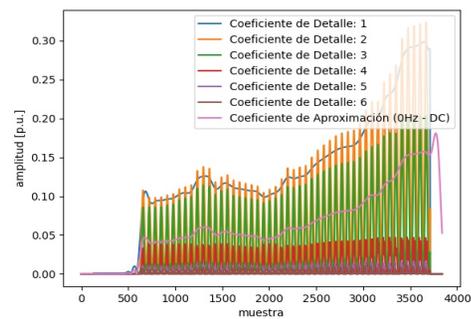
(a) Corrientes en alta y baja



(b) Evolución de corriente diferencial



(c) Espectro frec. de corriente en alta



(d) Coeficientes de la DWT

Figura 5.7: Resultados de evento de Sobreexcitación al 50%.

Debido a que las componentes de corriente de baja frecuencia o frecuencia industrial poseen una magnitud muy baja comparada con corrientes de falla, se aprecia de los coeficientes de la transformada obtenidos, magnitudes apreciables en los coeficientes de detalle de altas frecuencias, similar al caso de energización en vacío aunque con una forma de onda y comportamiento diferentes. Dicho contenido frecuencial permite, igualmente, mantener constante el resultado de entropía ante la variación del filtro tras la aplicación del método adaptativo, obteniendo un factor de discriminación prácticamente igual a 1 y, por consiguiente, generándose el bloqueo de la función diferencial.

$$R = \frac{H_{adap.}}{H_{conv.}} = \frac{1.0381}{1.0319} = 1.0060 \rightarrow \text{bloqueo de función ANSI 87T}$$

5.2. Análisis de Resultados

Se realiza el procedimiento descrito en el presente capítulo para cada uno de los casi 1000 (mil) casos simulados asociados con los catorce eventos de análisis establecidos. A manera de resumen, en cada caso se realiza el cálculo de corriente diferencial para cada ventana deslizante de 1 ciclo de frecuencia fundamental (60 Hz), para un total alrededor de 3840 ventanas de cálculo dado que las señales simuladas con 1 s de duración, contienen 3840 muestras.

Si en alguna de las ventanas de cálculo se detecta la activación de la función de protección diferencial, se calcula la *Transformada Wavelet Discreta* operada a partir del banco de filtros generado mediante las *O-Splines* en una ventana igualmente de 1 ciclo, a partir de la detección del evento. Se realiza el cálculo de la *Transformada Wavelet Discreta* bajo el método no adaptativo y, en paralelo, el cálculo de la *Transformada Wavelet Discreta* con el método adaptativo con base en el valor de corriente diferencial calculado, obteniendo para ambos casos la entropía de los coeficientes de la transformada,

mediante las cuales se calcula el factor de discriminación, R , que define si la condición analizada corresponde a una falla interna o si corresponde a un evento normal del sistema, tal como energización del transformador o sobreexcitación del mismo.

En la Tabla 5.1 se presenta, de manera resumida por tipo de evento, el desempeño general del método de discriminación desarrollado y el detalle completo de resultados para cada uno de los casos simulados se presenta en el Apéndice de este documento. El valor del factor discriminante, R , se presenta como límite a partir de los valores máximos o mínimos, según sea el caso y, en la columna de desempeño, se presenta el porcentaje de discriminación del total de casos analizados, para un umbral de factor discriminante igual a:

$$R = 0.7$$

En el desarrollo del método de discriminación, se encuentran determinantes los eventos de falla interna al 85%, debido a su bajo nivel de corriente de cortocircuito comparada con fallas en bornes, así como su incremento en contenido frecuencial gracias a las interacciones electromagnéticas entre los devanados y el núcleo del transformador. Estos eventos, dependiendo del método de análisis de las señales de corriente utilizado, puede llegar a obtener similares resultados que casos de sobreflujo o sobreexcitación.

Sin embargo, gracias al método adaptativo utilizado, se logra su distinción respecto de eventos que requieren bloqueo de la función diferencial, con un amplio margen de diferencia.

Tabla 5.1: Resumen Global de Resultados Obtenidos

Evento	I_{DIFF}	R	Desempeño	Λ
Falla Interna en Bornes	0.45	< 0.50	100 %	> 1.500
Falla Externa en Bornes	no trip			
Inrush + Carga + Falla Externa	no trip			
Inrush + Carga + Falla Interna	0.26	< 0.45	100 %	> 1.500
Inrush + Carga	no trip			
Inrush + Falla Externa	no trip			
Inrush + Falla Interna	0.26	< 0.45	100 %	> 1.500
Inrush en Vacío	0.23	> 1.00	100 %	< 0.025
Falla Interna al 25 %	0.56	< 0.55	100 %	> 0.9
Falla Interna al 85 %	0.51	< 0.55	100 %	$0.05 < \Lambda < 0.15$
Flujo Residual	0.25	> 0.80	100 %	< 0.04
Flujo Residual + Carga	no trip			
Sobreexcitación del 25 %	0.22	> 0.90	100 %	< 0.04
Sobreexcitación del 50 %	0.22	> 0.90	100 %	< 0.04

5.3. Wavelet Correlation Modes

Adicional al método expuesto, se realiza un proceso paralelo para incrementar la robustez de la discriminación. Este corresponde al post procesamiento de los coeficientes de la *Transformada Wavelet Discreta* mediante la obtención del *Máximo Valor Propio* de la *Matriz de Modos de Correlación* o *Wavelet Correlation Modes - WCM* [31], en lugar de la obtención de la *Entropía*. Esta herramienta ha demostrado importantes resultados y permite extraer características relevantes en el análisis de señales gracias al vector de valores propios asociado. Los *WCM* se definen como:

$$Y = \frac{Wf[n, s]xWf[n, s]^T}{N} \quad (5.1)$$

Siendo $Wf[n, s]$ la matriz de coeficientes de la *DWT* y N el número de muestras por ciclo de la señal bajo análisis. Posteriormente, se obtiene el máximo valor propio Λ de la matriz de los *WCM*, Y , utilizado de igual manera que el valor de *entropía*. Es decir, el valor propio, Λ , será el encargado de realizar la discriminación.

A través del máximo valor propio, como se observa de la Tabla 5.1, se logra discriminar tanto entre corrientes de energización y corrientes de falla interna, como el tipo de falla interna asociada con la señal de corriente bajo análisis. De esta manera, se identifican principalmente 3 rangos para fallas internas:

- $\Lambda > 1.5$: eventos de falla interna que no involucre algún porcentaje del devanado, por ejemplo, en bornes del transformador de potencia.
- $0.9 < \Lambda < 1.5$: eventos de falla de devanado a tierra, en porcentajes del devanado alrededor del 25%.
- $0.05 < \Lambda < 0.15$: eventos de falla de devanado a tierra, en porcentajes del devanado alrededor del 85%.

La anterior discriminación le da valor agregado al método desarrollado al permitir no solo realizar la discriminación objeto de la presente tesis, sino además, generar en el relevador una etiqueta de tipo de falla posible. Y, respecto de las condiciones que requieren generar el bloqueo de la función diferencial, no se requiere dicha discriminación dado que solo se requiere dicho bloqueo, de manera que se logre la conexión del transformador al sistema de potencia.

5.4. Conclusión

Al aplicar el método de propuesto, se logra un desempeño de discriminación del 100%. Para eventos de falla interna, se obtienen valores máximos de R de 0.55, con más

de un 20% de diferencia del umbral y, para eventos de energización, sobreexcitación flujo residual, se obtienen valores mínimos de 0.8 correspondientes un 15% superior al umbral, valor adecuado teniendo en cuenta las precisiones de los transformadores de corriente y relevadores del mercado, con errores no mayores al 10%.

Por lo anterior, se logra discriminar adecuadamente las corrientes de energización, corrientes de sobreexcitación y corrientes de flujo residual de las corrientes de falla interna incluyendo fallas en bornes y fallas en determinado porcentaje del devanado secundario, logrando el objetivo establecido en la sección 1.4.1, permitiendo implementar de manera confiable el bloqueo de la función diferencial de transformador para condiciones diferentes de falla interna.

Capítulo 6

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la implementación y desarrollo del método de discriminación y se proponen los trabajos futuros a desarrollar para complementar este método.

6.1. Conclusiones

Se presenta en esta tesis un nuevo método adaptativo de discriminación entre corrientes de energización y corrientes de falla interna a partir de la descomposición de las señales de corriente del transformador mediante la *Transformada Wavelet Discreta*, utilizando como función *Wavelet* madre las *O-Splines* armónicas, con las cuales se obtuvo el banco de filtros requerido por la transformada. Se diseña un algoritmo a partir del método tradicional y proponiendo además un nuevo método adaptativo, con el que se discriminan las corrientes de energización, corrientes de sobreexcitación y corrientes de flujo residual de las corrientes de falla interna incluyendo fallas en bornes y fallas en determinado porcentaje del devanado secundario.

Al aplicar el método de discriminación obtenido con el desarrollo de esta tesis, es

posible implementar de manera confiable el bloqueo de la función diferencial de transformador para condiciones diferentes de falla interna, con un desempeño de discriminación del 100%. Es decir, con el valor de umbral propuesto en el presente trabajo, es posible discriminar correctamente entre eventos de falla interna, energización, sobreexcitación y flujo residual. Los valores de dichos umbrales toman en cuenta las precisiones de los CTs y relevadores del mercado, con errores no mayores al 10%.

Al utilizar un parámetro no ligado a un transformador de potencia sino que varíe de acuerdo con todas las condiciones y características del sistema de potencia (relaciones de transformación, errores, niveles de falla, niveles de DC), como lo es el valor de corriente diferencial, además de la flexibilidad de aplicar la *DWT* en unión con las *O-Splines*, fue posible obtener un algoritmo sólido y con un error del 0% en la discriminación entre corrientes de energización y corrientes de falla interna, con márgenes de tolerancia suficientes con respecto al umbral del factor de discriminación seleccionado. Cabe destacar que dicho umbral se seleccionó teniendo en cuenta las precisiones de los elementos de medida. De esta manera se logró la adaptabilidad del método de discriminación, la cual aplicará para cualquier condición del sistema de potencia siendo independiente de las características del transformador.

Modelo de Simulación:

Teniendo en cuenta que el objetivo de la tesis corresponde con la discriminación entre corrientes de energización y corrientes de falla interna, el utilizar el programa de simulación (EMTP, PSCAD), permitió la simulación de diferentes tipos de eventos (corriente de energización, de sobreexcitación y flujo residual), para los cuales se requiere el bloqueo de la función de protección diferencial; así mismo, las fallas internas se dividen en varias condiciones incluyendo, gracias a la flexibilidad de la herramienta de simulación, fallas de devanado a tierra.

Estas últimas, simuladas al 25 % y al 85 % del devanado secundario, requirieron programación en *Fortran* dado que el modelo de transformador de potencia disponible en la librería del PSCAD no cuenta con uno ya desarrollado para este tipo de fallas. Y, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta tesis, específicamente las fallas al 85 % fueron determinantes en el desarrollo del método debido al contenido frecuencial que presentaban algunos casos.

De esta manera se simularon los eventos más importantes para el desarrollo del método de discriminación.

Herramientas Matemáticas:

Debido a que en las señales de corriente asociadas con eventos de energización de transformador, el fenómeno fundamental es frecuencial, es decir, una señal senoidal alterada por el contenido frecuencial generado por la magnetización y saturación del núcleo del transformador, la *Transformada Wavelet* se observa como herramienta matemática adecuada y fundamental en la descomposición de las señales de corriente. Esta descomposición en el tiempo, del contenido frecuencial de la señal, demostró en esta tesis que permite obtener las características relevantes para la obtención del método de discriminación implementado.

Dicha descomposición, fue posible gracias al banco de filtros obtenido de la función armónica de las *O-Splines*. Esta herramienta matemática toma importancia gracias, primero, a su esencia, asociada con la estimación fasorial de las señales del sistema de potencia para eventos de oscilación de potencia, donde la frecuencia del fasor varía en el tiempo y, segundo, debido a que a través de la exponencial de la función armónica, es posible tener el control de las frecuencias centrales de los filtros, de manera que pueda obtenerse el banco de filtros requerido por la *DWT* y, además, generar la

adaptabilidad buscada por el método de discriminación.

Posteriormente, el valor de entropía obtenido de cada evento, permite la obtención de un factor de discriminación mediante el cual es posible detectar, con una precisión del 100% de los eventos analizados, si la señal de corriente bajo análisis corresponde a un evento de energización, flujo residual o sobreexcitación, que requieren el bloqueo de la protección diferencial o si, por el contrario, corresponde a una falla interna, en cualquiera de las variaciones simuladas, que requiere la desconexión del transformador a través de la actuación de la función de protección diferencial.

Se da robustez al método desarrollado, al implementar el post procesamiento de los coeficientes de la transformada a través de la matriz de *Modos de Correlación Wavelet* (*Wavelet Correlation Modes*), dado que no solo se realiza la discriminación buscada, sino además, es posible generar en el relevador una etiqueta con el tipo de falla interna: falla en bornes o fallas en devanados discriminando incluso la ubicación de la falla.

6.2. Trabajo futuro

Modelo del Transformador:

Con el fin de validar el comportamiento del método desarrollado ante señales de corriente con mayor alteración, se recomienda implementar el modelo: 1.) de transformador trifásico, 2.) tipo *XFMR* y, 3.) preferiblemente tipo *Three Leg Stacked*. Este modelo, gracias a tener un mayor detalle en el modelamiento del núcleo, así como de las capacitancias del transformador, permitirá la obtención de corrientes de falla interna y corrientes de energización con mayor grado de precisión respecto de señales reales, gracias a la interacción electromagnética entre las corrientes de cada devanado.

Por lo anterior, se requerirá, adicionalmente, el desarrollo del modelo de falla interna en transformador trifásico, para el cual existen varios estudios y, de mayor reto aún, su desarrollo para el transformador *XFMR* cuya literatura al respecto se encuentra limitada.

Tipos de Eventos:

Aunque la selección de transformadores de corriente se realiza de manera tal que se evite la saturación de los transformadores de corriente asociados con las protección diferenciales en general, realizándose típicamente estudios de validación de saturación, se recomienda la inclusión de eventos de falla externa que contengan saturación de CTs, dado que, aunque es una práctica común el análisis mencionado, no siempre se realiza o, en la etapa de montaje, pueden llegar a utilizarse elementos de diferentes características a las especificadas por la ingeniería, dejando a la protección diferencial el trabajo de discriminar y operar adecuadamente ante este tipo de eventos.

Se recomienda, además, realizar un barrido en la ubicación de la falla para el evento de falla de devanado, de manera que se obtenga una sensibilización en el resultado del valor propio, Λ , calculado a partir del *Wavelet Correlation Mode*. De esta manera, se podrá obtener un mayor detalle en los rangos presentados en esta tesis y generar un mayor detalle en la identificación del porcentaje de devanado fallado.

Capítulo 7

Apéndice

7.1. Resultado Detallado

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
0	FallaBoquillasSolid-01	0.4492	Trip	0.3446	0.8370	0.4117
1	FallaBoquillasSolid-02	0.5131	Trip	0.3768	0.8774	0.4295
2	FallaBoquillasSolid-03	0.5386	Trip	0.3991	0.8604	0.4639
3	FallaBoquillasSolid-04	0.5284	Trip	0.3006	0.8198	0.3667
4	FallaBoquillasSolid-05	0.4877	Trip	0.2751	0.8534	0.3224
5	FallaBoquillasSolid-06	0.4226	Trip	0.2717	0.8982	0.3025
6	FallaBoquillasSolid-07	0.4985	Trip	0.2718	0.9238	0.2942
7	FallaBoquillasSolid-08	0.5695	Trip	0.2719	0.9320	0.2917
8	FallaBoquillasSolid-09	0.5695	Trip	0.2719	0.9320	0.2917
9	FallaBoquillasSolid-10	0.4426	Trip	0.2719	0.9375	0.2900
10	FallaBoquillasSolid-11	0.4872	Trip	0.2716	0.9410	0.2886
11	FallaBoquillasSolid-12	0.5272	Trip	0.2712	0.9432	0.2875
12	FallaBoquillasSolid-13	0.5621	Trip	0.2707	0.9446	0.2866

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
13	FallaBoquillasSolid-14	0.5916	Trip	0.2702	0.9416	0.2870
14	FallaBoquillasSolid-15	0.6153	Trip	0.2700	0.9376	0.2880
15	FallaBoquillasSolid-16	0.6331	Trip	0.2707	0.9335	0.2900
16	FallaBoquillasSolid-17	0.4290	Trip	0.2716	0.9300	0.2920
17	FallaBoquillasSolid-18	0.4344	Trip	0.2728	0.9251	0.2949
18	FallaBoquillasSolid-19	0.4344	Trip	0.2728	0.9251	0.2949
19	FallaBoquillasSolid-20	0.4355	Trip	0.2750	0.9208	0.2987
71	FallaExtSolidabien-01	notrip	-	-	-	-
141	InrushCargaFE-01	notrip	-	-	-	-
212	InrushCargaFI-01	0.2640	Trip	0.3469	0.8500	0.4081
213	InrushCargaFI-02	0.2019	Trip	0.3669	0.8963	0.4093
214	InrushCargaFI-03	0.2045	Trip	0.3110	0.8150	0.3816
215	InrushCargaFI-04	0.2811	Trip	0.2740	0.8352	0.3281
216	InrushCargaFI-05	0.2353	Trip	0.2673	0.8844	0.3022
217	InrushCargaFI-06	0.2861	Trip	0.2681	0.9173	0.2923
218	InrushCargaFI-07	0.2081	Trip	0.2690	0.9272	0.2901
219	InrushCargaFI-08	0.2081	Trip	0.2690	0.9272	0.2901
220	InrushCargaFI-09	0.2380	Trip	0.2694	0.9339	0.2885
221	InrushCargaFI-10	0.2656	Trip	0.2692	0.9385	0.2868
222	InrushCargaFI-11	0.2907	Trip	0.2688	0.9417	0.2854
223	InrushCargaFI-12	0.3130	Trip	0.2683	0.9438	0.2843
224	InrushCargaFI-13	0.3322	Trip	0.2678	0.9451	0.2834
225	InrushCargaFI-14	0.3483	Trip	0.2705	0.9454	0.2861
226	InrushCargaFI-15	0.3610	Trip	0.2756	0.9415	0.2927
227	InrushCargaFI-16	0.2072	Trip	0.2985	0.9417	0.3170
228	InrushCargaFI-17	0.2110	Trip	0.3006	0.9380	0.3205

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
229	InrushCargaFI-18	0.2128	Trip	0.3010	0.9341	0.3222
230	InrushCargaFI-19	0.2128	Trip	0.3010	0.9341	0.3222
231	InrushCargaFI-20	0.2125	Trip	0.3000	0.9300	0.3226
283	InrushCargaumec-01	notrip	-	-	-	-
354	InrushVacioFE-01	notrip	-	-	-	-
425	InrushVacioFI-01	0.2643	Trip	0.3469	0.8500	0.4081
426	InrushVacioFI-02	0.2021	Trip	0.3669	0.8963	0.4093
427	InrushVacioFI-03	0.2047	Trip	0.3110	0.8150	0.3816
428	InrushVacioFI-04	0.2813	Trip	0.2740	0.8352	0.3281
429	InrushVacioFI-05	0.2356	Trip	0.2673	0.8844	0.3022
430	InrushVacioFI-06	0.2865	Trip	0.2681	0.9173	0.2923
431	InrushVacioFI-07	0.2085	Trip	0.2690	0.9272	0.2901
432	InrushVacioFI-08	0.2085	Trip	0.2690	0.9272	0.2901
433	InrushVacioFI-09	0.2384	Trip	0.2694	0.9339	0.2885
434	InrushVacioFI-10	0.2661	Trip	0.2692	0.9385	0.2868
435	InrushVacioFI-11	0.2912	Trip	0.2688	0.9417	0.2854
436	InrushVacioFI-12	0.3135	Trip	0.2683	0.9438	0.2843
437	InrushVacioFI-13	0.3328	Trip	0.2678	0.9451	0.2834
438	InrushVacioFI-14	0.3489	Trip	0.2705	0.9454	0.2861
439	InrushVacioFI-15	0.2020	Trip	0.2946	0.9453	0.3116
440	InrushVacioFI-16	0.2078	Trip	0.2985	0.9417	0.3170
441	InrushVacioFI-17	0.2116	Trip	0.3006	0.9380	0.3205
442	InrushVacioFI-18	0.2132	Trip	0.3007	0.9336	0.3221
443	InrushVacioFI-19	0.2132	Trip	0.3007	0.9336	0.3221
444	InrushVacioFI-20	0.2131	Trip	0.3000	0.9300	0.3226
496	InrushVacioumec-01	0.2074	Block	0.9677	0.9138	1.0590

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
497	InrushVacíoumec-02	0.2159	Block	0.9560	0.8957	1.0673
498	InrushVacíoumec-03	0.2191	Block	0.9591	0.8974	1.0688
499	InrushVacíoumec-04	0.2158	Block	0.9564	0.8963	1.0671
500	InrushVacíoumec-05	0.2060	Block	0.9673	0.9139	1.0584
501	InrushVacíoumec-06	0.2123	Block	0.9763	0.9311	1.0485
502	InrushVacíoumec-07	0.2135	Block	0.9853	0.9493	1.0379
503	InrushVacíoumec-08	0.2135	Block	0.9853	0.9493	1.0379
504	InrushVacíoumec-09	0.2117	Block	1.0167	0.9948	1.0220
505	InrushVacíoumec-10	notrip	-	-	-	-
506	InrushVacíoumec-11	notrip	-	-	-	-
507	InrushVacíoumec-12	notrip	-	-	-	-
508	InrushVacíoumec-13	notrip	-	-	-	-
509	InrushVacíoumec-14	notrip	-	-	-	-
510	InrushVacíoumec-15	notrip	-	-	-	-
511	InrushVacíoumec-16	notrip	-	-	-	-
512	InrushVacíoumec-17	notrip	-	-	-	-
513	InrushVacíoumec-18	notrip	-	-	-	-
514	InrushVacíoumec-19	notrip	-	-	-	-
515	InrushVacíoumec-20	notrip	-	-	-	-
567	intfallaprim25-01	0.5580	Trip	0.3642	0.8484	0.4293
568	intfallaprim25-02	0.4694	Trip	0.4107	0.8919	0.4605
569	intfallaprim25-03	0.4939	Trip	0.4636	0.9248	0.5013
570	intfallaprim25-04	0.4887	Trip	0.3205	0.8311	0.3856
571	intfallaprim25-05	0.4545	Trip	0.2883	0.8411	0.3428
572	intfallaprim25-06	0.5452	Trip	0.2785	0.8821	0.3157
573	intfallaprim25-07	0.4717	Trip	0.2754	0.9133	0.3015

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
574	intfallaprim25-08	0.4717	Trip	0.2754	0.9133	0.3015
575	intfallaprim25-09	0.5357	Trip	0.2747	0.9263	0.2966
576	intfallaprim25-10	0.5944	Trip	0.2744	0.9327	0.2942
577	intfallaprim25-11	0.4729	Trip	0.2741	0.9370	0.2925
578	intfallaprim25-12	0.5096	Trip	0.2738	0.9399	0.2913
579	intfallaprim25-13	0.5413	Trip	0.2736	0.9418	0.2905
580	intfallaprim25-14	0.5677	Trip	0.2735	0.9409	0.2907
581	intfallaprim25-15	0.5888	Trip	0.2735	0.9380	0.2916
582	intfallaprim25-16	0.6041	Trip	0.2737	0.9346	0.2929
583	intfallaprim25-17	0.6136	Trip	0.2744	0.9309	0.2948
584	intfallaprim25-18	0.6172	Trip	0.2756	0.9265	0.2975
585	intfallaprim25-19	0.6172	Trip	0.2756	0.9265	0.2975
586	intfallaprim25-20	0.6148	Trip	0.2775	0.9224	0.3008
637	intfallaprim85-01	0.4494	Trip	0.3756	0.8233	0.4562
638	intfallaprim85-02	0.4646	Trip	0.3827	0.8453	0.4527
639	intfallaprim85-03	0.4718	Trip	0.4660	0.9225	0.5051
640	intfallaprim85-04	0.4711	Trip	0.3254	0.7845	0.4148
641	intfallaprim85-05	0.4607	Trip	0.2952	0.7948	0.3714
642	intfallaprim85-06	0.4447	Trip	0.2862	0.8304	0.3447
643	intfallaprim85-07	0.4856	Trip	0.2849	0.8651	0.3293
644	intfallaprim85-08	0.4856	Trip	0.2849	0.8651	0.3293
645	intfallaprim85-09	0.4561	Trip	0.2827	0.8879	0.3184
646	intfallaprim85-10	0.4856	Trip	0.2821	0.9016	0.3129
647	intfallaprim85-11	0.5104	Trip	0.2820	0.9087	0.3103
648	intfallaprim85-12	0.4641	Trip	0.2824	0.9120	0.3096
649	intfallaprim85-13	0.4787	Trip	0.2832	0.9130	0.3102

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
650	intfallaprim85-14	0.4888	Trip	0.2847	0.9124	0.3120
651	intfallaprim85-15	0.4941	Trip	0.2864	0.9108	0.3144
652	intfallaprim85-16	0.4947	Trip	0.2883	0.9085	0.3173
653	intfallaprim85-17	0.4906	Trip	0.2905	0.9055	0.3208
654	intfallaprim85-18	0.4817	Trip	0.2928	0.9021	0.3246
655	intfallaprim85-19	0.4817	Trip	0.2928	0.9021	0.3246
656	intfallaprim85-20	0.4682	Trip	0.2954	0.8985	0.3288
707	Residualfluxload-01	notrip	-	-	-	-
778	Residualflux-01	0.2217	1299	0.9669	0.9189	1.0522
779	Residualflux-02	0.2119	1302	0.9905	0.9719	1.0191
780	Residualflux-03	notrip	-	-	-	-
781	Residualflux-04	notrip	-	-	-	-
782	Residualflux-05	notrip	-	-	-	-
783	Residualflux-06	notrip	-	-	-	-
784	Residualflux-07	notrip	-	-	-	-
785	Residualflux-08	notrip	-	-	-	-
786	Residualflux-09	notrip	-	-	-	-
787	Residualflux-10	notrip	-	-	-	-
788	Residualflux-11	notrip	-	-	-	-
789	Residualflux-12	notrip	-	-	-	-
790	Residualflux-13	notrip	-	-	-	-
791	Residualflux-14	notrip	-	-	-	-
792	Residualflux-15	notrip	-	-	-	-
793	Residualflux-16	notrip	-	-	-	-
794	Residualflux-17	notrip	-	-	-	-
795	Residualflux-18	notrip	-	-	-	-

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
796	Residualflux-19	notrip	-	-	-	-
797	Residualflux-20	notrip	-	-	-	-
807	Residualflux-30	notrip	-	-	-	-
849	Sobreexcitacion25-01	notrip	-	-	-	-
850	Sobreexcitacion25-02	notrip	-	-	-	-
851	Sobreexcitacion25-03	notrip	-	-	-	-
852	Sobreexcitacion25-04	notrip	-	-	-	-
853	Sobreexcitacion25-05	notrip	-	-	-	-
854	Sobreexcitacion25-06	notrip	-	-	-	-
855	Sobreexcitacion25-07	notrip	-	-	-	-
856	Sobreexcitacion25-08	notrip	-	-	-	-
857	Sobreexcitacion25-09	notrip	-	-	-	-
858	Sobreexcitacion25-10	0.2172	Block	1.0088	0.9849	1.0243
859	Sobreexcitacion25-11	0.2323	Block	0.9808	0.9323	1.0520
860	Sobreexcitacion25-12	0.2186	Block	0.9571	0.8861	1.0801
861	Sobreexcitacion25-13	0.2264	Block	0.9426	0.8792	1.0721
862	Sobreexcitacion25-14	0.2243	Block	0.9109	0.8805	1.0345
863	Sobreexcitacion25-15	0.2133	Block	0.8975	0.8969	1.0007
864	Sobreexcitacion25-16	0.2406	Block	0.8815	0.8901	0.9903
865	Sobreexcitacion25-17	0.2145	Block	0.8867	0.8880	0.9985
866	Sobreexcitacion25-18	0.2325	Block	0.8739	0.8993	0.9718
867	Sobreexcitacion25-19	0.2325	Block	0.8739	0.8993	0.9718
868	Sobreexcitacion25-20	0.2387	Block	0.8709	0.8981	0.9697
920	Sobreexcitacion50-01	0.2019	Block	1.0278	1.0222	1.0055
921	Sobreexcitacion50-02	notrip	-	-	-	-
922	Sobreexcitacion50-03	notrip	-	-	-	-

Continuación en siguiente página .

Número	Evento	I_{diff} [p.u.]	ANSI 87T	$\Lambda_{adap.}$	$\Lambda_{conv.}$	R
923	Sobreexcitacion50-04	0.2015	Block	1.0513	1.0463	1.0048
924	Sobreexcitacion50-05	0.2022	Block	1.0442	1.0389	1.0051
925	Sobreexcitacion50-06	0.2141	Block	1.0203	1.0092	1.0110
926	Sobreexcitacion50-07	0.2105	Block	0.9918	0.9513	1.0426
927	Sobreexcitacion50-08	0.2105	Block	0.9918	0.9513	1.0426
928	Sobreexcitacion50-09	0.2418	Block	0.9693	0.8987	1.0786
929	Sobreexcitacion50-10	0.2197	Block	0.9451	0.8799	1.0741
930	Sobreexcitacion50-11	0.2290	Block	0.9127	0.8901	1.0254
931	Sobreexcitacion50-12	0.2292	Block	0.8839	0.8922	0.9907
932	Sobreexcitacion50-13	0.2211	Block	0.8741	0.9005	0.9707
933	Sobreexcitacion50-14	0.2054	Block	0.8644	0.9023	0.9580
934	Sobreexcitacion50-15	0.2392	Block	0.8470	0.8970	0.9443
935	Sobreexcitacion50-16	0.2088	Block	0.8433	0.9028	0.9341
936	Sobreexcitacion50-17	0.2302	Block	0.8370	0.9039	0.9260
937	Sobreexcitacion50-18	0.2470	Block	0.8264	0.8991	0.9191
938	Sobreexcitacion50-19	0.2470	Block	0.8264	0.8991	0.9191
939	Sobreexcitacion50-20	0.2566	Block	0.8181	0.8926	0.9165

Tabla 7.1: Resultado Detallado

Bibliografía

- [1] Power System Relaying Committee. Ieee guide for protective relay applications to power transformers. *ANSI/IEEE C37.91*, 2008.
- [2] Alstom. *Network Protection and Automation Guide*. Alstom, 2011.
- [3] Sajad Bagheri, Zahra Moravej, and Gevork B. Gharehpetian. Classification and discrimination among winding mechanical defects, internal and external electrical faults, and inrush current of transformer. 2018.
- [4] Mario Orlando Oliveira, Arturo Suman Bretas, and Gustavo Dornelles Ferreira. Adaptive differential protection of three-phase power transformers based on transient signal analysis. *Science Direct Electrical Power and Energy Systems*, (57):366–374, 2014.
- [5] A. M. Gaouda and M. M. A. Salama. Dsp wavelet-based tool for monitoring transformer inrush currents and internal faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010.
- [6] Yucong Zhao and Peter Crossley. Countermeasure to prevent the incorrect blocking of differential protection applied to converter transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020.

- [7] Daniel Guillén, Hector Esponda, Ernesto Vázquez, and Gina Idárraga Ospina. Algorithm for transformer differential protection based on wavelet correlation modes. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 10(12):2871–2879, 2016.
- [8] Farshid Naseri, Zahra Kazemi, Mohammad Mehdi Arefi, and Ebrahim Farjah. Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: An extended kalman filter-based approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1), 2018.
- [9] Hector Esponda, Ernesto Vázquez, and Manuel A. Andrade. A setting-free differential protection for power transformers based on second central moment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), 2019.
- [10] Abdolreza Behvandi, Seyed Ghodratollah Seifossadat, and Alireza Saffarian. A new method for discrimination of internal fault from other transient states in power transformer using clarke's transform and modified hyperbolic stransform. *Science Direct Electric Power Systems Research*, 2020.
- [11] Raidson Jenner Negreiros de Alencar and André Maurício Damasceno Ferreira. Transformer inrush currents and internal faults identification in power transformers using wavelet energy gradient. *SPRINGER Control Autom Electr Syst*, (27):339–348, 2016.
- [12] Osama E. Gouda, Adel Z. El Dein, and I. Moukhtar. Performance of transformer differential relay at different neutral grounding resistance based on wavelet transform. *SPRINGER Electr Eng*, (99):275–284, 2017.
- [13] Rodrigo Prado Medeiros and Flavio Bezerra Costa. A wavelet-based transformer differential protection with differential current transformer saturation and cross-country fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(2), 2018.

- [14] Rodrigo Prado Medeiros and Flavio Bezerra Costa. A wavelet-based transformer differential protection: Internal fault detection during inrush conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(6), 2018.
- [15] John G. Grainger and William D. Stevenson. *Power System Analysis*. McGraw Hill, 2015.
- [16] Stepehn Chapman J. *Máquinas eléctricas*, volume 5. McGraw Hill, 2012.
- [17] J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin. *Protective Relaying - Principles and Applications*, volume 3. CRC Press, 2006.
- [18] P. M. Anderson. *Power System Protection*. IEEE Press and Wiley Interscience, 1999.
- [19] Víctor Marín. Diseño de un sistema de bloqueo de una protección diferencial de transformadores mediante el uso de la transformada wavelet. *Tesis de Maestría*, 2010.
- [20] MathWorks R2021a. Saturable transformer with hysteresis. 2021.
- [21] M. A. Laughton and D. J. Warne. *Electrical Engineer's Reference Book*, volume 16. Science Direct - Elsevier, 2003.
- [22] Stéphane Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing - The Sparse Way*, volume 3. Science Direct - Elsevier, 2009.
- [23] Gabriel Benmouyal, E. O. Schweitzer, and A. Guzmán. Synchronized phasor measurement in protective relays for protection, control, and analysis of electric power systems. *Wide-Area Protection and Control Systems: A Collection of Technical Papers Representing Modern Solutions*, 2017.
- [24] K.M. Silva and B.F. Küsel. Dft based phasor estimation algorithm for numerical digital relaying. *Electronics Letters*, 49(6):412–414, 2013.

- [25] Zhengyou He. *Wavelet Analysis and Transient Signal Processing Applications for Power Systems*. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd., 2016.
- [26] Filip Wasilewski. Wavelet properties browser. 2021.
- [27] MathWorks R2021a. Introduction to wavelet families. 2021.
- [28] José Antonio de la O Serna. Analyzing power oscillating signals with the o-splines of the discrete taylor–fourier transform. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 2018.
- [29] José Antonio de la O Serna. Dynamic harmonic analysis with fir filters designed with o-splines. *IEEE Transactions on Circuits and Systems–I: Regular Papers*, 2020.
- [30] Zhengyou He. Wavelet analysis and transient signal processing applications for power systems. 2016.
- [31] Daniel Guillén, Hector Esponda, Ernesto Vázquez, and Gina Idárraga Ospina. Algorithm for transformer differential protection based on wavelet correlation modes. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(12):2871–2879, 2016.