



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA



DISCRIMINACIÓN ENTRE LAS CORRIENTES DE INRUSH Y
CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA USANDO
TRANSFORMADA DE WAVELET Y MÁQUINAS DE VECTORES DE
SOPORTE

AUTOR: Ing. Gabriel Aljibes Loreto

Bárbula, Abril de 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA



DISCRIMINACIÓN ENTRE LAS CORRIENTES DE INRUSH Y
CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA USANDO
TRANSFORMADA DE WAVELET Y MÁQUINAS DE VECTORES DE
SOPORTE

AUTOR: Ing. Gabriel Aljibes Loreto
TUTOR: Ing. Carlos Jiménez, Msc.

Bárbula, Abril de 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA



DISCRIMINACIÓN ENTRE LAS CORRIENTES DE INRUSH Y
CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA USANDO
TRANSFORMADA DE WAVELET Y MÁQUINAS DE VECTORES DE
SOPORTE

AUTOR: Ing. Gabriel Aljibes Loreto

Trabajo presentado ante el Área de Estudios de
Postgrado de la Universidad de Carabobo para
Optar al Título de Magister en Ingeniería Eléctrica

Bárbula, Abril de 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA



VEREDICTO

Nosotros, Miembros del Jurado designado para la evaluación del Trabajo de Grado titulado: **DISCRIMINACIÓN ENTRE LAS CORRIENTES DE INRUSH Y CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA USANDO TRANSFORMADA DE WAVELET Y MÁQUINAS DE VECTORES DE SOPORTE**, presentado por: **Gabriel Aljibes Loreto**, para optar al Título de **Magíster en Ingeniería Eléctrica**, estimamos que el mismo reúne los requisitos para ser considerado como: **Aprobado**

NOMBRE Y APELLIDO

C.I.

FIRMA

Bárbula, Abril de 2015

Dedicatoria

A Dios, por regalarme la oportunidad de vivir intentando agradarte cada día.

Para ti mi bendición y mi amor. Ana, por ese don de mostrarme la mejor versión de mí, sin ello no hubiese sido posible.

A mi madre Milagros, quien ha sido mi fuente de inspiración para verla feliz y sonriendo, gracias por enseñarme a vivir.

A mi padre Pascual, porque sé que esto lo escribimos juntos.

A mi hermana Tere, llegamos a este mundo juntos, espero pronto verte y seguir disfrutando de lo sencillo que es divertirse mientras se vive.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas aquellas personas que estuvieron allí directamente o indirectamente para ayudar en la realización de este trabajo, entre ellos al profesor Carlos Jiménez por la valiosa colaboración ofrecida, por su apoyo incondicional y por sobre todo su sincera amistad.

También quiero agradecer al doctor Gabriel Bastidas, a él muchas gracias.

Agradezco a los profesores César Seijas y Sergio Villasana por sus asesorías.

Por último quiero darles mis agradecimientos a mis amigos Alejandro Machado y Carlos Mejías, porque siempre estuvieron incondicionalmente allí para ayudarme.

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XIII
Índice de Tablas	XV
Resumen	XVII
Introducción	1
CAPÍTULO I	
EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Objetivos de la Investigación.....	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos Específicos.....	5
1.3 Justificación de la Investigación.....	5
1.4 Alcance y delimitación.....	6
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases teóricas.....	8
2.2.1 Fundamentos del Transformador de Potencia.....	8
2.2.1.1 Circuitos Magnéticos Excitados con Corriente Alterna.....	9
2.2.1.2 Características de los Materiales Magnéticos.....	10
2.2.1.3 Teoría del Transformador Monofásico.....	13
2.2.1.4 Corriente Transitoria de Energización en Transformadores.....	14

2.2.2 Corriente Transitoria de Cortocircuito en los Transformadores...	20
2.2.3 Métodos Actuales de Insensibilización de los Relés Diferenciales para Evitar operaciones Incorrectas por Efecto de las Corrientes Inrush.....	21
2.2.3.1 Bloqueo en Energización.....	22
2.2.3.2 Bloqueo por la Segunda Armónica.....	22
2.2.3.3 Bloqueo por Distorsión en la Forma de Onda.....	23
2.2.3.4 Otros métodos de Insensibilización de los Relés Diferenciales para Evitar operaciones Incorrectas por Efecto de las Corrientes Inrush.....	23
2.2.4 Transformada de wavelet.....	25
2.2.4.1 Tipos de wavelet.....	29
2.2.5 Máquinas de vectores de soporte.....	29
2.2.5.1 Caso linealmente separable.....	29
2.2.5.2 Caso no linealmente separable.....	32
2.2.5.3 Máquinas de Vectores de Soportes no Lineales.....	34
2.2.5.4 Funciones Kernel.....	34

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO.....	36
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	36
3.2 Técnicas de recolección de datos.....	36
3.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	37
3.4 Procedimiento metodológico.....	37
3.4.1 Fase I: Selección de un modelo que emule a un transformador de potencia para extraer los rasgos de las corrientes de Inrush y cortocircuito.....	37
3.4.2 Fase II: Procesamiento de las corrientes de Inrush y cortocircuito empleando la Transformada de Wavelet para obtener	37

los rasgos de cada una de estas señales.....	
3.4.3 Fase III: Entrenamiento de Máquinas de Vectores de Soporte a partir de los rasgos extraídos de las corrientes de Irush y cortocircuito.....	38
 CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	
4.1 Modelación de la saturación y la histéresis en el transformador....	39
4.2 Esquema de potencia utilizado como referencia.....	40
4.3 Premisas de simulación para la obtención de rasgos característicos de las señales de Irush y cortocircuito.....	45
4.4 Obtención de rasgos característicos de las señales de Irush y cortocircuito implementando la transformada de wavelet.....	49
4.5 Señales de corriente que serán utilizadas para el entrenamiento de las máquinas de vectores de soporte.....	53
4.6 Entrenamiento de las máquinas de vectores de soporte a partir de los rasgos obtenidos en el período de observación.....	54
4.7 Máquinas de vectores de soporte seleccionadas.....	57
4.8 Desempeño de las máquinas de vectores de soporte seleccionadas	59
 CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	
5.1 Conclusiones.....	62
5.2 Recomendaciones.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 FEM Inducida en una bobina.....	10
2.2 Curvas de Inrush para los campos magnéticos.....	11
2.3 Ciclo de Histéresis.....	12
2.4 Circuito de un transformador ideal asumiendo resistencia cero.....	13
2.5 Circuito de un transformador real.....	14
2.6 Flujo de energización cuando la tensión en bornes es cero.....	18
2.7 Corriente de Inrush y voltaje aplicado en función del tiempo.....	19
2.8 Corriente de Inrush versus el tiempo.....	19
2.9 Corriente de cortocircuito transitoria y permanente.....	21
2.10 Discriminación entre corrientes de cortocircuito o por Inrush.....	23
2.11 Esquema del proceso de filtrado.....	27
2.12 Proceso de decimación.....	28
2.13 Árbol de descomposición de wavelet con 3 niveles.....	28
2.14 Clasificación caso linealmente separable.....	29
2.15 Clasificación caso no linealmente separable.....	32
3.1 Esquema Metodológico.....	38
4.1 Modelo computacional del ciclo de histéresis.....	39
4.2 Sistema utilizado como referencia.....	40
4.3 Ciclo de histéresis utilizado como referencia.....	41
4.4 Esquema de potencia utilizado para las simulaciones.....	44
4.5 Muestras normalizadas para la obtención de los rasgos.....	48
4.6. Gráfica correspondiente a los rasgos obtenidos.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Parámetros utilizados en el modelo de simulación.....	42
4.2 Premisas de simulación para la obtención de rasgos.....	47
4.3 Matriz de Observación.....	50
4.4. Rasgos que caracterizan a las corrientes de Inrush y cortocircuito	50
4.5 Primer grupo de rasgos ordenados de menor a mayor.....	51
4.6 Segundo grupo de rasgos ordenados de menor a mayor.....	51
4.7 Premisas de simulación para el entrenamiento de las svm.....	54
4.8 Variación de C y γ para una svm de kernel tipo rbf.....	55
4.9 Modelo 85 presentado como primera solución.....	57
4.10 Modelo 165 presentado como segunda solución.....	57
4.11 Modelo 265 presentado como tercera solución.....	58
4.12 Modelo 298 el cual tiene el menor N° de V.S.....	59
4.13 Premisas de simulación para prueba final de las svm solución....	60
4.14 Resultado de las svm solución ante matriz de desempeño.....	60

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Eléctrica

**Discriminación entre las Corrientes de Inrush y Cortocircuito en
Transformadores de Potencia Usando Transformada de Wavelet y Máquinas de
Vectores de Soporte**

Autor: Gabriel Aljibes Loreto
Tutor: Carlos Jiménez
Fecha: Abril 2015

Resumen

Cuando se energiza un transformador, circula una corriente de energización transitoria que se conoce como corriente de Inrush y es propia de cada transformador. La corriente de Inrush solo fluye por el lado donde fue energizado el transformador ocasionando que se altere la relación entre la corriente del primario y del secundario. Esta corriente ocasiona que las protecciones asociadas al transformador interpreten, erróneamente, que ha ocurrido una falla. Entonces la protección debería insensibilizarse cuando ocurre este fenómeno. El método comúnmente utilizado para discriminar entre estas corrientes, es comparar los niveles de segundos armónicos. Sin embargo, a medida que los sistemas de potencia crecen, se pueden producir corrientes de falla con un importante contenido de segundo armónico comparable al de la corriente de Inrush, por lo que no siempre se garantiza la correcta operación de la protección al momento de energizar el transformador. Por lo anterior expuesto, surge la necesidad de desarrollar un método para diferenciar en forma correcta si se trata de una corriente de Inrush o una corriente de falla, haciendo uso de la Transformada de Wavelet para extraer los rasgos de la corriente de Inrush y de la corriente de cortocircuito, y utilizar como clasificador una Máquina de Vectores de Soporte.

INTRODUCCIÓN

Cuando se energiza con un voltaje sinusoidal la bobina primaria de un transformador, circula una corriente inicial de energización que origina un fenómeno transitorio, provocando un flujo magnético variable y a la vez dando origen a un voltaje en la bobina secundaria. Esta corriente de energización transitoria que circula por la bobina primaria se conoce como corriente de Inrush y es propia de cada transformador.

La corriente de Inrush solo fluye por el lado donde fue energizado el transformador ocasionando que se altere la relación entre la corriente del primario y del secundario. Esta corriente de energización produce una corriente diferencial en las protecciones ocasionando que estas interpreten, erróneamente, que ha ocurrido una falla. Entonces la protección diferencial debería insensibilizarse cuando ocurre este tipo de corriente de Inrush y dejar que fluya a través del transformador.

El método comúnmente utilizado para discriminar entre la corriente de cortocircuito y la corriente de Inrush, es la de comparar los niveles de armónicos. La corriente de cortocircuito difiere de la corriente de Inrush en su forma de onda con una mayor pronunciación en la segunda, quinta y séptima armónica. Aprovechando esta característica, existen relés que discriminan estas corrientes a través de la segunda armónica, que es la componente donde se manifiesta mayor diferencia (hasta un cuarenta por ciento); esto se hace a través de filtros pasa bandas, colocados en la entrada de los relés.

Sin embargo, a medida que los sistemas de potencia crecen, tanto en capacidad, componentes capacitivas y nivel de tensión, se pueden producir corrientes de falla con un importante contenido de segundo armónico comparable al de la corriente de Inrush, de tal manera que el esquema diferencial que utiliza el valor de la componente de

segundo armónico para diferenciarlas no siempre garantiza la correcta operación de la protección al momento de energizar el transformador.

Por lo anterior expuesto, surge la necesidad de desarrollar un método para diferenciar en forma correcta si se trata de una corriente de Inrush o una corriente de falla, evitándose la desconexión incorrecta del transformador y, por consiguiente, preservar la continuidad y eficiencia del servicio eléctrico.

Teniendo en cuenta lo antes dicho se propone hacer uso de la Transformada de Wavelet para extraer los rasgos de la corriente de Inrush y de la corriente de cortocircuito, y utilizar como clasificador una Máquina de Vectores de Soporte y así discriminar entre las ondas de Inrush y cortocircuito.

El trabajo se dividió en cuatro capítulos. En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema, se definen los objetivos del proyecto y la justificación del mismo. En el Capítulo II se presentan los antecedentes que guardan relación con este trabajo y los fundamentos que permiten comprender el funcionamiento de las técnicas empleadas en el proyecto. En el Capítulo III se exponen el marco metodológico empleado y las diferentes fases en que consistió la investigación. En el Capítulo IV se muestran los resultados de los diversos experimentos realizados. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones en el Capítulo V.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

En actualidad, la energía eléctrica tiene importancia, debido a que la mayor parte de las máquinas y dispositivos que posee el hombre se sirven de ella. El fácil transporte de esta energía, desde la etapa de generación pasando por la transmisión y finalmente la etapa de distribución y consumo, presentan un bajo costo debido a la utilización de transformadores eléctricos que elevan o reducen el voltaje de esa energía, disminuyendo considerablemente las pérdidas a través de las líneas de transmisión y distribución para luego adecuar el voltaje a los niveles requeridos por los usuarios [5].

Por lo antes planteado el transformador de potencia es uno de los principales equipos en los sistemas eléctricos, por tanto es necesario protegerlo de fallas internas y externas para evitar daños en la estructura, preservando la estabilidad en los sistemas de potencia y la calidad del servicio, por consiguiente, los transformadores, en la mayoría de los casos, requieren de una protección eléctrica que permita identificar cualquier falla que pueda presentarse.

Para lograr una protección eficiente de los transformadores se utiliza el *principio de la protección diferencial de corriente*, donde se compara la corriente que entra y sale del equipo a proteger; la diferencia entre ambas corrientes indicará la presencia de una falla en el dispositivo protegido. En el caso de los transformadores se comparan las corrientes de la bobina primaria y secundaria de este equipo, las cuales bajo condiciones normales o estables presentan una relación definida, en caso de que estas corrientes no cumplan con esta relación, se asume que existe un cortocircuito en el mismo. [4]

En función a lo anterior, cuando se energiza con un voltaje sinusoidal la bobina primaria de un transformador, circula una corriente inicial de energización que origina un fenómeno transitorio, provocando un flujo magnético variable y a la vez dando origen a un voltaje en la bobina secundaria. Esta corriente de energización transitoria que circula por la bobina primaria se conoce como corriente de Inrush y es propia de cada transformador. [5]

La corriente de Inrush solo fluye por el lado donde fue energizado el transformador ocasionando que se altere la relación entre la corriente del primario y del secundario. Esta corriente de energización produce una corriente diferencial en las protecciones ocasionando que estas interpreten, erróneamente, que ha ocurrido una falla. Entonces la protección diferencial debería insensibilizarse cuando ocurre este tipo de corriente de Inrush y dejar que fluya a través del transformador. [4]

El método comúnmente utilizado para discriminar entre la corriente de cortocircuito y la corriente de Inrush, es la de comparar los niveles de armónicos. La corriente de cortocircuito difiere de la corriente de Inrush en su forma de onda con una mayor pronunciación en la segunda, quinta y séptima armónica. Aprovechando esta característica, existen relés que discriminan estas corrientes a través de la segunda armónica, que es la componente donde se manifiesta mayor diferencia (hasta un cuarenta por ciento); esto se hace a través de filtros pasa bandas, colocados en la entrada de los relés. [4]

Sin embargo, a medida que los sistemas de potencia crecen, tanto en capacidad, componentes capacitivas y nivel de tensión, se pueden producir corrientes de falla con un importante contenido de segundo armónico comparable al de la corriente de Inrush, de tal manera que el esquema diferencial que utiliza el valor de la componente de segundo armónico para diferenciarlas no siempre garantiza la correcta operación de la protección al momento de energizar el transformador. [3]

Por lo anterior expuesto, surge la necesidad de desarrollar un método para diferenciar en forma correcta si se trata de una corriente de Inrush o una corriente de

falla, evitándose la desconexión incorrecta del transformador y, por consiguiente, preservar la continuidad y eficiencia del servicio eléctrico.

Teniendo en cuenta lo antes dicho se hizo uso de la Transformada de Wavelet para extraer los rasgos de la corriente de Inrush y de la corriente de cortocircuito, y utilizó como clasificador una Máquina de Vectores de Soporte discriminando así entre las ondas de Inrush y cortocircuito.

1.2 Objetivos de la Investigación

1.2.1 Objetivo General

- Discriminar entre las corrientes de Inrush y cortocircuito en transformadores de potencia usando Transformada de Wavelet y Máquinas de Vectores de Soporte.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar un modelo que emule a un transformador de potencia, para extraer los rasgos de las corrientes de Inrush y cortocircuito.
- Procesar la corriente de Inrush y cortocircuito empleando la Transformada de Wavelet para obtener los rasgos de cada una de estas señales.
- Entrenar una Máquina de Vectores de Soporte a partir de los rasgos extraídos de la corriente de Inrush y cortocircuito para clasificar estas ondas.

1.3 Justificación de la Investigación

En se realizó un sistema para la discriminación de la corriente de Inrush y cortocircuito en los transformadores de potencia utilizando la Transformada de Wavelet y las Máquinas de Vectores de Soporte.

La combinación de estas dos herramientas ofrece la ventaja de discriminar entre una condición de falla de una condición de Inrush mediante el reconocimiento de la forma de onda y no mediante la comparación de la magnitud del segundo armónico

respecto al valor del armónico fundamental, que es la base de los algoritmos actuales y cuya magnitud depende de las características de los materiales magnéticos con los que actualmente se construyen los transformadores y de la componente capacitiva que contienen las redes de transmisión de los sistemas de potencia.

Al discriminar estas ondas se evita la desconexión incorrecta del transformador de potencia y por consiguiente se preserva la continuidad y eficiencia del servicio eléctrico, esto redundará en beneficios sociales y económicos para la población, ya que instituciones como hospitales, centros residenciales, entidades gubernamentales y de seguridad nacional así núcleos de trabajo y empresas de manufactura, operan de manera satisfactoria para de esta forma mantener el crecimiento constante de nuestro país.

1.4 Alcance y delimitación

El presente trabajo tiene como propósito discriminar entre las corrientes de Inrush y cortocircuito en transformadores de potencia usando Transformada de Wavelet y Máquinas de Vectores de Soporte, para lograrlo se seleccionó un modelo computacional que modeló la histéresis en los núcleos ferromagnéticos de los transformadores de potencia. A partir de allí se realizaron ensayos en un entorno computacional donde se obtuvieron los rasgos de las corrientes de Inrush y cortocircuito haciendo uso de la Transformada de Wavelet, este procedimiento estuvo basado en el reconocimiento de patrones característicos de estas ondas que ocurren en los transformadores de potencia. Luego del procesamiento para generar estos patrones, se entrenó una Máquina de Vectores de Soporte que permitió discriminar la ocurrencia o no de una falla.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Pérez J. (2002) utilizó redes neuronales artificiales para la identificación de corrientes de Inrush en Transformadores a partir de la simulación de un sistema de potencia. A partir de dicho trabajo se pudo extraer los fundamentos teóricos de las corrientes de Inrush y cortocircuito y evidenciar las similitudes y diferencias que están presentes en estas señales.

La investigación propuesta discriminará las corrientes de Inrush y cortocircuito utilizando Máquinas de Vectores de Soporte que serán entrenadas a partir de los rasgos extraídos de estas señales por medio de la Transformada de Wavelet.

Igualmente **Álvarez C. y otros** (2005) al igual que en otras publicaciones, utilizó redes neuronales como discriminador partiendo de la descomposición armónica de las señales de Inrush y cortocircuito. Este trabajo se remitió a aplicar el esquema de discriminación a transformadores monofásicos, circunscribiéndose solo al esquema de simulación. El aporte que este trabajo hace a esta investigación es la recopilación de información referida a los diferentes esquemas de discriminación que para la fecha de su publicación se han generado.

Esta Investigación generará un esquema de discriminación entre las corrientes de Inrush y cortocircuito el cual será diferente a los contemplados en la investigación antes mencionada.

Por último **Jimenez C. y otros** (2010) contemplan la aplicación de las dos principales herramientas que serán utilizadas en esta investigación como lo son la Transformada de Wavelet y las Máquinas de Vectores de Soporte. En este trabajo el conjunto discriminador se implementó para diferenciar entre señales de voz sanas y patológicas. El aporte de este trabajo tiene que ver con la fundamentación teórica

concerniente a la transformada de wavelet y las máquinas de vectores de soporte, así como a la conjugación de estas dos herramientas para la construcción del discriminador que en esta investigación se presenta.

La diferencia entre el trabajo que aquí se presenta y el realizado por **Jiménez C.** (2010), estriba en el hecho de que el conjunto discriminador es aplicado a señales de naturaleza diferente como lo son respectivamente, las ondas de corriente de un transformador y las señales que se forman a partir de la voz de una persona, debido a que los rasgos que en ambas se extraen son totalmente diferentes.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Fundamentos del Transformador de Potencia [6]

En general, una máquina es un aparato que transforma una energía en otra del mismo o distinto tipo. Las máquinas eléctricas son aquellas en las que interviene la energía eléctrica. Se puede hacer una primera clasificación de las mismas en:

Máquinas rotativas, son aquellas que transforman el movimiento en electricidad (generadores) o viceversa (motores).

Máquinas estáticas, son aquellas que transforman una energía eléctrica alterna en otra de distintas características, recibiendo el nombre de transformadores.

Es decir, los transformadores se definen como máquinas eléctricas estáticas, cuyo fin es modificar una tensión determinada a otra tensión deseada, a través de la variación de campo electromagnético, para transferir energía eléctrica en el sistema, en otros términos se puede añadir que la función del transformador es transformar la potencia eléctrica en el sentido de modificar sus factores (tensión por corriente) a través de la relación:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.1)$$

La relación que existe entre las tensiones y corrientes es tal, que la potencia a transferir se mantiene constante, cabe destacar que para que la máquina cumpla esta función requiere de un elevado rendimiento y bajo costo, en comparación con las máquinas rotatorias.

El transformador está constituido primeramente por un núcleo de láminas de material ferromagnético, que sirve para acoplar magnéticamente el devanado primario y el secundario; estos devanados son bobinas de cobre o aluminio cubiertas de un barniz aislante se arrollan sobre el núcleo. En estos devanados se genera o recibe el flujo que atraviesa el núcleo.

2.2.1.1 Circuitos Magnéticos Excitados con Corriente Alterna

Faraday comprobó que un campo magnético puede inducir tensiones en un circuito eléctrico, siempre y cuando exista un movimiento relativo entre el campo magnético y el circuito.

Este movimiento puede analizarse de dos maneras distintas: la primera, es donde en una bobina de N espiras se induce una tensión que es proporcional al número de espiras que enlaza a un flujo variable en el tiempo. Esta tensión también está relacionada con la velocidad con que cambia el flujo enlazado.

$$e = \pm N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Si el circuito de la bobina se cierra circulará una corriente inducida que producirá un flujo magnético que se opone al crecimiento o decrecimiento del flujo (el que exista) que la induce, tomando el signo positivo de la ecuación (1) y considerando la polaridad de e y ϕ como se muestra en la figura 2.1, el conjunto queda como se muestra:

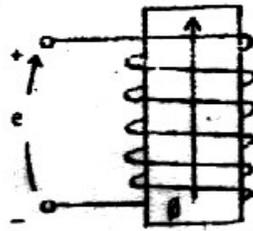


Figura 2.1 FEM Inducida en una bobina

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

Este tipo de análisis de la ley de Faraday, en una bobina es útil cuando se estudian las tensiones inducidas en transformadores y otros artefactos eléctricos que poseen una bobina estática, y flujos enlazados variables en el tiempo.

La segunda manera de analizarse el concepto de la ley de inducción de Faraday (donde se utiliza para el estudio de máquinas rotativas), es considerando que si se mueve un conductor de longitud l a una cierta velocidad v en una zona donde existe una inducción B , y cortando las líneas de campo a un ángulo α , se induce en el conductor una tensión de valor.

$$e = vBl \text{ Sen} \alpha \quad (2.3)$$

2.2.1.2 Características de los Materiales Magnéticos

En los materiales ferromagnéticos; como el hierro, el níquel y el cobalto, los momentos bipolares magnéticos de los electrones en los átomos se alinean entre sí, originando efectos magnéticos; pudiendo tener así una imantación permanente.

La relación entre el campo magnético y la intensidad magnética es compleja para un material ferromagnético por ello se dispone de tablas o graficas de \vec{B} en función de \vec{H} denominadas curvas de magnetización del material como se muestra en la figura 2.2.

La gráfica de magnetización total está compuesta por dos curvas: 1. Campo externo $\vec{B}_{ext} = \mu_0 \vec{H}$, 2. Campo propio del material $\vec{B}_{nucleo} = \mu_0 \vec{M}$. La curva correspondiente al campo producido por el propio material es la que está relacionada con la magnetización \vec{M} del material y que a su vez \vec{M} es proporcional a la corriente de Inrush. Sumando punto a punto la curva del campo externo con la curva del campo propio del material se obtiene la gráfica de Campo magnético resultante, $\vec{B}_{total} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$. Se observa que cuando \vec{H} es relativamente pequeño, casi toda la densidad de flujo total se debe a la magnetización M y por lo tanto a la corriente de Inrush. Después existe un punto en la curva tal que a medida que aumenta la intensidad \vec{H} el aumento de la magnetización M y por tanto el aumento de la corriente de Inrush es muy pequeño y se dice que el hierro está saturado a partir de este punto. Los aumentos posteriores del campo magnético total se deben casi exclusivamente al aumento de la corriente en el devanado (\vec{B}_{ext}).

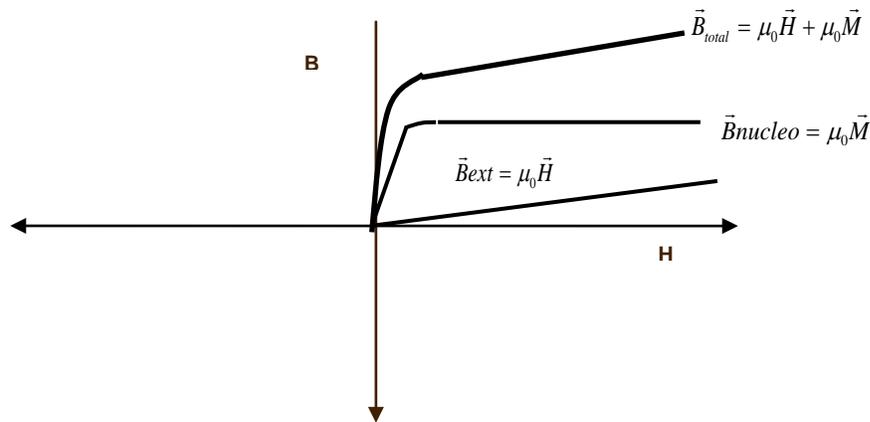


Figura 2.2. Curvas de Inrush para los campos magnéticos

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

Si a la curva anterior se le invierte el sentido de la corriente que produce el campo **H**, se invierte también la dirección de este campo y aumentándose la magnitud de **H** hasta suprimir todo el efecto magnetizante en la muestra, se logra

dibujar nuevamente la curva formándose lo que se denomina “*Ciclo de histéresis*”, como se muestra en la figura 2.3

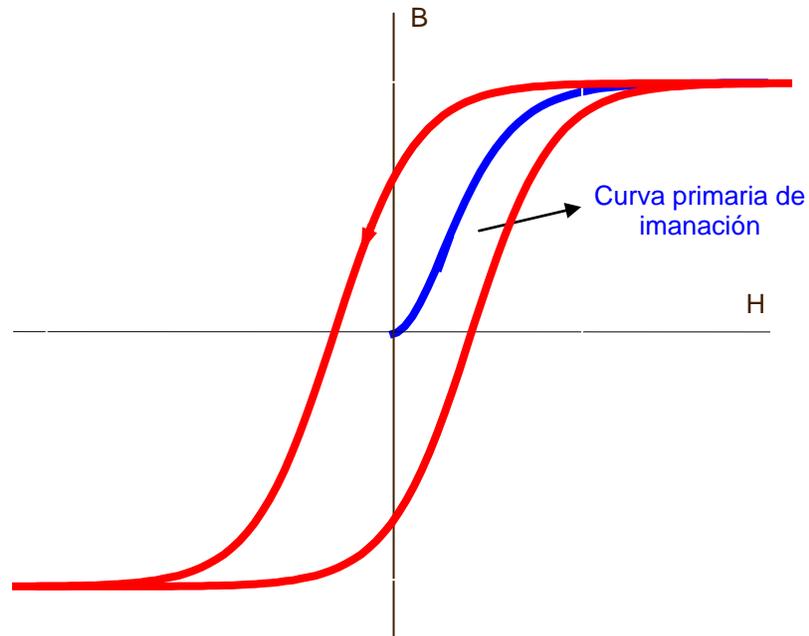


Figura 2.3 Ciclo de Histéresis

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

Cuando ocurren aumentos significativos de \mathbf{H} , y no existen aumentos significativos de \mathbf{B} , se dice que la muestra se ha “saturado”, es decir, Si el valor de H_{\max} es suficientemente intenso, la forma de la curva no cambia al aumentar H_{\max} , y el ciclo de Histéresis que presenta la muestra para ese momento se denomina “Ciclo de Histéresis de Saturación”.

Una consecuencia significativa de la histéresis en los núcleos ferromagnéticos, es la disipación de energía. El área encerrada en el ciclo de histéresis determina la energía disipada por unidad de volumen de material.

2.2.1.3 Teoría del Transformador Monofásico

Las características de un transformador ideal, se puede describir como en el circuito de la figura 2.4, al aplicar tensión al bobinado primario mientras el secundario permanece abierto, aparece entonces una intensidad sinusoidal de vacío I_0 , generando un flujo magnético en el núcleo que atraviesa a las dos bobinas a través del camino magnético que ofrece el núcleo. Al cruzar el flujo la bobina del primario provoca una FEM de valor determinada por la ecuación 2.2.

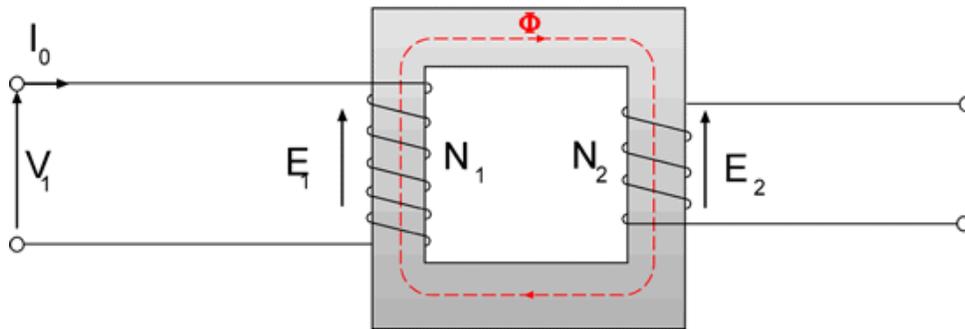


Figura 2.4 Circuito de un transformador ideal asumiendo resistencia cero.

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

Como todo el flujo generado por esta corriente primaria, es concatenado por ambas bobinas completamente, entonces a través de la misma relación de inducción de Faraday tenemos que se genera una FEM. Tal que:

$$a = \frac{E_1}{E_2} \quad (2.4)$$

Este término a se conoce con el nombre de relación de transformación. A diferencia del transformador ideal, el transformador real, como se observa en la figura 2.5 presenta una serie de pérdidas que se puede resumir en:

- Dispersión del flujo en los devanados primario y secundario. Estas pérdidas tienen un valor equivalente a las provocadas por dos reactancias inductivas X_{d1} y X_{d2} en serie con los devanados.
- Resistencia de los devanados, que provocan pérdidas por efecto Joule y caídas de tensión. Equivalen a dos resistencias en serie con el circuito.

Pérdidas en el hierro, son debidas a pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas. Provocan pérdidas de potencia que se suman a las de Joule.

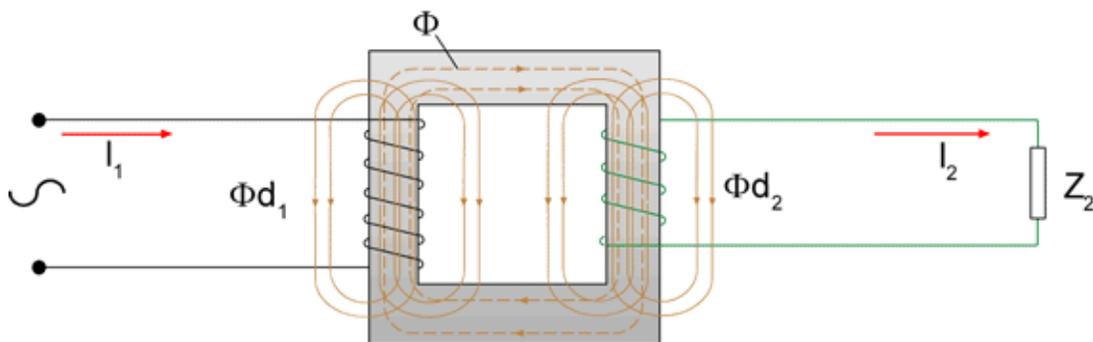


Figura 2.5 Circuito de un transformador real

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

2.2.1.4 Corriente Transitoria de Energización en Transformadores

Cuando un circuito magnético lineal se energiza con una fuente alterna AC, la corriente puede tener una componente transitoria de corriente continua con un valor inicial a lo sumo igual a la amplitud de la componente de corriente alterna y que decae a una razón determinada por la constante de tiempo del circuito. Sin embargo, bajo las mismas condiciones, la corriente transitoria o corriente de impulso en un transformador de potencia o en un reactor de núcleo de hierro, es proporcionalmente mayor debido a la saturación del material ferromagnético y es compleja debido a las características no lineales del hierro.

A diferencia del período estable del transformador de potencia (y en general cualquier tipo de transformador) cuando está funcionando en vacío, en el cual la

corriente alcanza generalmente valores inferiores al 5% de la corriente nominal o de carga, durante el transitorio de energización la corriente de inserción (o corriente Inrush), puede alcanzar valores de hasta 57 veces el valor nominal.

El aumento de la corriente durante la energización es debido a la saturación del núcleo. Cuando el flujo total en el núcleo sobrepasa el valor de saturación, el flujo restante es necesariamente transportado a través del aire; en estas condiciones el núcleo se comporta como un núcleo de aire y la inductancia equivalente vista por la fuente es menor, ocasionando un aumento súbito de la corriente que principalmente circula a través de la rama de “Inrush” del circuito equivalente del transformador, es decir, en el lado primario, sin reflejarse en el lado secundario.

Esta corriente fluye solo de la fuente hacia el transformador (sin fluir fuera de él) razón por la que aparece como una corriente diferencial, en los sistemas de protección. Sin embargo, esto no es una condición de falla y el relé debe permanecer estable durante este transitorio.

La corriente Inrush puede aparecer en las tres fases y en el neutro del transformador, la magnitud y duración dependen de factores externos y de diseño:

- **Impedancia de la fuente de alimentación.** La impedancia de la fuente de alimentación y la reactancia del núcleo en el devanado energizado determinan la magnitud de la corriente “Inrush” cuando el núcleo se satura.
- **Capacidad del transformador.** La capacidad del transformador define en gran medida la duración y magnitud de la corriente “Inrush”. La constante de tiempo para este transitorio utilizado con gran aproximación en cálculos, es de 0,1 segundos para transformadores con capacidades menores a 100 KVA, y mayores de 0,1 segundos para transformadores de mayor capacidad, ya que se ha observado que la corriente Inrush aún permanece después de 30 minutos después de haberse energizado.

- **Localización del devanado energizado (Interno o externo) con respecto al núcleo laminado.** En transformadores de núcleo acorazado, la magnitud de la corriente Inrush es mayor en el devanado interno que en el externo. En el primer caso la corriente Inrush alcanza valores de 10 a 20 veces la corriente nominal, mientras que en el segundo, de 5 a 10 veces. Usualmente, el devanado de alto voltaje es externo y el de bajo voltaje es interno.
- **Punto de la onda de voltaje de CA donde se cierran los contactos del interruptor que energiza al transformador.** El valor de la corriente “Inrush” depende del punto en la onda de voltaje de CA donde se cierran los polos del interruptor. El máximo valor de la corriente “Inrush” se presenta cuando el interruptor cierra los polos en el momento en que el voltaje es cero y el nuevo flujo magnético de la corriente “Inrush” toma la misma dirección que el flujo remanente.

La corriente “Inrush” es pequeña cuando los flujos toman direcciones opuestas. La energización de transformadores de potencia usualmente se realiza mediante el cierre simultáneo de los tres polos de un interruptor, dejando al azar el instante de la conexión, este proceso origina la presencia de grandes corrientes Inrush que pueden presentarse en las tres fases y en el neutro puesto a tierra.

La corriente Inrush es diferente en cada fase del transformador, debido a que en sistemas trifásicos las ondas de voltaje correspondientes a las fases están separadas 120° eléctricos y el cierre del interruptor de potencia es simultáneo en los tres polos, por lo que en el momento del cierre del interruptor, las tres ondas de voltaje se encuentran en diferentes puntos.

Otros factores que influyen en la magnitud y duración en la corriente de Inrush son:

- **Conexión de los arrollamientos.**
- **Características magnéticas del núcleo**
- **Remanencia del núcleo.**
- **Uso de resistores de PRE-inserción.**
- **Restablecimiento súbito de voltaje. Después de haber aislado una falla.**
- **Energización en paralelo de transformadores.**

El impulso es severo cuando el transformador se energiza en el instante que el voltaje pasa a través de cero, siguiendo inmediatamente en donde la polaridad del voltaje es tal que el flujo aumenta en la dirección del flujo residual. Para estas condiciones, el voltaje aplicado es:

$$e = \sqrt{2}E \sin \omega t = d\lambda/dt = N d\phi/dt \quad (2.5)$$

El valor del flujo se encuentra integrando la ecuación anterior por lo que:

$$\phi = \frac{\sqrt{2}E}{N} \int_0^t \sin \omega t dt + \phi(0) \quad (2.6)$$

Donde $\phi(0) = \phi_r$, es el flujo residual existente cuando se energiza el transformador. Por lo tanto:

$$\phi = \frac{\sqrt{2}E}{\omega N} (1 - \cos \omega t) + \phi_r \quad (2.7)$$

$$\phi = -\phi_m \cos \omega t + \phi_m + \phi_r \quad (2.8)$$

Si se asume que el transformador es re-energizado en el instante en que el flujo está en su valor máximo negativo ($-\phi_{\max}$). Y en este punto, el flujo residual tiene un valor positivo. Debido a que el flujo magnético no puede cambiar instantáneamente la

onda de flujo en lugar de iniciar en el valor normal $-\phi_{\max}$ y variar de forma sinusoidal a lo largo de la línea punteada como en la figura 2.6, iniciará con el valor del flujo residual ϕ_r siguiendo la curva ϕ_t . Si se considera una característica de saturación lineal en el transformador la curva ϕ_t es una sinusoidal desplazada, donde el valor de $\phi_{t\max}$ es:

$$\phi_{t\max} = \pm|\phi_r| + 2|\phi_{\max}| \quad (2.9)$$

En este caso el flujo residual, ϕ_r es el flujo remanente en el núcleo después de que el transformador es desconectado como muestra la figura 2.6. Ya que la corriente continúa fluyendo momentáneamente después de la desconexión, el flujo decrecerá a lo largo de la curva de histéresis a un valor de ϕ_r donde la corriente es igual a cero.

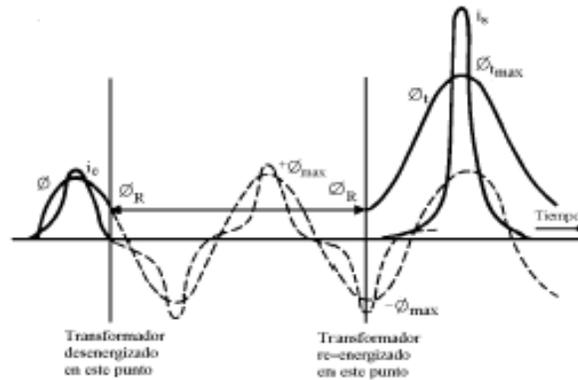


Figura 2.6 Flujo de energización cuando la tensión en bornes es cero.

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

Este exceso de flujo magnético producirá una saturación en el núcleo del transformador, provocando un valor muy grande de la corriente de “Inrush”. Ya que el flujo en cada una de las tres fases están separadas 120° , una fase tendrá un ϕ_r positivo y los otros dos un ϕ_r negativo o viceversa. Como resultado, el flujo residual puede sumarse o restarse al flujo total, incrementando o reduciendo la corriente de Inrush. La forma de onda de una corriente típica de “Inrush” se muestra en la figura

2.7 y 2.8. El tiempo que esta corriente está presente depende de la constante de tiempo del sistema ($t = \frac{L}{R}$), pudiendo ser del orden de segundos hasta minutos.

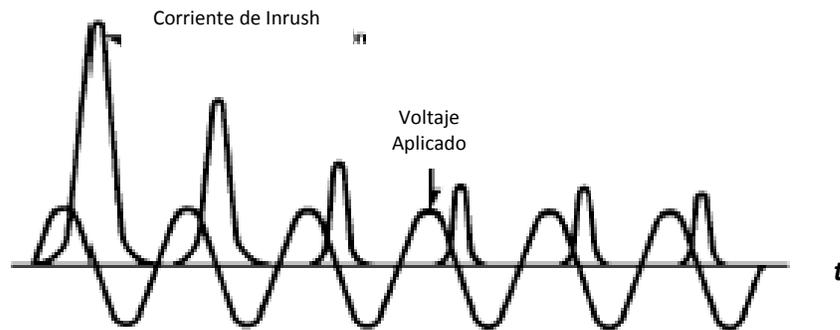


Figura 2.7 Corriente de Inrush y voltaje aplicado en función del tiempo.

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

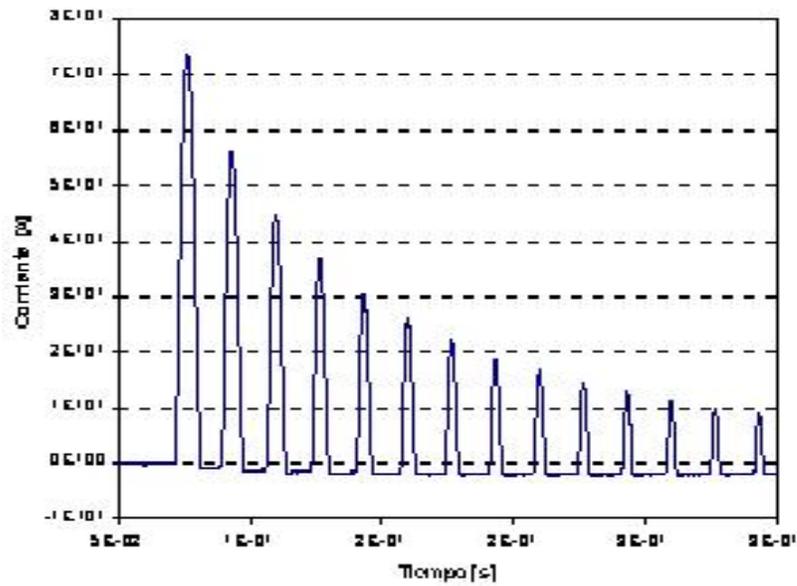


Figura 2.8 Corriente de Inrush versus el tiempo.

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

2.2.2 Corriente Transitoria de Cortocircuito en los Transformadores [6]

Un cortocircuito es un fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto, caracterizándose por elevadas corrientes circulantes hasta el punto de falla, produciendo efectos destructivos sobre los elementos que atraviesa.

Los efectos de las corrientes de cortocircuitos son muy variados, pero los más importantes son el debido al efecto Joule (calentamiento de los equipos eléctricos debido a la gran circulación de corriente), esfuerzos electromecánicos en las máquinas eléctricas y destrucción física del lugar de la falla cuando se producen grandes arcos eléctricos. De los efectos de las fallas por cortocircuito, el que nos compete, es la interrupción del suministro eléctrico debido a la necesaria apertura del circuito eléctrico por parte de los dispositivos de protección para despejar la falla y evitar mayores daños en el sistema, generalmente hablando, y en nuestro caso en el transformador.

Se sabe que el momento donde el valor instantáneo de la tensión es nulo, hace que el efecto transitorio de la corriente en el transformador es más notorio, según la figura 2.9. Si se desprecia la impedancia de cortocircuito, así como también la resistencia del devanado donde ocurre la falla, el circuito de dicho devanado puede considerarse inductivo puro. En consecuencia, la corriente estará atrasada $\pi/2$ en relación a la tensión, esto significa que si la tensión en el momento del cortocircuito es nula, con pendiente ascendente, la corriente entonces es máxima negativa (a $\pi/2$ de la tensión), sin embargo, antes del cortocircuito, la corriente por el devanado se considera nula, entonces, y como es sabido está corriente de cortocircuito I_{cc} , se verá trasladada, en las ordenadas positivas, en una cantidad igual a $I_{cc,perm,max}$, si el régimen persistiera, el valor máximo de cortocircuito máximo para este caso sería:

$$I_{cc,transit,max} = 2.I_{cc,perm,max}.$$

En la realidad, cuando se presenta por primera vez tal máximo, la corriente transitoria sufre un amortiguamiento, en virtud de que las resistencias en el circuito existen.

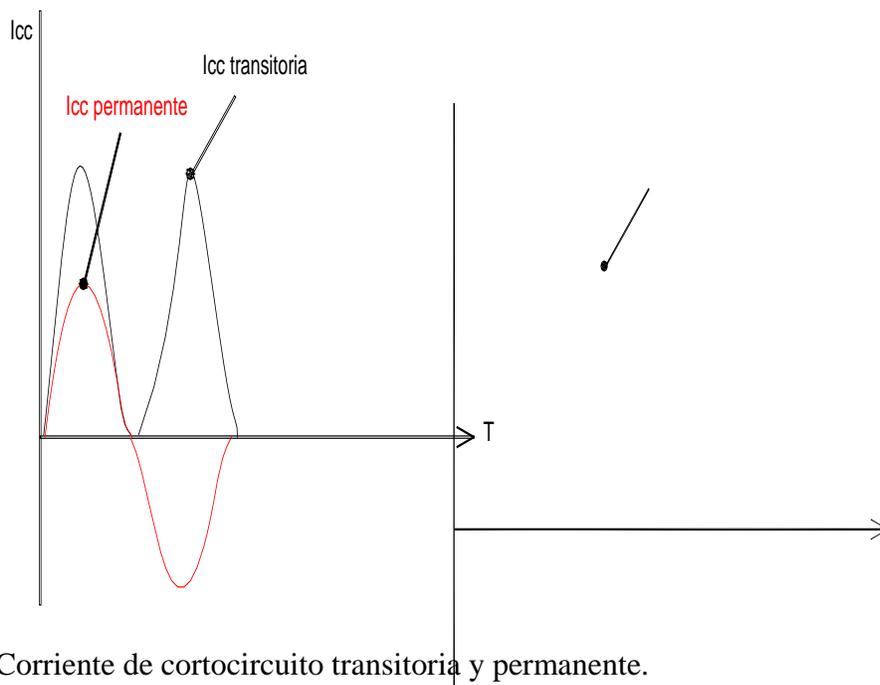


Figura 2.9 Corriente de cortocircuito transitoria y permanente.

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

2.2.3 Métodos Actuales de Insensibilización de los Relés Diferenciales para Evitar operaciones Incorrectas por Efecto de las Corrientes Inrush [6]

Cuando un transformador es energizado por primera vez, se presenta una corriente de Inrush transitoria. Despreciando las pérdidas, esta corriente de Inrush es la que establece el flujo en el núcleo y circula principalmente por la rama de excitación del transformador, es decir, es una corriente que circula sólo por el devanado primario, haciendo que la protección diferencial del transformador “observe” una corriente diferencial, a través de la bobina de operación, siendo esta corriente una condición normal dentro del sistema de potencia, y no una falla de cortocircuito despejable, por ello en la actualidad se consideran tres métodos

fundamentales que discriminan la corriente “Inrush” y la corriente de cortocircuito en un transformador, para optimizar el funcionamiento de la protección diferencial.

2.2.3.1 Bloqueo en Energización

Se bloquea la operación del relé en el momento de energizar al transformador de potencia, a través de una señal de posición del interruptor que alimenta al transformador que depende de la presencia de voltaje y corriente. El tiempo de bloqueo debe ser ligeramente mayor al que permanece la corriente Inrush. Sin embargo, debido a que es muy difícil predecir este tiempo y considerando que es variable en cada energización, este método no es suficiente y poco práctico para evitar la operación en falso de la protección, además se deja de proteger al transformador en el tiempo que se bloquea la protección diferencial.

2.2.3.2 Bloqueo por la Segunda Armónica

La forma de onda de la corriente Inrush, contiene una proporción de armónicas, las cuales aumentan en su magnitud en la medida que el valor pico de la densidad del flujo sea más alto, y se encuentre dentro de la curva de “Inrush”. La onda típica de la corriente Inrush, contiene una cantidad significativa de segundas y terceras armónicas, donde representan a veces el 63 y 26,8% respectivamente con respecto a la fundamental. Este contenido de segunda armónica con respecto a la fundamental es de 30% ó mas en el primer ciclo de la corriente Inrush, que en la corriente de cortocircuito, lo cual es usado para identificar la presencia del fenómeno Inrush y prevenir la operación del relé, su principal desventaja es que es poco o nada efectivo cuando las corrientes Inrush presentan un contenido armónico distinto a las características esenciales esperadas, es decir que sea de carácter simétrico como las corrientes de cortocircuito.

2.2.3.3 Bloqueo por Distorsión en la Forma de Onda

Otro método para discriminar corrientes por fallas internas de corrientes Inrush, es identificar el tipo de distorsión que se presenta en la forma de onda de la corriente diferencial. Cuando se presenta una corriente diferencial debido al fenómeno Inrush, la corriente es totalmente asimétrica y el intervalo de tiempo en el cual se presentan los picos de la onda, es mucho mayor al intervalo de tiempo para una falla interna.

La corriente diferencial es comparada con un límite positivo y uno negativo de igual magnitud, los cuales son definidos desde el diseño del relé, el intervalo de tiempo en el cual la onda pasa consecutivamente por los límites, es una indicación de la forma de onda. Este intervalo de tiempo en la onda es comparado con un cuarto de ciclo, de manera que si T es mayor a un cuarto de ciclo, se asume una corriente Inrush y el relé se bloquea, si T es menor a un cuarto de ciclo, el relé opera, como se muestra en la figura 2.10.

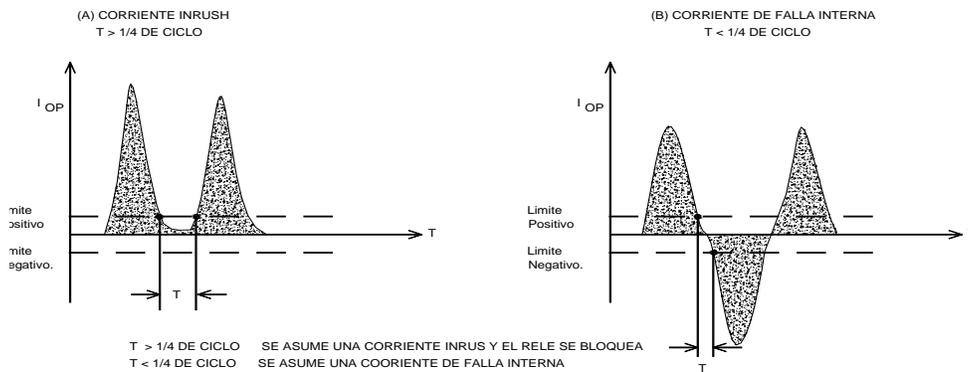


Figura 2.10 Discriminación entre corrientes de cortocircuito o por Inrush.

Fuente: Cruz Álvarez y otros, 2005

2.2.3.4 Otros métodos de Insensibilización de los Relés Diferenciales para Evitar operaciones Incorrectas por Efecto de las Corrientes Inrush

En la actualidad existen desarrollos de otros métodos alternativos, que alternan a los métodos tradicionales para la discriminación entre la corriente de Inrush y la

corriente de cortocircuito en los relés de protección de los transformadores de potencia, los métodos y sus investigadores son los siguientes:

EINVAL y LINDERS diseñaron un relé diferencial trifásico con restricción de segundo y quinto armónico. Este diseño complementó la idea de usar solo la segunda armónica para identificar la corriente de Inrush y usar la quinta armónica para evitar una operación errónea para condiciones de sobrecarga en transformadores.

SHARP y GLASBURN fueron los primeros en proponer el bloqueo de armónicos. Diseñaron un relé consistente de una unidad diferencial de porcentaje, DU y una unidad de bloqueo de armónicas, HBU. En la unidad de bloqueos de armónicas la componente fundamental y las armónicas más grandes de la corriente de operación son pasadas a través de dos circuitos en paralelo.

BERTULA diseñó un relevador diferencial en el cual los contactos vibraban ante corrientes de Inrush (debido a los bajos intervalos de corriente) y permanecían firmemente cerrados para corrientes simétricas correspondientes a fallas internas.

ROCKEFELLER propuso bloquear la operación del relevador si picos sucesivos de la corriente diferencial no se reducían dentro del intervalo de 7,5 a 10 ms.

HEGAZY propuso comparar la segunda armónica de la corriente diferencial rectificadas con un umbral dado para generar una señal de disparo.

DMITRENKO propuso producir una señal de disparo si la polaridad de una señal sumada permanecía sin cambio. Esta señal es la suma de la componente de CD y la componente fundamental amplificada de la corriente diferencial rectificadas.

Otro grupo de métodos hace uso del reconocimiento del offset de CD o la asimetría en la corriente diferencial. Algunos de los primeros relevadores usaron la saturación de un transformador intermedio por el offset de CD de la corriente diferencial como un método de bloqueo. Una restricción adicional de transitorios

basadas en la componente de CD fue un mejoramiento al bien conocido relevador diferencial con restricción de armónicas para transformadores de potencia.

MICHELSON propuso comparar las amplitudes de los semiciclos positivos y negativos de la corriente diferencial con umbrales dados en dos elementos diferentes polarizados. Rockefeller sugirió extender esta idea a un relevador digital.

Otra alternativa es usar la diferencia de los valores absolutos de los semiciclos positivos y negativos de la corriente diferencial por restringir. La amplitud del semiciclo negativo de la corriente diferencial puede ser usada como cantidad de operación del relevador.

WILKINSON propuso hacer comparaciones separadas en ambos semiciclos de la corriente diferencial, dando lugar a esquemas de bloqueo por CD.

2.2.4 Transformada de wavelet [7]

La transformada de wavelet permite realizar un análisis de múltiple resolución (MRA), lo cual analiza la señal con resolución diferente a diferentes frecuencias. Se diseña para producir alta resolución en el tiempo y baja resolución en frecuencia para señales de alta frecuencia y baja resolución en el tiempo y alta resolución en frecuencia para señales con baja frecuencias. En las ecuaciones 2.10 y 2.11 se indica la forma como se obtiene la transformada de wavelet continua (CWT) de una función $f(t)$.

$$C(\text{escala}, \text{posición}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi(\text{escala}, \text{posición}, t) dt \quad (2.10)$$

$$CWT(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \quad (2.11)$$

Donde $\psi(t)$ es la función wavelet (llamada wavelet madre), la cual se debe escalar (s) y desplazar (τ) sobre el eje del tiempo. El factor en el denominador (la raíz cuadrada de s) es utilizado como un factor de normalización de la energía.

La función $\psi(t)$ debe cumplir con las siguientes propiedades:

- La integral debe ser cero

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.12)$$

- Energía finita

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt \leq \infty \quad (2.13)$$

- Condición de admisibilidad

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{|w|} dw \quad (2.14)$$

Donde $\psi(w)$ es la transformada de Fourier de $\psi(t)$

Con la condición de admisibilidad se garantiza la obtención de la transformada inversa de Wavelet.

El parámetro de escalamiento (s) permite comprimir o expandir la función wavelet ψ , y en la transformada es utilizada en el denominador $\psi(t/s)$. Este parámetro indica el grado de resolución con que se analiza la señal. Un valor alto de este factor ($|s| > 1$) corresponde a una vista global de la señal (expansión de la wavelet) mientras que un factor de escala bajo ($|s| < 1$) corresponde a ver detalles de la señal (se comprime la wavelet). El factor de posición (τ) permite desplazar la función wavelet en el eje del tiempo ($\psi(t-\tau)$), hasta el intervalo de tiempo que se encuentre definida la función $f(t)$. El resultado que se obtiene cuando se aplica la transformada de wavelet son los coeficientes $C(s, \tau)$, que son función de la escala y la posición. De este modo se puede visualizar la transformada de wavelet como la

comparación de la señal a procesar con las versiones desplazadas y escaladas de la wavelet madre.

El análisis de las señales con la transformada de wavelet es equivalente a un proceso de filtrado, donde se realiza una división de los coeficientes, obteniéndose los coeficientes de aproximación (A) y detalle (D).

La aproximación son los valores altos de la escala, correspondiente a las componentes de baja frecuencia de la señal, por lo tanto está asociada a la función de escalamiento que se determina con un filtro pasa bajo. Los detalles son los valores bajos de la escala, correspondientes a las componentes de alta frecuencia, y está asociada a la función wavelet que se determina como un filtro pasa alto.

En la figura 2.11 se muestra un esquema del proceso de filtrado, donde la señal a procesar es pasada por los filtros paso bajo y pasa alto, los cuales son filtros complementarios y se producen dos señales.

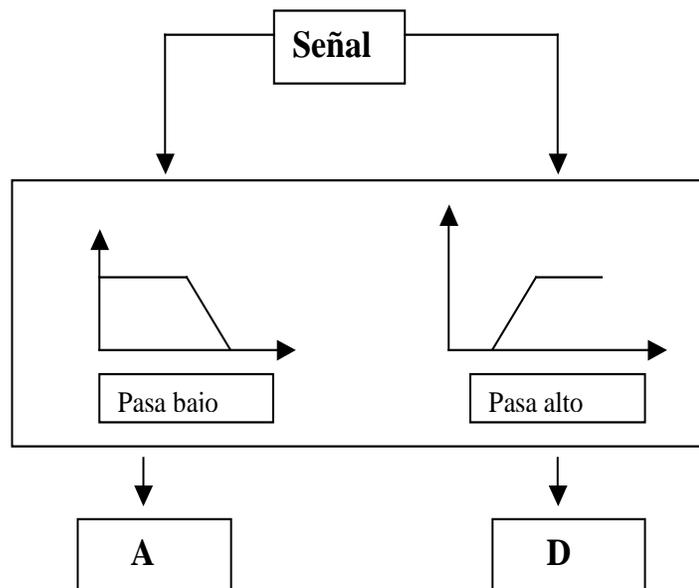


Figura 2.11 Esquema del proceso de filtrado.

Fuente: Jiménez, C. y otros, 2010

Como las señales que se producen en el proceso de filtrado son de la misma longitud que la señal a analizar (N), se aplica un proceso de sub-muestreo (también

llamado decimación) a la salida de cada uno de los filtros; produciendo los coeficientes de salida con una longitud de $N/2$ (se toma cada dos muestras). En la figura 2.12 se muestra este proceso

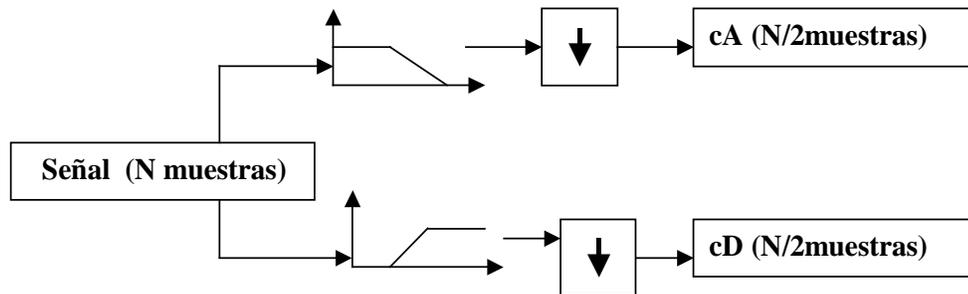


Figura 2.12 Proceso de decimación

Fuente: Jiménez, C. y otros, 2010

El proceso de filtrado o descomposición se itera, para descomponer la señal en N niveles, cada una con una resolución más baja. En la figura 2.13 se muestra el árbol de descomposición de wavelet de 3 niveles de descomposición

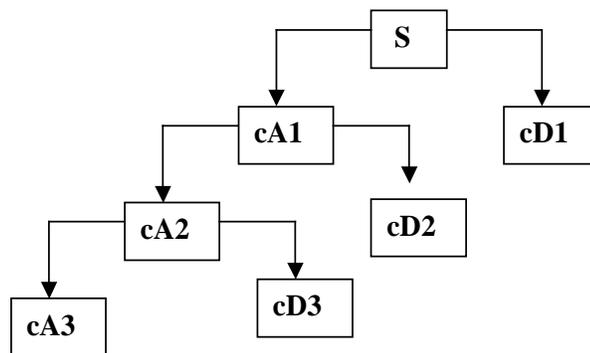


Figura 2.13 Árbol de descomposición de wavelet con 3 niveles.

Fuente: Jiménez, C. y otros, 2010

2.2.4.1 Tipos de wavelet

Existen diferentes funciones de wavelet con características que la definen y diferencian a cada una de las otras, las cuales permiten adaptarlas a determinadas aplicaciones. Dentro de las cuales se tienen: Wavelet Daubechies (DbN), Wavelet Symlets (SymN), Wavelet Coiflet (CoifN), Wavelet Meyer (Meyr), Wavelet Sombrero Mexicano (mexh), Wavelet Morlet (morl).

2.2.5 Máquinas de vectores de soporte [7]

Las máquinas de vectores de soporte (SVM) permiten realizar procesos de clasificación de señales. Donde se mapean los puntos de entrada a un espacio de características de una dimensión mayor, y encuentran un hiperplano que los separe y maximice el margen (M) entre las clases.

2.2.5.1 Caso linealmente separable

Para este caso se considerará que se desea separar una señal que tengan dos rasgos que se puedan separar linealmente, como se muestra en la figura 2.14

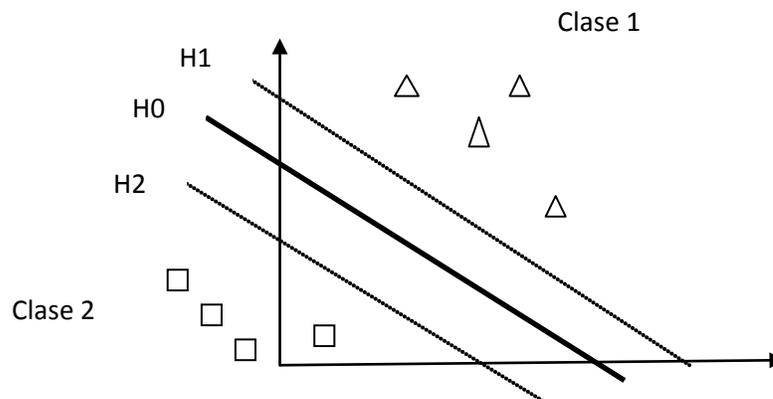


Figura 2.14 Clasificación caso linealmente separable

Fuente: Jiménez, C. y otros, 2010

Definiendo el hiperplano separador H_0 , como:

$$(w * x) + b = 0 \quad (2.15)$$

Para cada punto de entrenamiento $x_i \in \mathfrak{R}^n$ pertenece a alguna de las dos clases, el cual posee una etiqueta $y_i \in \{-1, 1\}$ para $i = 1, 2, \dots$

De tal manera que se forma el conjunto:

$$D = \{(x, y), (x, y), \dots, (x, y)\}, x \in \mathfrak{R}^n, y_i \in \{-1, 1\}$$

Los hiperplanos normalizados se definen como:

$$H1: \quad (w * x) + b = 1 \quad (2.16)$$

$$H2: \quad (w * x) + b = -1 \quad (2.17)$$

La separación entre los planos:

$$M = \frac{|(b-1) - (b+1)|}{\|w\|} \quad (2.18)$$

$$M = \frac{2}{\|w\|} \quad (2.19)$$

Definiendo las inecuaciones para el caso linealmente separable:

$$(w * x_i) + b > 1 \quad \text{si } y_i = 1 \quad \text{región o clase 1} \quad (2.20)$$

$$(w * x_i) + b < -1 \quad \text{si } y_i = -1 \quad \text{región o clase 2} \quad (2.21)$$

La cual se puede definir como:

$$y_i((w * x) + b) - 1 \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.22)$$

El proceso de optimización consiste en maximizar M o minimizar $\|w\|$

Y resulta mejor minimizar $\frac{\|w\|^2}{2}$

Sujeto a las restricciones dadas por: $y_i((w * x) + b) - 1 \geq 0$

Aplicando el Lagrangiano:

$$L(w, b, \alpha) = \frac{\|w\|^2}{2} - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i((w * x_i) + b) - 1] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = w - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2.25)$$

Sustituyendo estas derivadas en L, se tiene el dual

$$L(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j \quad (2.26)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (2.27)$$

Dual: Maximizar

$$L(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j \quad (2.28)$$

$$\text{Sujeto a: } \begin{cases} \sum \alpha_i y_i = 0 \\ \alpha_i \geq 0 \end{cases} \quad (2.29)$$

Estableciendo las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT):

El producto de las restricciones al problema primal y las restricciones del problema dual, se anulan:

$$\alpha_i [y_i ((w * x_i) + b) - 1] = 0 \quad (2.30)$$

Para cada ejemplo x_i

- a) Si $\alpha_i = 0$ los puntos no contribuyen a definir el hiperplano separador.
- b) $\alpha_i \neq 0$, $y_i (w * x_i + b) = 1$ estos puntos definen el hiperplano separador y se denominan vectores de soporte.

Entonces solo los vectores de soporte contribuyen a definir el hiperplano separador óptimo y w se calcula como:

$$w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i \quad (2.31)$$

El valor de b se obtiene a partir de la función:

$$y_i (w * x_i + b) = 1 \quad (2.32)$$

2.2.5.2 Caso no linealmente separable

Cuando no se puede separar linealmente fácilmente, se pudiera permitir que en la clasificación se cometan errores, tal como se muestra en la figura 2.15, en donde existe una clasificación de la clase 1 correcto con cierta holgura; mientras que una de las muestras de la clase 2 se clasifica como si fuese de clase 1.

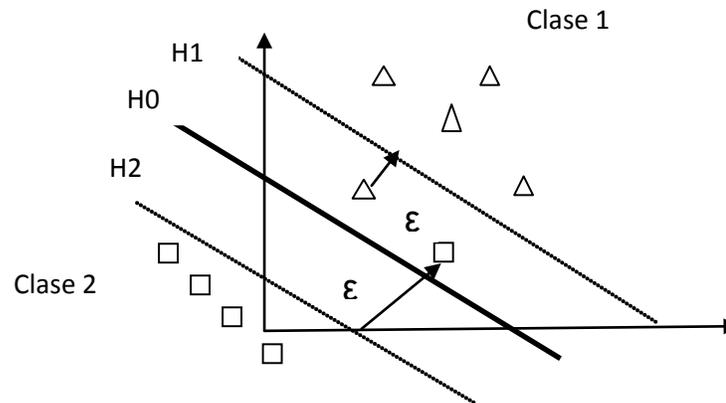


Figura 2.15 Clasificación caso no linealmente separable

Fuente: Jiménez, C. y otros, 2010

Definiendo a $\varepsilon \geq 0$ como la holgura, entonces el problema se transforma en

$$\text{minimizar a: } \frac{\|w\|^2}{2}$$

Sujeto a las restricciones dadas por:

$$y_i((w * x) + b) \geq 1 - \varepsilon \quad (2.33)$$

$$\varepsilon \geq 0 \quad (2.34)$$

Definiendo la función de costo como:

$$C \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon \quad (2.35)$$

Se obtiene entonces el siguiente problema de optimización:

$$\text{Minimizar } \frac{\|w\|^2}{2} + C \sum_{i=1}^n \varepsilon \quad (2.36)$$

Con las restricciones:

$$y_i((w * x) + b) \geq 1 - \varepsilon \quad i= 1,2 \dots n \quad (2.37)$$

$$\varepsilon \geq 0 \quad i= 1,2 \dots n \quad (2.38)$$

Se define, entonces el Langragiano como:

$$L(w, b, \alpha) = \frac{\|w\|^2}{2} + C \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i(w * x_i + b) - 1 + \varepsilon_i] - \sum_{i=1}^n \mu_i \varepsilon_i \quad (2.39)$$

Derivando:

$$\frac{\partial L}{\partial w} = w - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i = 0 \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = - [\sum_{i=1}^n y_i (w x_i + b) - 1 + \varepsilon_i] = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varepsilon_i} = C - \alpha_i - \mu_i = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_i} = \varepsilon_i = 0 \quad (2.44)$$

Estableciendo la condición de Karush-Kuhn-Tucker (KKT):

$$\alpha_i [y_i((w * x_i) + b) - 1 + \varepsilon_i] = 0 \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_i (C - \alpha_i) = 0 \quad (2.46)$$

La solución queda de este modo:

$$a) 0 < \alpha < C \quad \text{con } \varepsilon = 0 \quad [y_i((w * x_i) + b) - 1] = 0$$

Los puntos quedan bien clasificados

$$b) \alpha = 0 \quad \varepsilon = 0$$

$$c) \alpha = C \quad \varepsilon \geq 0 \quad \text{Dentro del Margen}$$

$\varepsilon > 1$ Los puntos quedan mal clasificados

$\varepsilon < 1$ Los puntos quedan bien clasificados

2.2.5.3 Máquinas de Vectores de Soportes no Lineales

Se aplican en el caso donde se necesitan funciones no lineales para delimitar las clases de los datos. Se hace una transformación Φ de los puntos de entrenamientos x_i a un espacio distinto F , llamado espacio de características de mayor dimensión, buscando con esto que en el nuevo espacio las clases tengan una mayor probabilidad de ser separadas linealmente, tal que: $x \in R^n \rightarrow \Phi(x) \in F$

Como el cálculo de los productos escalares de $\Phi(x_i)$ pudiera presentar problema en el espacio de mayor dimensión, se utiliza una función Kernel que cumple lo siguiente:

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) \quad (2.47)$$

De este modo el problema se transforma en:

$$L(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (2.48)$$

$$\text{Sujeto a: } \begin{cases} \sum \alpha_i y_i = 0 \\ \alpha_i \geq 0 \end{cases}$$

Y el clasificador queda como:

$$c(x) = \text{signo} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right] \quad (2.49)$$

2.2.5.4 Funciones Kernel

Existen diferentes funciones kernel utilizadas en las máquinas de vectores de soporte, dentro de ellas se encuentran la polinómica y la de base radial (rbf).

Función Polinómica:

$$K(x_i, x_j) = [x_i x_j + 1]^d \quad (2.50)$$

Función de Base Radial:

$$K(x_i, x_j) = e^{-\frac{[x_i - x_j]^2}{2p_1^2}} \quad (2.51)$$

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de investigación

De acuerdo a los propósitos de este proyecto, el mismo se considera de tipo documental porque el misma permitió la elaboración de un marco teórico conceptual acerca del funcionamiento y aplicaciones de la Transformada de Wavelets y las Máquinas de Vectores de Soporte. De acuerdo con la definición de Fideas Arias “La investigación documental es aquella que se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos” (1999- p. 47), igualmente, el Manual de trabajos de grado de Especialización, Maestría y Tesis doctorales de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL), Venezuela, la define como: “ el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos” 1998 p.6). Y es descriptiva porque según Fideas Arias “La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento” (1999- p.46)

3.2 Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realizó a partir de simulaciones realizadas sobre un transformador monofásico. Dentro de esta misma perspectiva también se utilizó la observación científica, estructurada y sistematizada ya que dichas simulaciones estuvieron relacionadas con experimentos de energización y falla en este tipo de transformadores de potencia para distintos instantes de tiempo, así como para distintos tipos de falla y de esta forma observar las diferentes corrientes de Inrush y cortocircuito que pueden generarse respectivamente en estos ensayos.

3.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para realizar el procesamiento de los datos previamente agrupados y clasificados como señales de Inrush y cortocircuito obtenidas a partir de las simulaciones se aplicó la Transformada de Wavelet, para luego extraer los rasgos de estas señales por medio de técnicas estadísticas y matemáticas que permitieron diferenciarlas. Estos datos ya procesados y clasificados sirvieron para entrenar a una Máquina de Vectores de Soporte, la cual tuvo como función clasificar a las señales como corriente de Inrush o cortocircuito.

3.4 Procedimiento metodológico

3.4.1 Fase I: Selección de un modelo que emule a un transformador de potencia para extraer los rasgos de las corrientes de Inrush y cortocircuito.

Esta fase se inició con la selección de la curva de histéresis de un transformador de potencia. A partir de los valores característicos de estas curvas se implementó un modelo computacional que se asemejó a dichas curvas para así construir un esquema de simulación que representó al transformador de potencia.

3.4.2 Fase II: Procesamiento de las corrientes de Inrush y cortocircuito empleando la Transformada de Wavelet para obtener los rasgos de cada una de estas señales.

En este paso se obtuvieron las corrientes de Inrush y cortocircuito a partir del modelo de simulación que fue construido en la fase anterior. Estas corrientes de Inrush y cortocircuito fueron halladas para diferentes situaciones tales como: instantes diferentes de las señales de voltaje de alimentación de la red de potencia, diferentes ubicaciones de fallas, diversas resistencias de falla y magnetizaciones diferentes en el núcleo magnético del transformador. Estas corrientes fueron procesadas utilizando la Transformada de Wavelet, y luego se tomaron de allí sus rasgos a partir de técnicas estadísticas y matemáticas.

3.4.3 Fase III: Entrenamiento de Máquinas de Vectores de Soporte a partir de los rasgos extraídos de las corrientes de Inrush y cortocircuito.

Una vez caracterizadas las señales de Inrush y cortocircuito producto de las simulaciones, fueron entrenadas las Máquina de Vectores de Soporte, las cuales tuvieron como función clasificar las corrientes con respecto a pruebas provenientes de simulaciones.

En el siguiente diagrama se muestra de manera sistematizada las fases y tareas realizadas para la consecución de este trabajo.

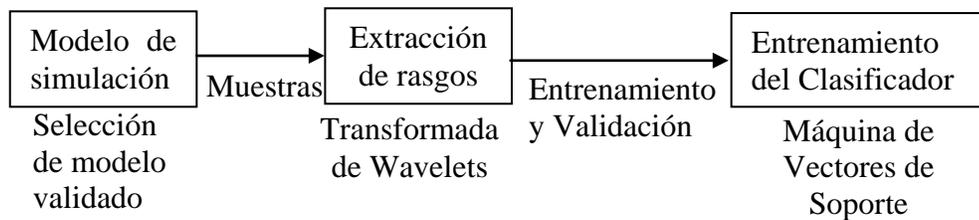


Figura 3.1. Esquema Metodológico.

Fuente: Aljibes G. (2015)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Modelación de la saturación y la histéresis en el transformador

Se utilizó una herramienta computacional la cual realizó un ajuste de curvas utilizando la expresión analítica arcotangente para incorporar la saturación y la histéresis en el núcleo ferromagnético del transformador. Esto se llevó a cabo mediante el suministro de los datos correspondientes al flujo remanente ϕ_r , el flujo de saturación ϕ_s , la corriente de saturación I_s , la corriente coercitiva I_c y la pendiente $d\phi/dt$ en el punto donde se ubica I_c . La gráfica y la disposición de esta información se muestran en la figura 4.1.

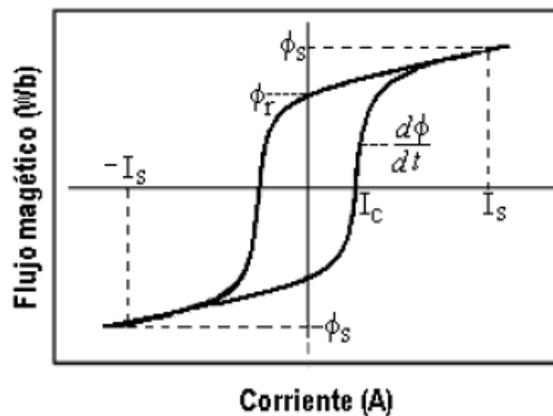


Figura 4.1. Modelo computacional del ciclo de histéresis

Fuente: Marines V. y otros, 2010

4.2 Esquema de potencia utilizado como referencia

Se tomó como referencia el modelo que se utilizó para la simulación presentada por Casoria en el trabajo de referencia [8]. En esta publicación Casoria utilizó un transformador monofásico 288,7 kV / 132,8 kV y 150 MVA el cual se aprecia en la figura 4.2. La autoinductancia en por unidad del lado de alta tensión es igual a la autoinductancia en por unidad del lado de baja tensión las cuales tienen como valor 0,08 pu. En el caso de las resistencias en por unidad ocurre lo mismo, y tienen como valor 0,002 pu en ambos devanados. Se conectó un interruptor al lado de alta tensión con el fin de controlar los instantes de energización y desenergización del transformador. A este esquema también se conectó una carga que consume 16,7 MW; 62,7 MVar. Finalmente el sistema se energizó por medio de una red de capacidad igual a 1000 MVA de cortocircuito trifásico, con una relación X/R igual a 15 y una fuente de tensión que responde a la función trigonométrica coseno, cuyo valor nominal rms es de $500kV/\sqrt{3}$ por fase de frecuencia 60 Hz.

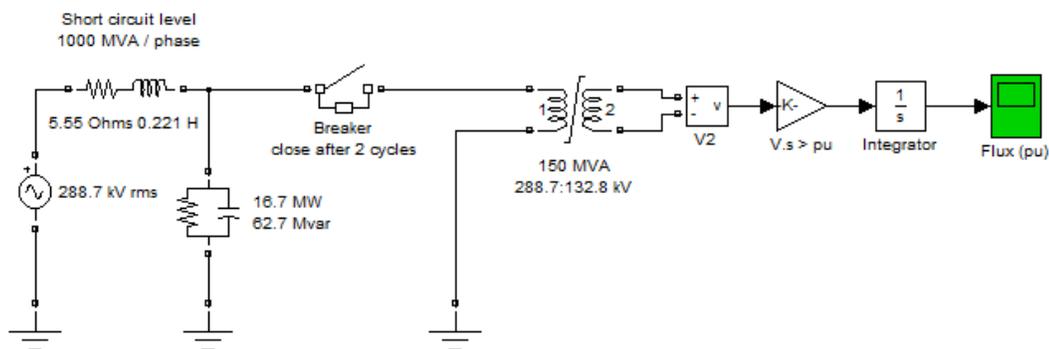


Figura 4.2. Sistema utilizado como referencia.

Fuente: Casoria S. y otros (2002)

Para la configuración del lazo de histéresis, Casoria utilizó los siguientes valores: $\phi_r = 0,85 pu$, $\phi_s = 1,2 pu$, $I_s = 0,015$, $I_c = 0,004$ y $d\phi/dt = 1000$. La gráfica que generan estos datos se observa en la figura 4.3.

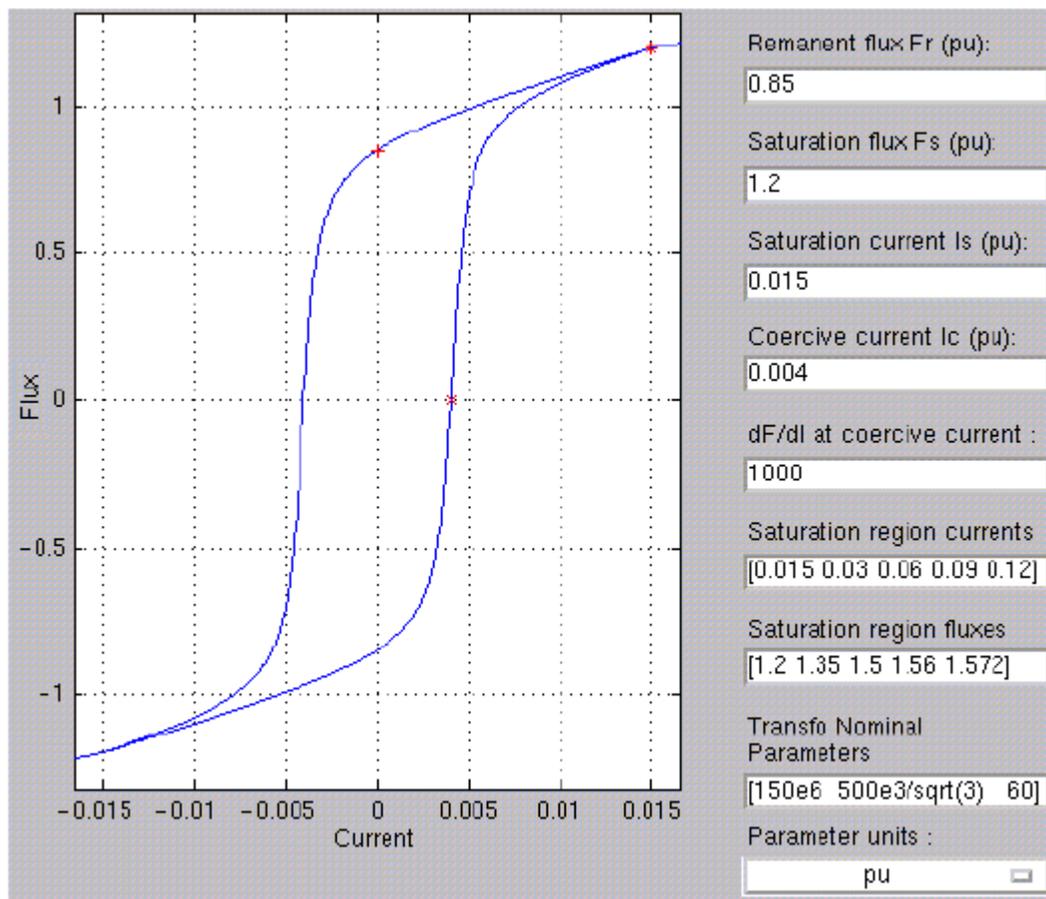


Figura 4.3. Ciclo de histéresis utilizado como referencia

Fuente: Casoria S. y otros (2002)

De esta red se tomaron este grupo de parámetros para realizar un modelo de simulación. En la tabla 4.1 se muestran los parámetros tomados del modelo de referencia.

Tabla 4.1. Parámetros utilizados en el modelo de simulación

Equipo	Característica
Fuente de alimentación	Potencia = 1000 MVA @ X/R = 15
Carga paralela	16,7 MW; 62,7 MVAr
Capacidad del transformador	$500kV/\sqrt{3}$ / $230kV/\sqrt{3}$; 150 MVA
Inductancia por fase del transformador	0,08 pu
Resistencia por fase del transformador	0,002 pu
Flujo remanente de la característica de histéresis	0,85 pu
Flujo de saturación de la característica de histéresis	1,2 pu
Corriente de saturación de la característica de histéresis	0,015 pu
Corriente coercitiva de la característica de histéresis	0,004 pu
Pendiente en el punto de corte con la corriente coercitiva	1000 pu
Regiones definidas por la corriente de saturación	[0,015 0,03 0,06 0,09 0,12] pu
Regiones definidas por el flujo de saturación	[1,2 1,35 1,50 1,56 1,572] pu

Fuente: Aljibes G. (2015)

Se asumió que se trata de un transformador reductor conectado de manera radial, de tal forma que la fuente de alimentación se ubicó en el lado de alta tensión, mientras que la carga se ubicó en el lado de baja tensión. Además todas las energizaciones de este transformador se realizaron en vacío.

En los esquemas de operación y protección de transformadores de potencia cuenta con interruptores de maniobra y sensores de corriente ubicados en ambos lados del transformador.

Se conectan interruptores tanto en alta como en baja tensión con el objeto de aislar eléctricamente al transformador tanto de la fuente de alimentación como de la carga. Mientras que la ubicación de los sensores de corriente, en el caso de un transformador reductor conectado de manera radial, es similar a la de los interruptores de maniobra, con la salvedad de que el primero de estos sensores está ubicado entre la fuente y el interruptor de alta tensión, mientras que el segundo está ubicado entre el interruptor de baja tensión y la carga.

Con esta disposición de los sensores de corriente se construye una protección diferencial, cuya zona de protección incluye, además del transformador de potencia, a los interruptores de maniobra.

Ya que el transformador fue siempre energizado en vacío, no hicieron falta ni el interruptor de baja tensión ni el sensor de corriente. En función de esto, se prescindió tanto del interruptor como del transformador de corriente, ambos ubicados en el lado de baja tensión.

A partir de lo anterior, el equipo que se adicionó al modelo de Casoria fue un sensor de corriente ubicado en el lado de alta tensión. El sensor de corriente que se uso fue de tipo ideal, por lo tanto la relación de este equipo es constante. La relación de transformación de este sensor es irrelevante ya que las corrientes simuladas fueron normalizadas. Este último paso será explicado más adelante.

El tiempo en el que se realizaron estas simulaciones fue de 12 ciclos correspondientes a la frecuencia nominal de la red de alimentación la cual es de 60 Hz. Los primeros 6 ciclos de simulación se utilizaron para realizar un flujo de carga, de tal forma que las señales de corriente y tensión, previas a la energización del transformador, se encuentren en régimen permanente. Transcurridos los 6 primeros

ciclos se energizó el transformador y fue captada la señal de corriente por el lado de alta tensión.

La ventana temporal de corriente que se tomó para el estudio comenzó en el ciclo 6 y terminó en el ciclo 7 de cada simulación, por lo que la caracterización de estas señales tiene 1 ciclo de duración. La frecuencia de muestreo que se utilizó fue de 1,250 kHz, por lo que el elemento encargado de muestrear la corriente se ajustó en 0,0008 segundos por muestra, lo que permitió obtener frecuencias iguales o menores a 625 Hz (aproximadamente 10 veces 60 Hz). En función de todo lo anterior se obtuvieron 22 muestras por cada escenario simulado. En la figura 4.4 se muestra el esquema de potencia utilizado para las simulaciones de este trabajo

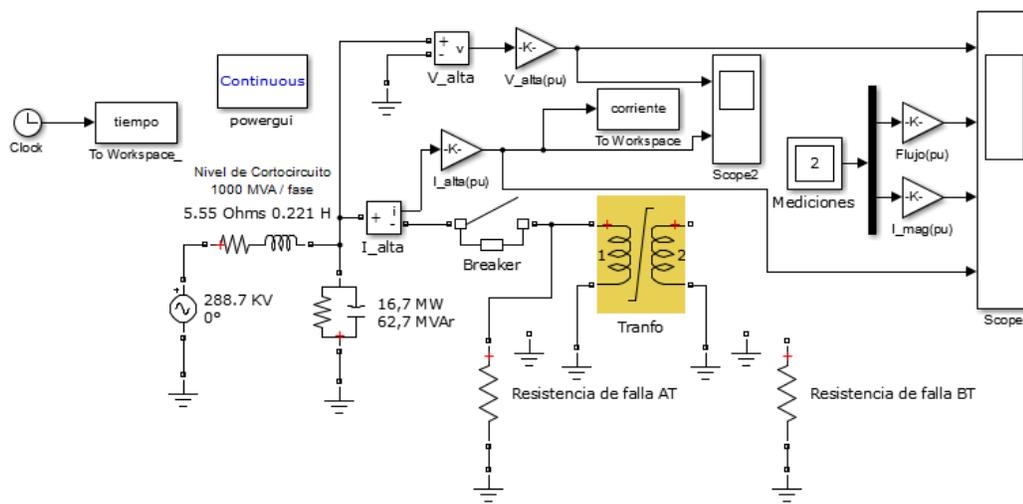


Figura 4.4. Esquema de potencia utilizado para las simulaciones.

Fuente: Aljibes G. (2015)

Cada señal de corriente obtenida en el proceso de simulación fue normalizada. Esto se realizó con el objeto de obtener coeficientes de wavelet propios de la forma de onda de cada señal, sin que dichos coeficientes sean influenciados por la diferencia entre los valores instantáneos que tiene cada muestra de cada señal de corriente. Esta normalización provocó que dichas muestras oscilen entre 1 y -1. A partir de la expresión 4.1 se llevó a cabo la normalización de cada vector de corriente obtenido.

$$C_{nor}(i) = \frac{a(i)}{\max(abs(a(i)))} \quad (4.1)$$

A partir de la expresión 4.1 se obtuvo $C_{nor}(i)$ que corresponde a cada vector de corriente normalizado. También se observa a $a(i)$ que tiene que ver con cada vector de corriente el cual contiene 22 muestras y la expresión abs se aplica para obtener el valor absoluto de cada muestra que corresponde a cada $a(i)$. La expresión \max está relacionada con la obtención del valor máximo de cada valor absoluto de cada muestra perteneciente a cada corriente $a(i)$.

4.3 Premisas de simulación para la obtención de rasgos característicos de las señales de Irush y cortocircuito

Para extraer los rasgos que diferencian a la corriente de Inrush de la corriente de la corriente de cortocircuito se realizó un conjunto de simulaciones en las cuales se apreciaron las características que distinguen a estas dos corrientes para diferentes escenarios. Estos escenarios de simulación fueron determinados por:

- **Magnetización inicial del núcleo del transformador:** depende del flujo remanente establecido en el material ferromagnético del transformador al momento de ser re-energizado. Según el ciclo de histéresis mostrado en las simulaciones de Casoria, se observa que el flujo remanente que se establece en el material ferromagnético del transformador es de 0,85 pu cuando previamente se excitó con una tensión pico de 1,2 pu. Ya que la tensión osciló de forma simétrica entre valores positivos y negativos, los valores extremos de flujo remanente que se utilizaron para este trabajo fueron de 0,85 pu y -0,85 pu para la obtención de rasgos característicos de las señales de Irush y cortocircuito. Se tomaron estos valores extremos de flujo remanente para así considerar la mayor deformación del ciclo de histéresis que se ha encontrado en la referencia.

- **Valor pico de la tensión de alimentación:** en este caso se tomó como valor pico de la tensión 1 pu para la obtención de rasgos característicos de estas señales. A pesar de que dicho valor pico puede ser en algunos casos mayor o menor, generalmente se encuentra en 1 pu.
- **Instante de energización del transformador:** este valor depende del ángulo de fase de la función coseno que modela a la fuente de voltaje de alimentación al momento de alimentar el transformador. Este valor va de 0° a 360° . Las diferentes simulaciones se realizaron tomando ángulos que produjesen variaciones extremas de la tensión, estos ángulos fueron 0° , 90° , 180° , 270° .
- **Condición del transformador:** es decir, si el equipo se encuentra en cortocircuito o en condición normal.
- **Ubicación de la falla:** la falla puede ubicarse tanto en el lado de alta tensión como en el de baja tensión.
- **Impedancia de falla:** ya que se desea obtener en esta sección los rasgos característicos de estos dos tipos de señales, se utilizó el valor de impedancia mínimo que puede tener una falla y ese valor es 0 ohmios.

En la tabla 4.2 se muestran de manera resumida las premisas de simulación. Se omitió en dicha tabla el valor de la tensión de alimentación y la impedancia de falla, ya que son constante durante todas estas simulaciones, dichos valores son 1 pu y 0 ohmios respectivamente.

Tabla 4.2 Premisas de simulación para la obtención de rasgos

N°	Magnetización inicial (pu)	Ángulo del voltaje (coseno)	Condición del transformador	Ubicación de la falla
1	-0,85	0°	Normal	NA
2		90°		
3		180°		
4		270°		
5		0°	Cortocircuito	Alta tensión
6		90°		
7		180°		
8		270°		
9		0°	Cortocircuito	Baja tensión
10		90°		
11		180°		
12		270°		
13	0	0°	Normal	NA
14		90°		
15		180°		
16		270°		
17		0°	Cortocircuito	Alta tensión
18		90°		
19		180°		
20		270°		
21		0°	Cortocircuito	Baja tensión
22		90°		
23		180°		
24		270°		
25	0,85	0°	Normal	NA
26		90°		
27		180°		
28		270°		
29		0°	Cortocircuito	Alta tensión
30		90°		
31		180°		
32		270°		
33		0°	Cortocircuito	Baja tensión
34		90°		
35		180°		
36		270°		

Fuente: Aljibes G. (2015)

A partir de las premisas anteriores se generaron las gráficas de las corrientes muestreadas y normalizadas que se muestran en la figura 4.5.

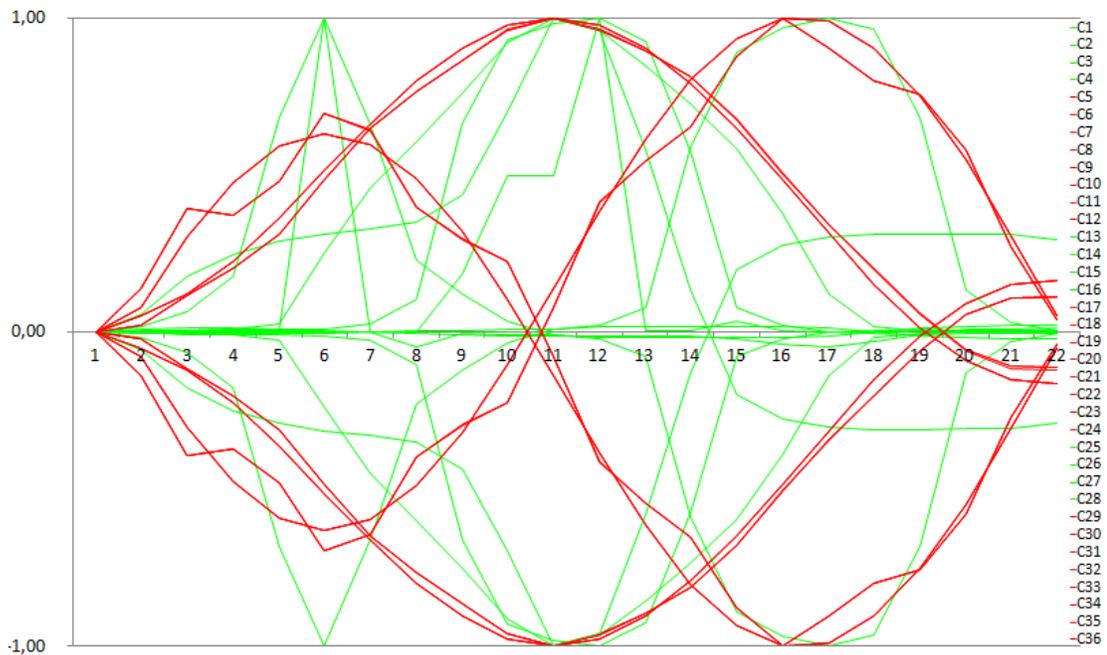


Figura 4.5. Muestras normalizadas para la obtención de los rasgos.

Fuente: Aljibes G. (2015)

Analizando la gráfica anterior se desprenden las siguientes interpretaciones:

- Ninguna de las corrientes son simétricas respecto al eje horizontal, por lo tanto este parámetro y aquellos que se desprendan de este no son de utilidad para diferenciarlas.
- Las corrientes de cortocircuito (trazo oscuro) son mas “anchas” que las corrientes de Inrush (trazo claro). Entendiéndose por “anchas” aquellas señales cuya separación temporal entre la muestra de mayor valor con respecto a las muestras adyacentes no cambian drásticamente. En términos matemáticos se puede entender al comparar las derivadas de ambas señales alrededor de sus respectivos valores máximos. En las señales menos “anchas” la derivada sería de gran valor alrededor del máximo, en términos absolutos,

mientras que en las señales más “anchas” la derivada sería de menor valor alrededor de su máximo con respecto también a su valor absoluto.

4.4 Obtención de rasgos característicos de las señales de Irush y cortocircuito implementando la transformada de wavelet.

- **Wavelet madres utilizadas para el proceso de observación:** las wavelets madres que fueron seleccionadas para observar a las 36 señales de corrientes obtenidas en el paso anterior son: Coiflet 5 (coif5), Symlets 4 (sym4), Daubechies 3 (db3) y Haar (haar). El nivel de descomposición implementado fue de 4. A partir de estas premisas y de la cantidad de muestras de cada vector de corriente (22 muestras) se obtuvieron coeficientes de aproximación y de detalle por cada wavelet madre.
- **Valores estadísticos utilizados para el proceso de observación:** se implementaron 9 valores estadísticos los cuales son: valor medio (med), desviación estándar (std), varianza (var), asimetría estadística (skewness), curtosis (kurtosis), valor mínimo (min), valor máximo (max), rango (range), valor cuadrático medio (rms). Estos cálculos se implementaron tanto a los coeficientes que se obtuvieron al aplicar las diferentes wavelets madres como a cada vector $C_{nor}(i)$ correspondiente a cada las señal de corriente muestreada y normalizada. La observación de estos parámetros se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Matriz de Observación

Coiflet 5 (coif5)										
1 .. 36	A4 (1..28)	est (1..9)	D4 (1..28)	est (1..9)	D3 (1..28)	est (1..9)	D2 (1..27)	est (1..9)	D1 (1..25)	est (1..9)
Symlets 4 (sym4)										
1 .. 36	A4 (1..7)	est (1..9)	D4 (1..7)	est (1..9)	D3 (1..8)	est (1..9)	D2 (1..10)	est (1..9)	D1 (1..14)	est (1..9)
Daubechies 3 (db3)										
1 .. 36	A4 (1..6)	est (1..9)	D4 (1..6)	est (1..9)	D3 (1..7)	est (1..9)	D2 (1..9)	est (1..9)	D1 (1..13)	est (1..9)
Haar (haar)										
1 .. 36	A4 (1..2)	est (1..9)	D4 (1..2)	est (1..9)	D3 (1..3)	est (1..9)	D2 (1..6)	est (1..9)	D1 (1..11)	est (1..9)
Corriente (C)										
1 .. 36	<i>C_{nor}</i> (1..22)					est (1..9)				

Fuente: Aljibes G. (2015)

A partir de la matriz de observación anterior, se obtuvieron los rasgos que caracterizan a las corrientes de Inrush y cortocircuito los cuales se muestran en la tabla 4.4. Además en las tablas 4.5, y 4.6 se muestra como, al ordenar estos rasgos de menor a mayor, se agrupan los datos de color claro (Inrush) y los datos de color oscuro (cortocircuito).

Tabla 4.4. Rasgos que caracterizan a las corrientes de Inrush y cortocircuito

1 .. 36	sym4_D3_8	sym4_mean_D3	sym4_skewness_D3	haar_kurtosis_D2	haar_kurtosis_D2	C_kurtosis
---------------	------------------	---------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------

Fuente: Aljibes G. (2015)

Tabla 4.5 Primer grupo de rasgos ordenados de menor a mayor

D3_sym4_8		est_D3_sym4_mean		est_D3_sym4_skewness	
C23	-0,247611219	C14	-0,133435148	C13	-2,003814338
C11	-0,247579168	C26	-0,124314639	C26	-1,669719539
C35	-0,24750514	C27	-0,093655033	C25	-1,61194231
C7	-0,213503298	C25	-0,047466978	C2	-1,298161226
C31	-0,213503293	C2	-0,041319812	C27	-1,271986741
C19	-0,213503289	C13	-0,018143478	C14	-1,13110661
C20	-0,125073594	C6	-0,01495873	C10	-0,952591431
C32	-0,125073594	C18	-0,014958716	C22	-0,951358702
C8	-0,125073592	C30	-0,014958716	C34	-0,951088872
C24	-0,115998786	C10	-0,014793097	C30	-0,841378477
C12	-0,115996008	C34	-0,014765566	C18	-0,841378471
C36	-0,115694566	C22	-0,01476233	C6	-0,84137826
C28	-0,09100227	C7	-0,011608181	C33	-0,050813826
C27	-0,076425609	C19	-0,011608181	C21	-0,050254192
C4	-0,072644917	C31	-0,011608181	C9	-0,049754186
C16	-0,072511658	C35	-0,010457239	C29	-0,020226108
C15	-0,034314331	C23	-0,010435027	C17	-0,020226106
C3	-0,003576555	C11	-0,010434318	C5	-0,020226094
C13	0,001887264	C33	0,010434579	C7	0,020226094
C25	0,003578797	C21	0,010435111	C19	0,020226106
C14	0,072469439	C9	0,010457201	C31	0,020226108
C26	0,073794609	C29	0,011608181	C35	0,049751655
C1	0,076221233	C17	0,011608181	C23	0,050321503
C2	0,09114893	C5	0,011608181	C11	0,050770461
C10	0,115897485	C36	0,014696417	C32	0,841378223
C34	0,116043344	C12	0,014763758	C20	0,841378224
C22	0,116046795	C24	0,014764705	C8	0,84137826
C6	0,125073592	C32	0,014958729	C24	0,951215257
C18	0,12507363	C20	0,014958729	C12	0,951266733
C30	0,125073631	C8	0,01495873	C36	0,954651637
C17	0,213503289	C28	0,042788462	C16	1,129761677
C29	0,213503293	C3	0,047462138	C28	1,245171005
C5	0,213503298	C15	0,093407752	C1	1,283007666
C9	0,247503033	C1	0,09438412	C15	1,477485529
C33	0,247577595	C4	0,124382456	C3	1,611979565
C21	0,247586855	C16	0,133470661	C4	1,668346399

Fuente: Aljibes G. (2015)

Tabla 4.6 Segundo grupo de rasgos ordenados de menor a mayor

est_D2_haar_kurtosis		est_D1_haar_kurtosis		est_C_kurtosis	
C6	1,670348527	C6	1,551616251	C10	1,522096181
C8	1,670348527	C8	1,551616251	C12	1,522167346
C18	1,67034855	C20	1,551616416	C24	1,522189846
C32	1,670348552	C32	1,55161642	C34	1,522200811
C20	1,670348553	C18	1,551616521	C22	1,522215936
C30	1,670348558	C30	1,551616546	C36	1,525582091
C36	1,686037479	C29	1,625051354	C18	1,554520589
C10	1,688077204	C31	1,625051354	C30	1,554520591
C22	1,688097567	C5	1,625051368	C6	1,554520631
C24	1,688129509	C7	1,625051368	C8	1,554520631
C12	1,688186686	C17	1,625051393	C32	1,554520639
C34	1,688294051	C19	1,625051393	C20	1,554520639
C17	1,754713797	C22	1,715381188	C5	1,585680586
C19	1,754713797	C34	1,715491736	C7	1,585680586
C5	1,754713817	C10	1,715585515	C29	1,585680589
C7	1,754713817	C24	1,71561625	C31	1,585680589
C29	1,754713819	C12	1,716113645	C17	1,585680591
C31	1,754713819	C36	1,722507781	C19	1,585680591
C9	1,757214539	C33	1,883931281	C9	1,604990293
C35	1,757225861	C11	1,884319464	C35	1,604991159
C21	1,758019713	C21	1,884595959	C23	1,605018196
C23	1,758078887	C9	1,88474812	C21	1,605025512
C33	1,758459574	C35	1,884770128	C11	1,605150481
C11	1,758431872	C23	1,884875134	C33	1,60518003
C2	2,491135767	C2	2,152965039	C2	1,613302689
C28	2,562368901	C28	2,252836376	C28	1,614964902
C1	2,994704766	C15	4,854850956	C26	2,299915856
C27	2,99988827	C3	5,147742801	C4	2,306792387
C26	3,046643011	C25	5,153729795	C27	2,474045969
C4	3,047839678	C16	5,277312134	C1	2,477878443
C3	3,337663073	C14	5,280909654	C16	2,516222275
C25	3,339125564	C1	5,363690746	C14	2,518442764
C14	3,846000561	C27	5,388596502	C25	6,194319559
C16	3,846648527	C4	5,643777446	C3	6,194363772
C13	4,146024023	C26	5,681947272	C15	9,075950542
C15	4,191530686	C13	9,082790462	C13	19,81714557

Fuente: Aljibes G. (2015)

Estos valores fueron graficado y unidos entre sí por líneas de color claro para las corrientes de Inrush y líneas de color oscuro para las corrientes de cortocircuito. Dicha unión entre valor y valor correspondientes a una misma corriente no tiene ningún significado específico, lo importante en la siguiente gráfica es mostrar la separación entre cada valor obtenido por cada corriente con respecto a un determinado rasgo.

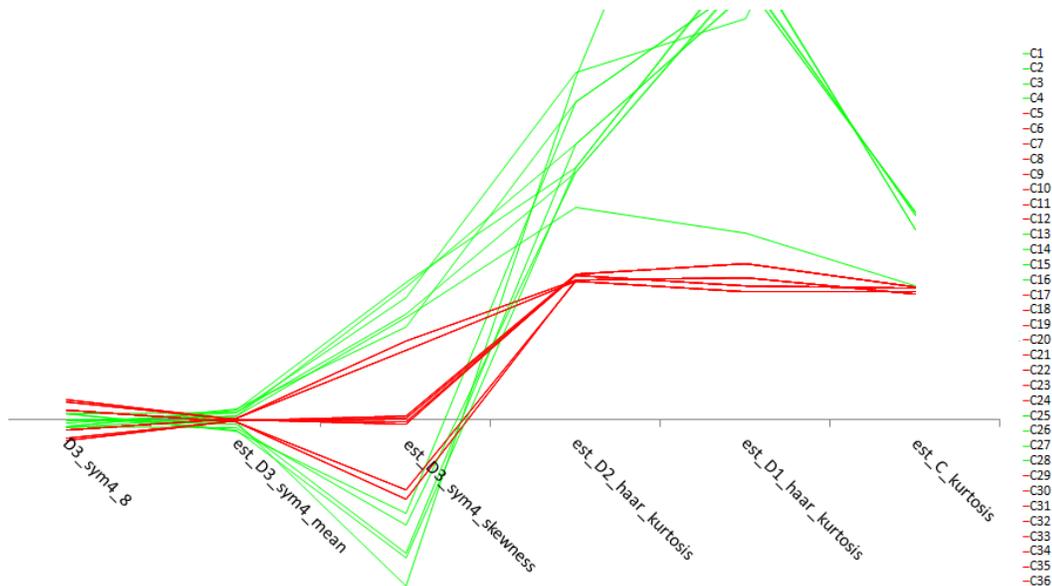


Figura 4.6. Gráfica correspondiente a los rasgos obtenidos.

Fuente: Aljibes G. (2015)

Analizando las tablas y la gráfica anteriores se desprenden las siguientes interpretaciones:

- El único valor utilizado para discriminar entre un determinado tipo de corriente (Inrush o cortocircuito) proveniente de aplicar únicamente la transformada de wavelet es el que surge de implementar la wavelet madre Symlets 4 tomando específicamente del detalle 3 el coeficiente 8. Todos los demás valores usados para la discriminación provienen de aplicar cálculos estadísticos a determinados detalles e incluso a los vectores de la matriz de

muestras normalizadas de la corriente. Esto nos muestra la importancia de tomar en cuenta para este proceso de discriminación a los valores estadísticos que en este caso son el valor medio, la asimetría estadística y la curtosis colocados en la tabla 4.4 de color oscuro.

- A pesar de haber aplicado 4 tipos de wavelet madre, se observa que solo 2 fueron utilizadas para la discriminación, estas wavelet madre fueron Symlets 4 y Haar.
- Es importante destacar que estos coeficientes de discriminación contienen también a parámetros estadísticos de las propias corrientes en el plano del tiempo, contemplados en la matriz C_{nor} . Por lo que también se tomó en cuenta a la forma de onda de las corrientes, sin mayor procesamiento que el muestreo y la normalización.
- También se observa que el rasgo que mayor diferencia a un tipo de corriente de otra (Inrush o cortocircuito) surge de aplicar el cálculo de curtosis a los coeficientes del detalle 2 de la transformada Haar (haar_kurtosis_D2). Es en este coeficiente, mostrado en la figura 4.6, donde se observa la mayor separación entre Inrush y cortocircuito.

4.5 Señales de corriente utilizadas para el entrenamiento de las máquinas de vectores de soporte

Para este entrenamiento se tuvieron mayores variaciones en los factores que inciden en la forma de onda de la corriente de Inrush y cortocircuito con respecto a lo que se mostró en la tabla 4.2. Las variaciones que se realizaron son las que se muestran en la tabla 4.7

Tabla 4.7 Premisas de simulación para el entrenamiento de las svm

Magnetización inicial (pu)	Voltaje (pu)	Ángulo del voltaje (coseno)	Condición del transformador	Resistencia de falla (ohmios)	Ubicación de la falla																																				
<table border="1"> <tr> <td>-0,85</td> <td>-0,6375</td> <td>-0,425</td> </tr> <tr> <td>-0,2125</td> <td>0</td> <td>0,2125</td> </tr> <tr> <td>0,425</td> <td>0,6375</td> <td>0,85</td> </tr> </table>	-0,85	-0,6375	-0,425	-0,2125	0	0,2125	0,425	0,6375	0,85	<table border="1"> <tr> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1,1</td> </tr> </table>	0,9	1	1,1	<table border="1"> <tr> <td>0°</td> <td>30°</td> <td>45°</td> <td>60°</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>120°</td> <td>135°</td> <td>150°</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>210°</td> <td>225°</td> <td>240°</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>300°</td> <td>315°</td> <td>330°</td> </tr> </table>	0°	30°	45°	60°	90°	120°	135°	150°	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	<table border="1"> <tr> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td>Cortocircuito</td> </tr> </table>	Normal	Cortocircuito	<table border="1"> <tr> <td>0</td> </tr> <tr> <td>10</td> </tr> <tr> <td>100</td> </tr> <tr> <td>1000</td> </tr> </table>	0	10	100	1000	<table border="1"> <tr> <td>Alta tensión</td> </tr> <tr> <td>Baja tensión</td> </tr> </table>	Alta tensión	Baja tensión
-0,85	-0,6375	-0,425																																							
-0,2125	0	0,2125																																							
0,425	0,6375	0,85																																							
0,9																																									
1																																									
1,1																																									
0°	30°	45°	60°																																						
90°	120°	135°	150°																																						
180°	210°	225°	240°																																						
270°	300°	315°	330°																																						
Normal																																									
Cortocircuito																																									
0																																									
10																																									
100																																									
1000																																									
Alta tensión																																									
Baja tensión																																									

Fuente: Aljibes G. (2015)

Al realizar todas estas combinaciones de posibilidades se pueden obtener aproximadamente 4.000 diferentes casos, desde un punto de vista práctico simular todos estos escenarios no tiene mucho sentido. Es por ello que se implementaron para el entrenamiento 100 diferentes casos. Estos escenarios estuvieron formados por las primeras 36 corrientes obtenidas anteriormente, así como por 64 adicionales en términos de la tabla 4.7.

4.6 Entrenamiento de las máquinas de vectores de soporte a partir de los rasgos obtenidos en el período de observación.

Estas máquinas de vectores de soporte (svm) fueron entrenadas con los rasgos que se obtuvieron de las simulaciones previstas en la tabla 4.7. Estas corrientes se organizarán en dos grupos, un grupo de 80 y un grupo de 20. El primer grupo se utilizó para entrenar y el segundo grupo para probar.

Además de lo anterior es importante destacar que las máquinas de vectores de soporte que se entrenaron fueron de kernel de función base radial (rbf), por lo que se requiere para su configuración 2 parámetros: el valor de C y el valor γ . En general el

valor de C es positivo y mucho mayor a γ , teniendo en cuenta incluso que γ proviene de la expresión prevista en 4.2:

$$\gamma = \frac{1}{2 * \sigma^2} \quad (4.2)$$

Donde σ es siempre mayor que 1 en términos absolutos, por lo que γ siempre será positivo y menor a 1. A partir de lo anterior se variará C y γ como se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Variación de C y γ para una svm de kernel tipo rbf

Variación de C		Variación de σ				Variación de γ			
10	100	1	2	3	4	0,5	0,125	0,05555	0,03125
1.000	10.000	5	6	7	8	0,02	0,01388	0,010204	0,0078125

Fuente: Aljibes G. (2015)

A partir de la tabla anterior se puede deducir que el total de combinaciones que se pueden obtener de C y γ es de 32 posibilidades.

- **Entrenamiento:** el método de entrenamiento fue el de validación cruzada, por lo que se dividieron las 80 corrientes en conjuntos de 8 para un total de 10 subgrupos. Se entrenaron vez a vez con 9 de los 10 subgrupos, para luego validar con el subgrupo que fue excluido en cada entrenamiento. En la expresión 4.3 muestra el algoritmo que explica este método.

$$\begin{aligned} svm(i) &= entr_svm(Xe - xe(i) ; Y - ye(i) ; \gamma ; C) \\ precision_e(i) ; etiqueta_e(i) &= prueb_svm(xe(i) ; ye(i) ; svm(i)) \end{aligned} \quad (4.3)$$

En la expresión anterior se aprecia primeramente a $svm(i)$ que se corresponde al modelo que se obtendrá a partir del entrenamiento. La matriz Xe contiene las 80 corrientes y la matriz $Xe - xe(i)$ contiene a las

80 corrientes a excepción del subgrupo $xe(i)$, por lo que $Xe - xe(i)$ contiene 72 corrientes. Para diferentes valores de i se obtuvieron 10 tipos de matrices $Xe - xe(i)$, por lo que se generaron 10 modelos diferentes de *svm*. Este entrenamiento se realizó para una sola pareja de valores de C y γ . Si dicha combinación de C y γ produce 32 posibilidades según la tabla 4.8, se generaron entonces un total de 320 modelos de *svm*.

- **Prueba:** los 320 modelos de *svm* generados en el entrenamiento, se probaron con el segundo grupo restante de 20 corrientes. Esta prueba se realizó según la expresión 4.4

$$precision_p(i) ; etiqueta_p(i) = prueb_svm(xp(i) ; yp(i) ; svm(i)) \quad (4.4)$$

Es importante destacar la conformación de los grupos de corrientes, tanto para los entrenamientos como para las pruebas. Se intentó que en cada uno de los 10 subgrupos de entrenamiento conformados por 8 corrientes y en las 20 corrientes conformadas para la prueba, existiese, en cada uno de ellos, corriente de Inrush y cortocircuito que contaran con diferentes valores en por unidad de las tensiones, magnetizaciones iniciales negativas, positivas y cero, ángulos que produjesen tensiones máximas negativas, máximas positivas, intermedias y nulas, cortocircuitos por cada lado del transformador con diferentes resistencias de fallas así como energizaciones con el transformador en condición normal.

A partir de los entrenamientos y pruebas anteriores se obtuvieron los siguientes resultados:

- 3 svm con 100 % de precisión probando con $xp ; yp$
- 140 svm con 95 % de precisión probando con $xp ; yp$
- 174 svm con 90 % de precisión probando con $xp ; yp$
- 3 svm con 85 % de precisión probando con $xp ; yp$

4.7 Máquinas de vectores de soporte seleccionadas.

Para la selección de los modelos de svm, los cuales fueron mostrados como las soluciones de este trabajo, se tomaron primeramente aquellos que contasen con la mayor precisión, la cual correspondió a 3 modelos en los cuales obtuvieron 100 % de precisión a partir del conjunto de prueba x_p ; y_p . En las tablas 4.9, 4.10 y 4.11 se muestran los datos generales que componen a estas máquinas.

Tabla 4.9 Modelo 85 presentado como primera solución

Modelo 85					
Muestras usadas para entrenamiento	C	γ	Tipo de kernel	N° de vectores soporte	Rho
72	100	0,5	Rbf	26	0,0597
Precisión en entrenamiento	Errores con Inrush en entrenamiento	Errores con cortocircuito en entrenamiento	Precisión en prueba	Errores con Inrush en prueba	Errores con cortocircuito en prueba
62,5 % de 8 muestras (3 errores)	1 error sobre 2 muestras	2 errores sobre 6 muestras	100 % sobre 20 muestras (0 errores)	0 errores sobre 6 muestras	0 errores sobre 14 muestras

Fuente: Aljibes G. (2015)

Tabla 4.10 Modelo 165 presentado como segunda solución

Modelo 165					
Muestras usadas para entrenamiento	C	γ	Tipo de kernel	N° de vectores soporte	Rho
72	1.000	0,5	Rbf	26	0,0597
Precisión en entrenamiento	Errores con Inrush en entrenamiento	Errores con cortocircuito en entrenamiento	Precisión en prueba	Errores con Inrush en prueba	Errores con cortocircuito en prueba
62,5 % de 8 muestras (3 errores)	1 error sobre 2 muestras	2 errores sobre 6 muestras	100 % sobre 20 muestras (0 errores)	0 errores sobre 6 muestras	0 errores sobre 14 muestras

Fuente: Aljibes G. (2015)

Tabla 4.11 Modelo 265 presentado como tercera solución

Modelo 265					
Muestras usadas para entrenamiento	C	γ	Tipo de kernel	N° de vectores soporte	Rho
72	10.000	0,5	Rbf	26	0,0597
Precisión en entrenamiento	Errores con Inrush en entrenamiento	Errores con cortocircuito en entrenamiento	Precisión en prueba	Errores con Inrush en prueba	Errores con cortocircuito en prueba
62,5 % de 8 muestras (3 errores)	1 error sobre 2 muestras	2 errores sobre 6 muestras	100 % sobre 20 muestras (0 errores)	0 errores sobre 6 muestras	0 errores sobre 14 muestras

Fuente: Aljibes G. (2015)

Analizando las tablas anteriores se desprenden las siguientes interpretaciones:

- Estas tres máquinas son muy similares, la única diferencia radica en el valor de C el cual en 85 es 100, en 165 es 1.000 y en 245 es 10.000. Podría suponerse que por cada 80 modelos generados a partir de los lazos de programación utilizados en el entrenamiento se producen estas máquinas con tan alta precisión y que solo difieren en el valor de C , pero inspeccionando al modelo 5, el cual se produjo 80 modelos antes que el modelo 85, se obtuvo una precisión en con el conjunto de pruebas de 95 %.
- Un dato que surge al revisar los ciclos de entrenamiento y validación, es que estas tres máquinas fueron entrenadas con el mismo conjunto de 72 muestras y su validación se realizó con las mismas 8 muestras.
- Como resultado de las 320 máquinas obtenidas surgió una de ellas que utiliza la mitad de vectores soportes requeridos por los modelos 85, 165 y 245 para formar el hiper plano solución. De hecho, esta máquina cuenta con el menor número de vectores soporte del universo de 320 svm obtenidas. Los datos generales de esta máquina se muestran en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Modelo 298 el cual tiene el menor N° de V.S.

Modelo 298					
Muestras usadas para entrenamiento	C	γ	Tipo de kernel	N° de vectores soporte	Rho
72	10.000	0,013888	Rbf	13	50,63287
Precisión en entrenamiento	Errores con Inrush en entrenamiento	Errores con cortocircuito en entrenamiento	Precisión en prueba	Errores con Inrush en prueba	Errores con cortocircuito en prueba
87,5 % de 8 muestras (1 error)	1 error sobre 2 muestras	0 errores sobre 6 muestras	90 % sobre 20 muestras (2 errores)	2 errores sobre 6 muestras	0 errores sobre 14 muestras

Fuente: Aljibes G. (2015)

- A pesar de tener menor precisión con respecto al grupo de pruebas, la diferencia entre la precisión de entrenamiento y pruebas es menor a la de las máquinas presentadas como solución. Además los errores que afectan su precisión en ambos casos, son sobre muestras tipo Inrush y no sobre muestras tipo cortocircuito, este tipo de error podría llamarse el error “menos malo” ya que confunde una condición normal con una condición perniciosa. Como se dijo anteriormente, el valor más relevante de esta máquina es que requiere una menor cantidad de vectores soportes para realizar un hiper plano con 90 % de precisión, en el cual se comete el error “menos malo”. Esta máquina también fue considerada también como una solución debido a todas las bondades explicadas anteriormente.

4.8 Desempeño de las máquinas de vectores de soporte seleccionadas

Se creará una matriz de datos la cual estará compuesta por muestras de entrenamiento, validación y pruebas, además de muestras que cuenten con parámetros diferentes a los previstos en la tabla 4.7. En la tabla 4.13 se muestran las diferentes premisas de simulación de estas nuevas muestras.

Tabla 4.13 Premisas de simulación para prueba final de las svm solución

Magnetización inicial (pu)	Voltaje (pu)	Ángulo del voltaje (coseno)		Condición del transformador	Resistencia de falla (ohmios)	Ubicación de la falla
-0,5413	0,95 1,2	27°	73°	Normal Cortocircuito	5 500	Alta tensión Baja tensión
-0,10625		108°	172°			
0,10625		214°	239°			
0,5413		345°	387°			

Fuente: Aljibes G. (2015)

A partir de lo dicho anteriormente se construyó una matriz para evaluar el desempeño con una mezcla de datos de entrenamiento, validación, pruebas y nuevas corrientes, generando así una matriz de 50 corrientes donde figuran 23 nuevas muestras. El resultado de los modelos 85, 165, 245 y 298 con respecto a esta matriz de desempeño es el que se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Resultado de las svm solución ante matriz de desempeño

	Precisión en desempeño	Errores con Inrush en desempeño	Errores con cortocircuito en desempeño
Modelos 85	90 % de 50 muestras (5 errores)	4 errores sobre 21 muestras	1 errores sobre 29 muestras
Modelos 165	90 % de 50 muestras (5 errores)	4 errores sobre 21 muestras	1 errores sobre 29 muestras
Modelo 245	90 % de 50 muestras (5 errores)	4 errores sobre 21 muestras	1 errores sobre 29 muestras
Modelo 298	86 % de 50 muestras (7 errores)	5 errores sobre 21 muestras	2 errores sobre 29 muestras

Fuente: Aljibes G. (2015)

En la tabla anterior se observa la consistencia en la precisión entre los modelos 85, 165 y 245 con respecto al modelo 298, ya que se aprecia una mayor precisión en las 3 primeras con respecto a la última de ellas. Además de que los errores cometidos por los modelos 85, 165 y 245 ante cortocircuitos son la mitad del valor mostrado por el modelo 298, por lo que es un dato a considerar al momento de seleccionar una única solución proveniente de las 320 svm.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se observaron cuatro niveles de descomposición respecto a dos tipos de señales de corriente estudiadas, aplicando para ello cuatro tipos de wavelets madres. Se encontraron rasgos característicos en dos de estas cuatro transformadas, específicamente en los detalles tres y dos. Estos rasgos característicos, se componen de seis valores de los cuales solo uno de ellos proviene de aplicar exclusivamente la transformada de wavelets, cinco rasgos provienen de aplicar cálculos estadísticos a los detalles tres y dos, mencionados anteriormente, y el último de estos rasgos se obtuvo directamente de aplicar estos mismos cálculos estadísticos a las muestras en el plano tiempo de las corrientes.

Con la simulación de diferentes escenarios se extrajeron los rasgos antes mencionados. Esto se realizó con el objeto de entrenar un conjunto de trescientas veintes máquinas de vectores de soporte, empleando para ello una combinación entre C y γ de treinta y dos pares de valores y fueron entrenadas utilizando el procedimiento de validación cruzada, usando setenta y dos muestras para entrenar y diez muestras para validar. Las máquinas obtenidas son de kernel tipo función base radial. Se lograron conseguir máquinas hasta con un cien por ciento de precisión en la fase de pruebas. Se seleccionaron, además de las máquinas con precisión de cien por ciento (tres de trescientas veinte), aquella máquina que tuviese la menor cantidad de vectores soporte, presentando como solución de este trabajo cuatro diferentes máquinas. Se evaluaron estas cuatro máquinas con muestras de entrenamiento, validación, pruebas, además de muestras nunca evaluadas por ellas y se encontraron

precisiones por encima del ochenta y cinco por ciento, difiriendo sus precisiones en menos de cuatro por ciento.

Estas afirmaciones revelan la importancia del proceso de observación, el cual debe ser amplio y utilizar un grupo nutrido de cálculos para hallar los rasgos que diferencian a una clase de otro. Además es interesante observar como máquinas con menores vectores de soporte pueden tener desempeños similares de aquellas con mayor numero, esto reafirma la calidad de los rasgos obtenidos en el proceso de observación y caracterización.

5.2 Recomendaciones

Este trabajo persiguió principalmente caracterizar a las corrientes de Inrush y cortocircuito en transformadores de potencia. Su implementación se delimitó a los transformadores monofásicos en condiciones de vacío, así que para profundizar y extender esta investigación es recomendable lo siguiente:

- Extraer los rasgos conseguidos en este trabajo a señales de corriente provenientes de modelos de transformadores trifásicos los cuales previo a la energización con cargas eléctricas conectadas. Para ello se requiere de mayor recurso computacional del que se dispuso en la realización de este trabajo.
- Implementar en hardware, el software determinado en este documento, específicamente las cuatro máquinas de vectores de soporte conseguidas, para posteriormente realizar pruebas de campo y monitorear su desempeño.
- Es también recomendable considerar en estos modelos de simulación a los transformadores de corriente dispuestos en ambos lados del transformador de potencia, teniendo en cuenta la curva de histéresis asociada a estos sensores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] B. Kasztenny y M. Kezunovic, (1998) Digital relays improve protection of large transformers, IEEE Computer Application in Power.

[2] M. A. Rahman and B. Jeyasurya, (1988) A state-of-the-art review of transformer protection algorithms, IEEE Trans. Power Delivery.

[3] Peilin L. Mao and Raj K. Aggarwal, (2001) A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformers Using Combined Wavelet Transform and Neural Network, IEEE Transactions on Power Delivery.

[4] Manson Russell, (1980) El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores, 8va Edición.

[5] E. E. Staff del M.I.T., (1981) Circuitos Magnéticos y Transformadores, 1er Edición.

[6] Cruz A. y Araca J., (2005) Diseño de un sistema para la discriminación entre las corrientes de Inrush y cortocircuito en un transformador de potencia usando redes neuronales artificiales.

[7] Jiménez C. y Jiménez J. (2010) Clasificación de señales de voz utilizando transformada de wavelet y máquinas de vectores de soporte.

[8] Casoria Silvano. Hysteresis Modeling in the Matlab/Power System Blockset.

[9] Betancourt Gustavo (2005). Las máquinas de Soporte Vectorial (SVMs) Scientia Technica Año XI, No 27, Abril 2005 UTP, ISSN 01222-1701.

[10] Mitra S. (2007) Procesamientos de Señales Digitales (1 ed. en español). Mexico: McGrawHill Interamericana.

[11] Chui K Charles (1992). An Introduction in Wavelet .Academia. Press Inc. Reino Unido.

[12] Mallat Stephane (1998) A Wavelet Tour of Signal Processing. Segunda Edición Academic Express U.S.A.

[13] Kaiser Gerald (1999)“A Friendly Guide to Wavelets” Birkhauser U.S.A.

[14] Donoho D.(1995). Denoising by soft – thresholding. IEEE. Trabs.
Information theory. Vol 41, num. 3.

[15] Jiménez Carlos, Diaz J. A., Del Pino P. y Rothman H. (2008) Aplicación de la transformada de wavelet para el análisis de señales de voz normales y patológicas. Revista de Ingeniería. Vol. 15. No. 1. Venezuela.

[16] Duda Richard, Peter Hart y Stork David. (2001) Pattern Classification. Edición John Willey & Sons año.

[17] González L. (2003). Modelos de Clasificación basados en Máquinas de Vectores Soporte. Departamento de Economía Aplicada. Universidad de Sevilla. España.

[18] Gunn Steve, (1998) Support Vector Machines for Classification and Regression. Faculty of Engineering and Applied Science. University of Southampton USA.

[19] Theodoridis Sergios, Koutroumbas Konstantinos (2006) Patter Recognition tercera Edición. Academia Press (AP)

[20] Crisianini Nello, Shawe –Taylor John[1999] An Introduction to support vector machines.