



Universidad de Jaén

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

Grado en Ingeniería Eléctrica

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE RELÉ DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL CON DISCRIMINACIÓN MEDIANTE TRANSFORMADA WAVELET PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA PARA SIMULINK

Alumno: MOURAD KRIM RAHAOUI

Tutor: Prof. D. CARLOS LUIS SÁNCHEZ MARTOS

Dpto: INGENIERÍA ELÉCTRICA



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don CARLOS SÁNCHEZ MARTOS , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE RELÉ DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL CON DISCRIMINACIÓN MEDIANTE TRANSFORMADA WAVELET PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA PARA SIMULINK, que presenta MOURAD KRIM RAHAOUI, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, JUNIO de 2015

El alumno:

MOURAD KRIM RAHAOUI

Los tutores:

CARLOS LUIS SÁNCHEZ MARTOS

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y a la vez apoyado a lo largo de estos años de universidad.

En primer lugar, agradecer a mis amigos, compañeros de piso, simplemente hermanos, ya que me han sabido transmitir mediante su ejemplo lo que es la fuerza de voluntad y el sacrificio en el trabajo. Si no hubiese sido por ellos, difícilmente estaría redactando estas palabras. Dar mis mayores agradecimientos a la persona que desde antes de ser siquiera amigos, simplemente compañeros de clase nos ayudabamos y estábamos dispuestos a resolver cualquier duda que se nos planteara, y pasados los años se ha convertido en mi mayor apoyo tanto en los estudios como en la vida. Espero que se sientan orgullosos de mí y de que haya conseguido el objetivo que me propuse aquella noche del mes de marzo cuando decidí estudiar ingeniería.

En segundo lugar, quiero mostrar mi mas sincero agradecimiento a Carlos Sánchez Martos, tutor del presente trabajo, siempre dispuesto a ayudarme, aconsejarme y a enseñarme, y como no, a arreglar cualquier desaguisado que se presentara. Reitero mi agradecimiento ya que sin sus aportaciones no hubiese sido posible la redacción y ejecución del mismo. Gracias también por haberme dado la magnífica oportunidad de realizar la beca de colaboración en la que hemos adquirido un sin fin de conocimiento.

En tercer lugar, agradecer a mi familia el apoyo mostrado y la educación recibida, en especial a mi abuelo, que en paz descanse, ya que con su ejemplo he aprendido el significado de la honestidad y el sacrificio por un trabajo bien hecho.

Finalmente, agradecer al resto de mis profesores, no sólo de la universidad de Jaén, sino también a los profesores del instituto IES Murgi y del instituto IES Mar Azul ya que han formado los pilares de lo que soy actualmente.

RESUMEN

En el presente trabajo se van a asentar las bases de la protección diferencial para poder entender el principio de funcionamiento del mismo y poder desarrollar un modelo de relé diferencial para transformadores de potencia óptimo, y así adaptarse a las más modernas tecnologías y a los problemas que se presentan en la actualidad en el campo que nos atañe.

Una vez realizado un estudio de los sistemas de protección diferencial para transformadores de potencia y los problemas que estos presentan, nos hemos decantado por un novedoso método, el cual esta siendo invistigado en el campo científico mundial. Éste consiste en el desarrollo y validación de un modelo de relé de protección diferencial con discriminación mediante transformada wavelet para transformadores de potencia.

La protección diferencial con discriminación wavelet actualmente no se encuentra desarrollada e implementada en el sistema eléctrico mundial, ya que como se ha indicado anteriormente este método se encuentra en un proceso de investigación.

La aplicación de la transformada wavelet a la protección diferencial es relativamente reciente, a pesar de que la aparición de la técnica fue desarrollada por Joseph Fourier en el siglo XIX. Esta técnica es utilizada en diversos campos como, por ejemplo, el campo de la fotografía, la medicina y la electricidad.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. ÍNDICES

1.1 Índice general

CAPÍTULO 1. ÍNDICES	I
1.1 Índice general.....	I
1.2 Índice figuras.....	VI
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	1
2.1 Objeto del trabajo.....	3
2.2 Antecedentes	3
2.3 Desarrollo histórico	4
2.3.1 El transformador eléctrico.....	4
2.3.2 Sistemas de protección	6
2.3.2.1 Sistemas de protección directos	6
2.3.2.1.1 Fusibles	7
2.3.2.1.2 Relés directos	7
2.3.2.2 Sistemas de protección indirectos.....	7
2.3.2.3 Sistemas electromagnéticos	8
2.4 LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL	12
2.4.1 Evolución histórica de la protección diferencial.	12
2.4.2 Principios básicos	13
2.4.3 Protección diferencial utilizando relés de sobreintensidad temporizados.....	20
2.4.4 Protección diferencial utilizando relés diferenciales de porcentaje	20
2.4.5 Frenado por armónicos.....	23

2.4.5.1	Frenado por segundo y quinto armónico.....	24
2.4.5.2	Frenado de armónicos pares	26
2.4.6	Bloqueo por armónicos.....	27
2.4.6.1	Bloqueo por segundo armónico	27
2.4.6.2	Bloqueo por segundo y quinto armónico.....	28
2.4.6.3	Compartición de armónicos.....	29
2.4.7	Métodos de reconocimiento de la forma de onda.....	29
2.4.8	Método de detección de baja corriente.....	29
2.4.9	Método de bloqueo por corriente continua	30
2.4.10	Relé de bloqueo lógico.....	32
2.5	Protección diferencial digital	34
2.5.1	Métodos de discriminación	35
2.5.1.1	Métodos por segundo armónico.....	35
2.5.1.2	Método con funciones de Walsh	40
2.5.1.3	Método por lógica difusa	42
2.5.1.4	Método por redes neuronales artificiales	43
2.5.1.5	Métodos por transformada wavelet.....	46
CAPÍTULO 3.	TRANSFORMADA WAVELET.....	59
3.1	Introducción	60
3.2	Bases de la función escala	61
3.3	Bases Wavelet.....	63
3.3.1	Transformada Wavelet	64
3.3.2	Wavelets ortogonales y discretas	65
3.3.3	Descomposición Wavelet	67
3.3.4	Reconstrucción Wavelet.....	71
3.3.5	Tipos de familias de transformada wavelet.....	71
3.3.5.1	Haar	71

3.3.5.2	Daubechies	72
3.3.5.2.1	Daubechies para MATLAB	73
3.3.5.3	Biorthogonal	78
3.3.5.4	Coiflets	78
3.3.5.5	Symlets	79
CAPÍTULO 4. MODELADO DEL RELÉ		79
4.1	Análisis de la corriente diferencial.....	82
4.1.1	Falta interna en el lado del primario.....	83
4.1.1.1	Cortocircuito fase - tierra.....	83
4.1.1.2	Cortocircuito fase – fase	86
4.1.1.3	Cortocircuito fase – fase – tierra	88
4.1.2	Falta interna en el lado del secundario	89
4.1.2.1	Cortocircuito fase – tierra	90
4.1.2.2	Cortocircuito fase – fase	92
4.1.2.3	Cortocircuito fase – fase – tierra	94
4.1.3	Corriente de conexión.....	96
4.1.4	Falta externa en el lado del primario.....	98
4.1.4.1	Cortocircuito fase – tierra	99
4.1.4.2	Cortocircuito fase – fase	101
4.1.4.3	Cortocircuito fase – fase – tierra	103
4.1.5	Falta externa en el lado del secundario	105
4.1.5.1	Cortocircuito fase – tierra	105
4.1.5.2	Cortocircuito fase – fase	107
4.1.5.3	Cortocircuito fase – fase – tierra	109
4.2	Análisis de la corriente diferencial mediante la transformada wavelet.....	111
4.2.1	Falta interna en el lado del primario.....	112

4.2.2	Falta interna en el lado del secundario	113
4.2.3	Falta externa en el lado del primario.....	114
4.2.4	Falta externa en el lado del secundario	115
4.2.5	Corriente de conexión.....	116
4.2.6	Conclusiones	116
4.3	Elección del detalle más idóneo para el análisis	117
4.3.1	Falta interna en el lado del primario.....	117
4.3.2	Falta interna en el lado del secundario	118
4.3.3	Falta externa en el lado del primario.....	118
4.3.4	Falta externa en el lado del secundario	119
4.3.5	Corriente de conexión.....	119
4.3.6	Conclusiones	120
4.4	Modelos realizados	120
4.4.1	Primer modelo	120
4.4.2	Segundo modelo.....	126
4.4.3	Tercer modelo.....	133
4.5	Modelo propuesto	136
4.6	Bloque MATLAB-SIMULINK realizado	141
4.6.1	Simulación y verificación del relé.....	146
4.6.1.1	Transformador 1.....	146
4.6.1.1.1	Energización	147
4.6.1.1.2	Falta externa.....	149
4.6.1.1.3	Falta interna.....	150
4.6.1.1.4	Verificación del relé en diferentes casos.....	154
4.6.1.2	Transformador 2.....	156
4.6.1.2.1	Energización	157
4.6.1.2.2	Falta externa.....	158

4.6.1.2.3	Falta interna.....	160
4.6.1.2.4	Verificación del relé en diferentes casos.....	164
4.6.1.2.5	Transformador 3	166
4.7	Conclusiones.....	167
CAPÍTULO 5.	Bibliografía.....	170

1.2 Índice figuras

Fig. 2-1 Esquema de bloques de un relé digital.....	10
Fig. 2-2 Esquema básico de una protección diferencial.	14
Fig. 2-3 Esquema básico de una falta externa.	14
Fig. 2-4 Falta externa.	16
Fig. 2-5 Falta interna - alimentación por un extremo.	17
Fig. 2-6 Falta interna - alimentación por ambos extremos.....	17
Fig. 2-7 Función de frenado de un relé diferencial.	18
Fig. 2-8 Opciones típicas para las características de relés diferenciales de porcentaje.....	22
Fig. 2-9 Relé diferencial trifásico con frenado por segundo armónico de Sharp y Glassburn, 1958.	25
Fig. 2-10 Lógica de un elemento diferencial para frenado por 2º y 5º armónico.....	26
Fig. 2-11 Bloqueo de relé diferencial mediante el reconocimiento de la duración de los intervalos de baja corriente.	30
Fig. 2-12 Diagrama lógico del bloqueo por corriente continua.....	31
Fig. 2-13 Esquema de bloqueo lógico para relé diferencial numérico.	33
Fig. 2-14 Respuesta de frecuencia del filtro de paso bajo digital de 10 Hz.	36
Fig. 2-15 Diagrama de bloques del método Sykes y Morrison.	37
Fig. 2-16 Respuesta para una corriente de conexión.	37
Fig. 2-17 Respuesta para una falta interna.....	38
Fig. 2-18 Diagrama de flujo del algoritmo de sobreintensidad diferencial de Larson, Flechsig y Schweitzer.	39
Fig. 2-19 Diagrama de flujo del sistema de protección propuesto.	40
Fig. 2-20 Algoritmo Walsh para corriente de conexión.	41
Fig. 2-21 Algoritmo Walsh para falta interna.....	41
Fig. 2-22 Creación de una señal de relé difusa.	42
Fig. 2-23 Amplitud de un fasor de intensidad representado como señal difusa.....	43
Fig. 2-24 Entradas y salida de la red neuronal artificial.	44
Fig. 2-25 Esquema simulado en MATLAB-SIMULINK.....	45
Fig. 2-26 Diagrama de flujo de toma de decisiones.....	47

Fig. 2-27 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una corriente de conexión.	49
Fig. 2-28 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una conmutación de carga.	49
Fig. 2-29 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una conmutación de condensador.....	50
Fig. 2-30 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una falta a tierra.....	50
Fig. 2-31 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente de funcionamiento normal.....	52
Fig. 2-32 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente de conexión.....	52
Fig. 2-33 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente falta fase-tierra.	53
Fig. 2-34 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente falta trifásica-tierra.	53
Fig. 2-35 Diagrama de flujo de protección diferencial.....	54
Fig. 2-36 Corriente diferencial para una falta interna AB-G y los distintos detalles de TW.....	55
Fig. 2-37 Corriente diferencial de una corriente de conexión y los distintos detalles de TW.....	56
Fig. 2-38 (a) corriente de conexión, (b) Falta interna para D5.	56
Fig. 2-39 Comparación entre falta interna y corriente de conexión.	58
Fig. 3-1 Esquema de descomposición en series Wavelet.	70
Fig. 3-2 Ejemplo de descomposición de una señal por DWT.	70
Fig. 3-3 Wavelet Haar para la función psi.....	72
Fig. 3-4 Wavelets Daubechies para la función psi.....	73
Fig. 3-5 Menú wavelet MATLAB.	74
Fig. 3-6 Descomposición de una señal mediante Daubechies (por menú).....	75
Fig. 3-7 Descomposición de una señal mediante Daubechies (por comando).	76
Fig. 3-8 Segunda descomposición de una señal mediante Daubechies (por comando).....	77
Fig. 3-9 Wavelets Biorthogonal para la función psi.....	78
Fig. 3-10 Wavelets Coiflets para la función psi.....	79
Fig. 3-11 Wavelets Symlets para la función psi.	79
Fig. 4-1 Esquema del sistema de potencia a simular.	82

Fig. 4-2 Esquema para simular una falta interna lado primario.	83
Fig. 4-3 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	84
Fig. 4-4 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	84
Fig. 4-5 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	85
Fig. 4-6 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	86
Fig. 4-7 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	86
Fig. 4-8 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	87
Fig. 4-9 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	88
Fig. 4-10 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	88
Fig. 4-11 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	89
Fig. 4-12 Esquema para simular una falta interna lado secundario.....	90
Fig. 4-13 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	90
Fig. 4-14 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	91
Fig. 4-15 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	91
Fig. 4-16 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	93
Fig. 4-17 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	93
Fig. 4-18 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	94
Fig. 4-19 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	94
Fig. 4-20 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	95
Fig. 4-21 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	95
Fig. 4-22 Esquema para simular una corriente de conexión.	96
Fig. 4-23 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	96
Fig. 4-24 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	97
Fig. 4-25 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	97
Fig. 4-26 Esquema para simular una falta externa lado primario.	98
Fig. 4-27 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	99
Fig. 4-28 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	100
Fig. 4-29 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	100
Fig. 4-30 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	101
Fig. 4-31 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	102
Fig. 4-32 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	102
Fig. 4-33 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	103
Fig. 4-34 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	104

Fig. 4-35 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	104
Fig. 4-36 Esquema para simular una falta externa lado secundario.....	105
Fig. 4-37 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	106
Fig. 4-38 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	106
Fig. 4-39 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	107
Fig. 4-40 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	108
Fig. 4-41 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	108
Fig. 4-42 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	109
Fig. 4-43 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.....	110
Fig. 4-44 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.....	110
Fig. 4-45 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.	111
Fig. 4-46 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.	112
Fig. 4-47 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B.	112
Fig. 4-48 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.	113
Fig. 4-49 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B.	113
Fig. 4-50 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.	114
Fig. 4-51 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B.	114
Fig. 4-52 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.	115
Fig. 4-53 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B	115
Fig. 4-54 Análisis Wavelet db1 para corriente de conexión.....	116
Fig. 4-55 Gráfica comparativa de diferentes detalles.	117
Fig. 4-56 Gráfica comparativa de diferentes detalles.	118
Fig. 4-57 Gráfica comparativa de diferentes detalles.	118
Fig. 4-58 Gráfica comparativa de diferentes detalles.	119
Fig. 4-59 Gráfica comparativa de diferentes detalles.	119
Fig. 4-60 Bloques SIMULINK para obtener Id en p.u.	120
Fig. 4-61 Análisis Wavelet de cada uno de los casos posibles.....	123
Fig. 4-62 Resultados para la ecuación 3.1.	125
Fig. 4-63 Resultados para la ecuación 3.2.	125
Fig. 4-64 Ejemplo de operación del relé diferencial con discriminación por Wavelet.....	127
Fig. 4-65 Gráfica señal original vs señal aproximada.	131
Fig. 4-66 Datos obtenidos de la ec. 4.3 para la señal original.	132

Fig. 4-67 Datos obtenidos de la ec. 4.3 para la señal aproximada.	132
Fig. 4-68 Análisis TW para señal de falta y energización.	135
Fig. 4-69 Datos obtenidos de la ec. 3.4.	136
Fig. 4-70 Señal Id y TW.	137
Fig. 4-71 Datos obtenidos de la ec. 4.4 para primer modelo de transformador.	137
Fig. 4-72 Datos obtenidos de la ec. 4.4 para segundo modelo de transformador.	140
Fig. 4-73 Datos obtenidos de la ec. 4.4 para tercer modelo de transformador.	140
Fig. 4-74 Bloque SIMULINK del relé diferencial.	141
Fig. 4-75 Toma de datos, paso a pu y obtener Id e Ia.	142
Fig. 4-76 Bloques SIMULINK para implementar relé de porcentaje.	143
Fig. 4-77 Bloque implementación transformada wavelet.	144
Fig. 4-78 Máscara del relé propuesto.	145
Fig. 4-79 Esquema conexión relé diferencial propuesto para simular una energización.	147
Fig. 4-80 Intensidad diferencial obtenida del transformador.	148
Fig. 4-81 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.	148
Fig. 4-82 Señal de salida del relé diferencial propuesto.	148
Fig. 4-83 Intensidad diferencial obtenida del transformador.	149
Fig. 4-84 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.	150
Fig. 4-85 Señal de salida del relé diferencial propuesto.	150
Fig. 4-86 Intensidad diferencial obtenida del transformador primer caso.	151
Fig. 4-87 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD primer caso.	151
Fig. 4-88 Señal de salida del relé diferencial propuesto primer caso.	152
Fig. 4-89 Intensidad diferencial obtenida del transformador segundo caso.	152
Fig. 4-90 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD segundo caso.	153
Fig. 4-91 Señal de salida del relé diferencial propuesto segundo caso.	153
Fig. 4-92 Esquema conexión relé diferencial propuesto para simular una falta interna.	154
Fig. 4-93 Intensidad diferencial obtenida del transformador.	155
Fig. 4-94 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.	155
Fig. 4-95 Señal de salida del relé diferencial propuesto.	155
Fig. 4-96 Intensidad diferencial obtenida del transformador.	157
Fig. 4-97 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.	158

Fig. 4-98 Señal de salida del relé diferencial propuesto.	158
Fig. 4-99 Intensidad diferencial obtenida del transformador.	159
Fig. 4-100 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.	159
Fig. 4-101 Señal de salida del relé diferencial propuesto.	160
Fig. 4-102 Intensidad diferencial obtenida del transformador primer caso.	161
Fig. 4-103 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD primer caso.	161
Fig. 4-104 Señal de salida del relé diferencial propuesto primer caso.	162
Fig. 4-105 Intensidad diferencial obtenida del transformador segundo caso.	162
Fig. 4-106 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD segundo caso.	163
Fig. 4-107 Señal de salida del relé diferencial propuesto segundo caso.	163
Fig. 4-108 Intensidad diferencial obtenida del transformador.	164
Fig. 4-109 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.	165
Fig. 4-110 Señal de salida del relé diferencial propuesto.	165

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

2.1	Objeto del trabajo	3
2.2	Antecedentes	3
2.3	Desarrollo histórico.....	4
2.3.1	El transformador eléctrico	4
2.3.2	Sistemas de protección.....	6
2.3.2.1	Sistemas de protección directos.....	6
2.3.2.1.1	Fusibles.....	7
2.3.2.1.2	Relés directos	7
2.3.2.2	Sistemas de protección indirectos.....	7
2.3.2.3	Sistemas electromagnéticos.....	8
2.4	LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL	12
2.4.1	Evolución histórica de la protección diferencial.....	12
2.4.2	Principios básicos	13
2.4.3	Protección diferencial utilizando relés de sobreintensidad temporizados.....	20
2.4.4	Protección diferencial utilizando relés diferenciales de porcentaje.....	20
2.4.5	Frenado por armónicos	23
2.4.5.1	Frenado por segundo y quinto armónico	24
2.4.5.2	Frenado de armónicos pares.....	26
2.4.6	Bloqueo por armónicos	27
2.4.6.1	Bloqueo por segundo armónico.....	27
2.4.6.2	Bloqueo por segundo y quinto armónico	28

2.4.6.3	Compartición de armónicos.....	29
2.4.7	Métodos de reconocimiento de la forma de onda	29
2.4.8	Método de detección de baja corriente	29
2.4.9	Método de bloqueo por corriente continua.....	30
2.4.10	Relé de bloqueo lógico	32
2.5	Protección diferencial digital.....	34
2.5.1	Métodos de discriminación	35
2.5.1.1	Métodos por segundo armónico	35
2.5.1.2	Método con funciones de Walsh	40
2.5.1.3	Método por lógica difusa	42
2.5.1.4	Método por redes neuronales artificiales.....	43
2.5.1.5	Métodos por transformada wavelet.....	46

2.1 Objeto del trabajo

El presente trabajo se realiza con el fin de conocer la protección diferencial en transformadores de potencia y desarrollar un modelo de un relé de protección diferencial para transformadores trifásicos de potencia, para su uso en simulaciones con el programa SIMULINK. El relé debe incorporar funciones de discriminación de estados mediante el uso de la transformada wavelet, así como poder ser completamente configurable.

2.2 Antecedentes

Los transformadores de potencia constituyen un componente esencial en los sistemas de energía eléctrica moderna, por lo tanto, su protección es muy importante y fundamental para el desarrollo de nuevas técnicas que son más eficientes con el fin de protegerlos. Si se produce una falta en un transformador de potencia es necesario aislar el transformador con la mayor brevedad posible, de modo que el daño que pueda sufrir el transformador sea mínimo. Los transformadores de potencia están sujetos a muchos tipos de faltas internas y externas. Por otra parte, la corriente de conexión generada en el momento de la energización del transformador se asemeja a la condición de una falta interna. Este fenómeno de irrupción dispara el transformador de potencia si el sistema de protección utilizado no está diseñado para contener este tipo de falsos disparos. El método más eficaz utilizado para proteger los transformadores de potencia es la técnica de protección diferencial.

Los relés diferenciales se podrían clasificar en tres tipos principales: relés electromecánicos, relés electrónicos analógicos y relés digitales. Hoy en día, los ordenadores hacen que el diseño de los relés digitales sea más fácil y cómodo.

La investigación se centra en la mejora de las técnicas de software sin los cambios de hardware. Se han introducido muchos enfoques de protección digital desde el primer microprocesador, el cual fue introducido en 1971.

Muchas de las técnicas de inteligencia, como la lógica difusa, las redes neuronales artificiales y los algoritmos genéticos, se han propuesto para su aplicación en la protección diferencial de transformadores de potencia. La transformada de Fourier ha sido el método en el que se han basado para el análisis de la señal durante un largo tiempo hasta la actualidad. Posteriormente, se desarrolló la transformada wavelet (WT), la cual se basa en los principios de la “short-time Fourier transform” (STFT) y las técnicas de varias resoluciones.

La diferencia entre WT y STFT es que el WT utiliza ventanas variables para el análisis de señales, es decir, utiliza una ventana estrecha para el análisis de señales de alta frecuencia y una ventana ancha para el análisis de señales de baja frecuencia, y la STFT utiliza una ventana de anchura constante para el análisis de todas las señales con diferentes frecuencias.

2.3 Desarrollo histórico

2.3.1 El transformador eléctrico

Según [13], Con la irrupción, hacia finales del siglo XIX, de los primeros sistemas eléctricos alternos, empezaba una etapa entonces apenas insospechable del desarrollo de la energía eléctrica.

Para llegar hasta la invención del transformador alrededor de 1885, se han tenido que asentar las bases teóricas aproximadamente medio siglo antes.

El fenómeno de inducción electromagnética en el que se basa el funcionamiento del transformador fue descubierto por Michael Faraday en 1831. Se basa fundamentalmente en que cualquier variación de flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado genera una corriente inducida, y en que la corriente inducida sólo permanece mientras se produce el cambio de flujo magnético.

La primera bobina de inducción para generar tensiones alternas desde una fuente de corriente continua fue inventada por Nicholas Callan del College de

Maynooth, Irlanda, en 1836. Fue uno de los primeros investigadores en darse cuenta de que cuantas más espiras hay en el secundario, en relación con el bobinado primario, más grande es el aumento de la Fem.

Los científicos e investigadores basaron sus esfuerzos en evolucionar las bobinas de inducción para obtener mayores tensiones en las baterías. En lugar de corriente alterna, su acción se basó en un vibrante mecanismo de apertura y cierre que regularmente interrumpía el flujo de la corriente continua de las baterías.

Entre la década de 1830 y la década de 1870, los esfuerzos para construir bobinas de inducción, en su mayoría por ensayo y error, reveló lentamente los principios básicos de los transformadores. Un diseño práctico y eficaz no apareció hasta la década de 1880, pero dentro de un decenio, el transformador tendría un papel decisivo en la “Guerra de Corrientes”, y en que los sistemas de distribución de corriente alterna triunfara sobre sus homólogos de corriente continua, una posición dominante que mantienen desde entonces.

En 1876, el ingeniero ruso Pavel Yablochkov inventó un sistema de iluminación basado en un conjunto de bobinas de inducción en el que el bobinado primario se conectaba a una fuente de corriente alterna y los devanados secundarios podían conectarse a varias “velas eléctricas” (lámparas de arco), de su propio diseño. Las bobinas utilizadas en el sistema se comportaban como transformadores primitivos. La patente alegó que el sistema podía, “proporcionar suministro por separado a varios puntos de iluminación con diferentes intensidades luminosas procedentes de una sola fuente de energía eléctrica”.

En 1876, los ingenieros de la empresa Ganz en Hungría asignaron parte de sus recursos de ingeniería para la fabricación de aparatos de iluminación eléctrica para Austria y Hungría.

En 1882, Lucien Gaulard y John Dixon Gibbs expusieron por primera vez un dispositivo con un núcleo de hierro llamado “generador secundario” en Londres. Posteriormente vendieron la idea a la compañía Westinghouse de EEUU. También

fue expuesto en Turín, Italia 1884, donde fue adaptado para el sistema de alumbrado eléctrico.

En 1883, realizaron más de cincuenta instalaciones para dicho fin. Ofrecían un sistema que constaba de dos lámparas incandescentes y de arco, generadores y otros accesorios.

Entre 1884 y 1885, los ingenieros Húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri de la compañía Ganz crearon en Budapest el modelo “ZBD” de transformador de corriente alterna, basado en un diseño de Gaulard y Gibbs. Descubrieron la fórmula matemática de los transformadores, la relación entre la tensión primaria y secundaria y el número de espiras de cada devanado. Su solicitud de patente hizo el primer uso de la palabra “Transformador”, una palabra que había sido acuñada por Bláthy Ottó.

En 1885, George Westinghouse compró las patentes ZBD y las de Gaulard y Gibbs. Le encomendó a William Stanley la construcción de un transformador de tipo ZBD para uso comercial. Este diseño se utilizó por primera vez comercialmente en 1886.

2.3.2 Sistemas de protección

EL crecimiento de los sistemas eléctricos fue generando unas necesidades auxiliares, entre las cuales se incluyen los sistemas de protección.

Entre las muchas clasificaciones que podrían establecerse por el desarrollo histórico, se ha elegido la que fija etapas bien definidas en la evolución de los sistemas de protección:

2.3.2.1 Sistemas de protección directos

Son todos aquellos sistemas en los cuales el elemento de medida es, generalmente, el mismo que el de corte, o está incorporado en él, y la magnitud que hay que controlar, normalmente la intensidad, se aplica a la protección sin ningún tipo de transformación.

2.3.2.1.1 Fusibles

Es el método de protección más antiguo de todos los utilizados. Se basa en el incremento de temperatura que sufre un conductor al ser atravesado por una intensidad. Se calibran de forma que el conductor se funde cuando es atravesado por una intensidad prefijada, interrumpiendo el circuito.

Los fusibles constituyen un método de protección simple y relativamente económico que además tiene como principal ventaja el hecho de eliminar elevadas corrientes de cortocircuito en tiempos inferiores a los 5 ms. No obstante, presenta una serie de desventajas, como su poca precisión, bajo poder de corte, envejecimiento, etc.

2.3.2.1.2 Relés directos

Al igual que los fusibles, protegen contra cortocircuitos. Consisten en una bobina en serie con la entrada del interruptor automático, y que, por tanto, está recorrida por la intensidad controlada.

En el momento en que, por incremento de la intensidad, aumenta la fuerza del campo electromagnético generado en la bobina y supera la de un muelle antagonista que tiene el aparato, se produce la desconexión del interruptor automático o se desenclava un sistema de relojería que produce este disparo con un cierto retraso, según el modelo de relé de que se trate.

2.3.2.2 Sistemas de protección indirectos

Son aquellos en los que las magnitudes que hay que controlar (tensión, intensidad, temperatura, etc.) se transforman en valores normalizados antes de inyectarse al relé de protección.

En general, estos sistemas son más costosos que los directos, al precisarse además de la protección propiamente dicha, transductores y elementos de corte. Sin embargo con su aparición el concepto de protección alcanza su plenitud.

2.3.2.3 *Sistemas electromagnéticos*

La información a los relés en forma de intensidad o tensión es transformada por éstos en una fuerza capaz de cerrar unos contactos que establecen la continuidad en el circuito de disparo.

Según su construcción, los podemos clasificar en:

- Émbolo o armadura articulada;
Al superar del campo magnético de la bobina el esfuerzo antagonista de un resorte, la armadura se une al polo del electroimán, arrastrando un contacto móvil que lleva solidario.
- Disco de inducción;
El campo magnético generado en la bobina produce un par de giro en el disco, proporcional a la tensión o intensidad aplicada, obteniéndose, por tanto, un tiempo de actuación inversamente proporcional a la magnitud medida.
- Copa o cilindro de inducción;
Al disponer el núcleo de varios polos, permite su utilización en aquellos relés de protección en los que sea necesario comparar más de una magnitud. El par de giro es proporcional al producto vectorial de la dos magnitudes utilizadas.
- Sistemas de bobina móvil;
Los equipos de bobina móvil ocupan una situación intermedia entre los equipos electromagnéticos y los electrónicos. Poseen algunos elementos electrónicos tales como diodos, resistencias y condensadores, pero la medida se efectúa aún electromagnéticamente por medio de un dispositivo de medida polarizado de cuadro móvil.
Este sistema mide por integración los valores medios de la magnitud de entrada. La rapidez de este sistema es superior al electromagnético, y su consumo y tamaño son inferiores.
- Sistemas de electrónica convencional;

Este sistema mide por integración los valores instantáneos de la magnitud de entrada.

La aplicación de electrónica al campo de los sistemas de protección ha permitido desarrollar una nueva gama de tipos de protección, así como mejorar sus características de funcionamiento, tanto en precisión como en rapidez como así mismo en fiabilidad y duración.

- Sistemas electrónicos digitalizados;

La aparición en el mercado de los primeros microprocesadores, a finales de los años sesenta, impulsó a los grandes fabricantes de protecciones a diseñar sistemas basados en microprocesadores y aprovechar los desarrollos en tecnología de comunicaciones por fibra óptica que transmiten gran cantidad de información a alta velocidad.

El esquema básico de las protecciones digitalizadas es muy parecido al de las protecciones electrónicas. La diferencia fundamental es que las segundas realizan la medida de forma analógica, mientras que las digitales la realizan por medio de unos algoritmos que operan con los valores instantáneos de la señal de entrada. Para ello es necesario disponer de una unidad que realice un muestreo de esta señal y de un conversor analógico-digital.

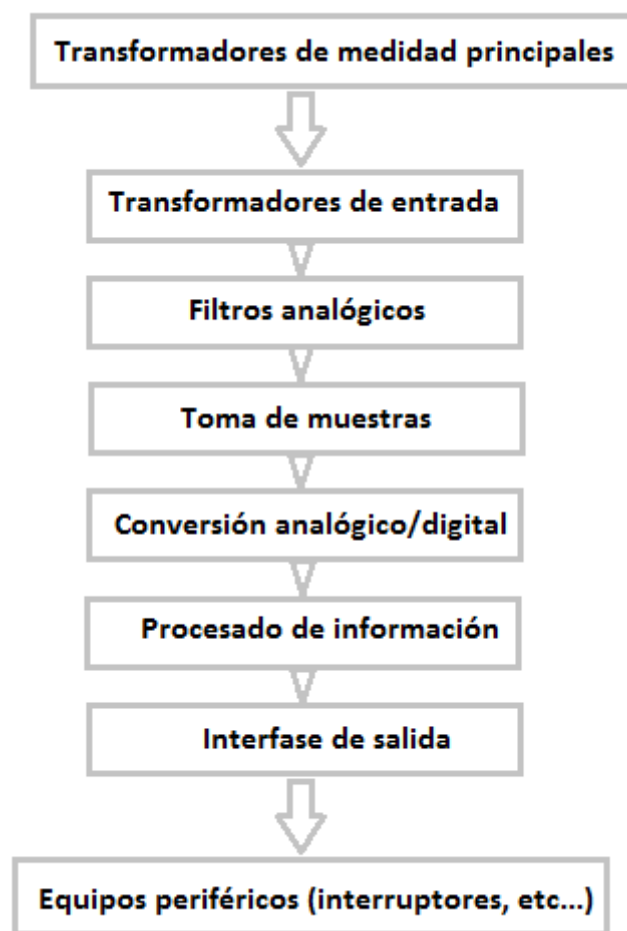


Fig. 2-1 Esquema de bloques de un relé digital.

Las principales ventajas que presenta la introducción de los microprocesadores en estos sistemas son:

- Facilidad para incorporar autodiagnósticos y funciones automáticas de inspección, lo cual representa una gran mejora en la fiabilidad y la seguridad. La supervisión continua permite la verificación de los circuitos de la CPU, memorias, dispositivos de ajuste y elementos de entrada y salida.
- Mejora de características. La complejidad de los sistemas eléctricos requiere unas sofisticadas características en los equipos de protección que

implican una gran cantidad de hardware cuando se utilizan relés convencionales, mientras que en los relés digitales la consecución de una característica determinada es sólo problema de software.

- Mejora de la flexibilidad y la aplicación. En los relés de protección digitales las funciones del relé son realizadas en la medida de lo posible por el software, y por tanto se pueden normalizar varios tipos de relés que tengan idéntico hardware.
- Reducción del conexionado entre equipos. La utilización de microprocesadores posibilita la relación de sistemas jerarquizados en los que las tradicionales uniones entre equipos que precisan un conductor para cada una de las señales, se sustituyen por comunicaciones en serie en las que un solo par de conductores pueden transmitir la totalidad de la información.

2.4 LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Las protecciones diferenciales constituyen sistemas de protección absolutamente selectivos, es decir, sistemas en los cuales la operación y selectividad dependen únicamente de la comparación de las intensidades de cada uno de los extremos de la zona protegida.

2.4.1 Evolución histórica de la protección diferencial.

Ya al final del siglo XIX algunos ingenieros hablaban sobre la protección diferencial (en la comparación de tensiones y corrientes en fases simples). En 1896 una primera propuesta comparaba las tensiones de dos fases de un sistema de corriente continua con el neutro. Un relé de báscula con bobinas en ambos lados estaba en equilibrio cuando las tensiones eran iguales.

Posteriormente una empresa propuso para sistemas trifásicos la comparación de las corrientes de las diferentes fases (un relé y dos bobinas por cada fase).

Schuckert propuso en 1900 otro relé diferencial de báscula. Ahora la corriente de una fase opera en un lado y las otras dos fases en el otro lado, un cambio en la carga de una simple fase dispara el relé.

Charles Hestermann Merz y Bernhard Price patentaron una protección diferencial que comparaba las corrientes en ambos lados del equipo de un sistema de potencia. El 16 de febrero de 1904 se presentó en Reino Unido la patente “mejoras en el método de medidas de protección de aparatos en sistemas de corriente alterna”, y el 31 de mayo de 1904 en Alemania. Por tanto se puede decir que el año 1904 es el año de nacimiento de la protección diferencial. A ambos lados de un transformador se instalaban transformadores de corriente. Los arrollamientos del secundario se conectaban de tal manera que la corriente durante la operación normal era cero. La conexión de los transformadores se realizó con hilos piloto. Este sistema se aplicaba tanto a protecciones de líneas como a protecciones de transformadores.

AEG desarrolló posteriormente un dispositivo universal trifásico. Este aparato podía ser pedido para diferentes necesidades como protección de cables, transformadores o generadores.

En 1920 Waldemar Petersen reconoció los problemas de disparos intempestivos en el caso de cortocircuitos fuera de la zona protegida. El problema era la saturación de los transformadores de corriente. Además, el cambio en las tomas de los transformadores de potencia también inducía a disparos intempestivos. Por esta causa propuso un relé de medida de cociente en 1930. Este relé no era disparado por la magnitud de la corriente diferencial, sino que tenía en cuenta el cociente entre la intensidad diferencial y la corriente de falta.

Para evitar los falsos disparos Albert Edward McColl propuso en 1929 un arrollamiento de inhibición (relé diferencial de porcentaje), el cual consistía en dos electroimanes que actúan sobre el brazo de una báscula. Un electroimán utiliza la suma geométrica de las corrientes para la inhibición y el otro utiliza la diferencia geométrica para el disparo. Ahora la corriente de disparo proporcional a la de falta tiene que ser muy grande para disparar, y de ahí el nombre de relé de porcentaje.

El problema de la corriente de conexión se solventaba con una temporización, ya que aunque se manejaba la idea de la inhibición por armónicos, hubo que esperar hasta los años 50 para disponer de filtros y rectificadores que bloqueasen la protección con seguridad y rapidez.

2.4.2 Principios básicos

Las protecciones diferenciales están basadas en la primera ley de Kirchoff, que dice que “la suma vectorial de todas las intensidades que llegan a un nudo debe ser cero”.

Si se considera el elemento que hay que proteger como un nudo y se instalan transformadores de intensidad en cada una de sus entradas-salidas, la protección puede ser un simple relé de sobreintensidad que ordene disparo en el momento que esta suma no sea cero, lo que equivale a una falta interna.

En condiciones normales, es decir, sin anomalía en la zona a proteger, la corriente “pasa” a través del elemento protegido. Lo mismo ocurre en el circuito secundario de los transformadores. El equilibrio entre ambas corrientes secundarias no produce ninguna corriente en el circuito “diferencial” donde está instalado el relé de intensidad.

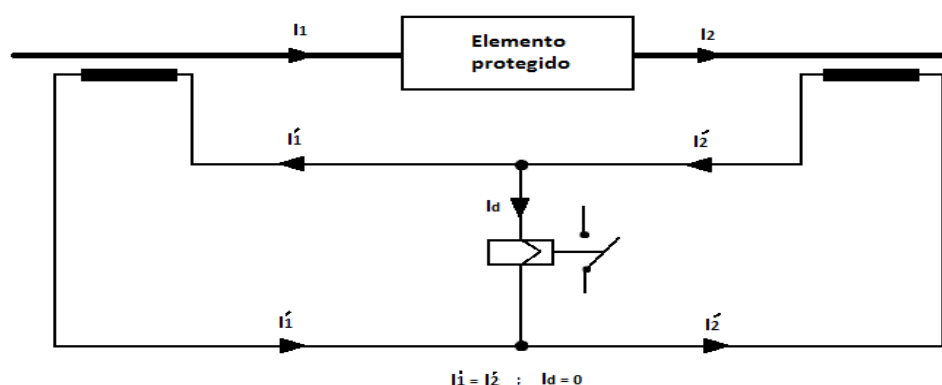


Fig. 2-2 Esquema básico de una protección diferencial.

Naturalmente, esto es sólo teoría. Los transformadores de intensidad tienen errores de transformación, en módulo y argumento, no siempre despreciables.

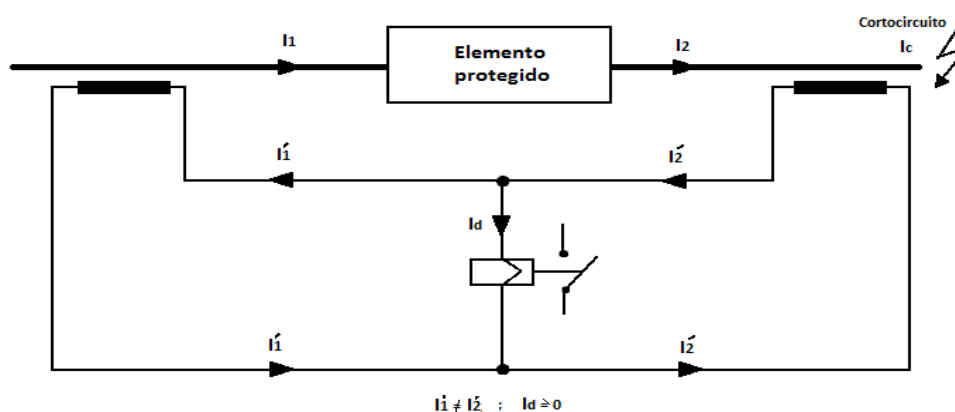


Fig. 2-3 Esquema básico de una falta externa.

Por ejemplo, en el caso de falta externa, las corrientes de cortocircuito pueden ser muy superiores a las normales. Por consiguiente, también los errores se multiplican. Esto lleva a la conclusión de que el relé diferencial debe tener un ajuste mínimo que garantice la estabilidad de la protección en ocasión de cortocircuitos externos. En el supuesto que el relé diferencial se ajustara para evitar disparos incorrectos, de forma que no actúe con corrientes diferenciales inferiores a 1 A, y los transformadores de intensidad fuesen, por ejemplo, de relación 800/5, esto supondría que, en caso de falta interna, el relé no operaría para desequilibrios inferiores a 160 A.

Existe otro fenómeno que también puede influir sobre este tipo de protecciones, como la saturación de los transformadores de intensidad. Esta saturación puede producirse bien por la propia magnitud de la corriente de cortocircuito o por la posible componente asimétrica en la forma de onda. La desigual respuesta de los transformadores produce falsas corrientes diferenciales. Para ese problema existen varias soluciones. La primera de ellas consiste en temporizar el disparo del relé diferencial el tiempo suficiente (del orden de 0,5 a 0,8 segundos). Esta solución es inaceptable cuando la protección se aplica a equipos de gran responsabilidad y costo, ya que mantener 0,5 segundos un posible cortocircuito interno puede dar lugar a grandes desperfectos.

Una segunda solución disponer de un relé diferencial ultrarrápido, capaz de decidir si se debe o no actuar dentro de los 5 ms siguientes al cortocircuito, cuando aún no se ha producido la saturación en los transformadores de intensidad.

En el caso de falta interna, el circuito diferencial está siempre recorrido por la corriente de falta ($I_d = I_F$), tanto en el caso de que el cortocircuito esté alimentado por un solo lado del elemento protegido como si lo está por los dos. Por otro lado, la suma aritmética de las intensidades en los circuitos secundarios $I_A = I_1 + I_2$, resulta ser, asimismo, igual a la corriente de falta, si se suponen en fase las dos corrientes de confluyen al cortocircuito.

En cambio, para una falta externa, la corriente diferencial I_d tiende a ser nula, a excepción del efecto producido por los errores de transformación, mientras que I_A es del orden de dos veces la intensidad que el elemento protegido aporta al cortocircuito externo.

Para aumentar la seguridad del relé, algunos modelos incorporan lo que se denomina “función de frenado por corriente circulante”, que bloquean el disparo de la protección en caso de que la intensidad diferencial no supere un porcentaje preestablecido de la intensidad antagonista o de frenado.

Con esta función de frenado, se consigue insensibilizar el relé para los desequilibrios que pueden darse en caso de faltas externas; en cambio, el relé puede seguir actuando correctamente para faltas internas. Las pendientes más usuales están en el margen comprendido entre el 20 y el 60 %.

En los relés que incorporan la función de frenado, se dice, por ejemplo, que “el relé tiene una pendiente del 50 %”. Esto quiere decir que para que el relé opere es necesario que la corriente diferencial sea, al menos, la mitad que la antagonista.

A continuación se detallan diferentes situaciones de falta con el esquema completo de un relé diferencial.

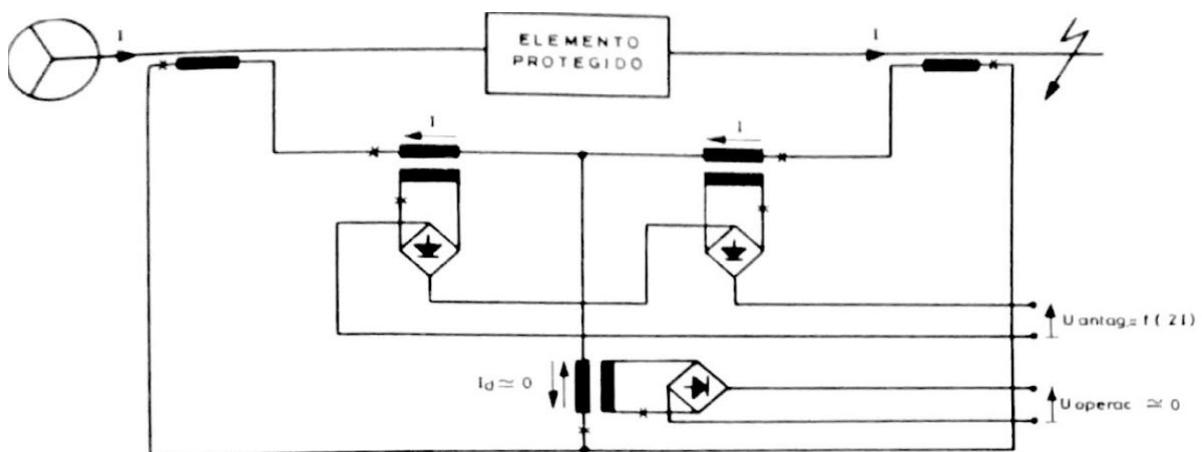


Fig. 2-4 Falta externa.

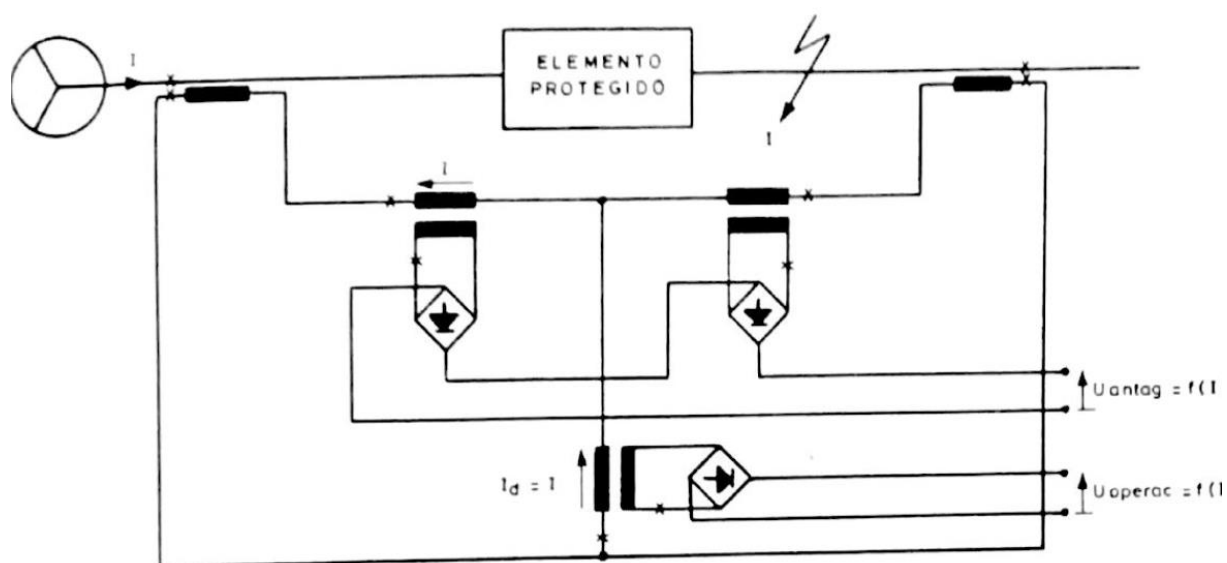


Fig. 2-5 Falta interna - alimentación por un extremo.

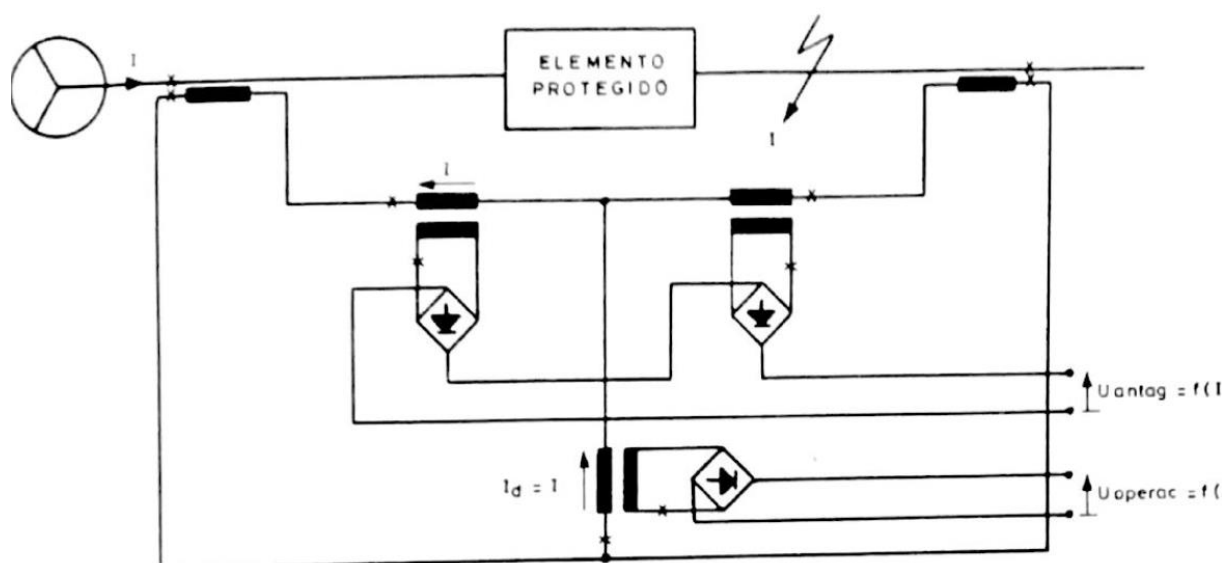


Fig. 2-6 Falta interna - alimentación por ambos extremos.

La siguiente figura muestra la característica de operación de un relé diferencial, con una pendiente del 50 % y una corriente mínima de operación de 1 A.

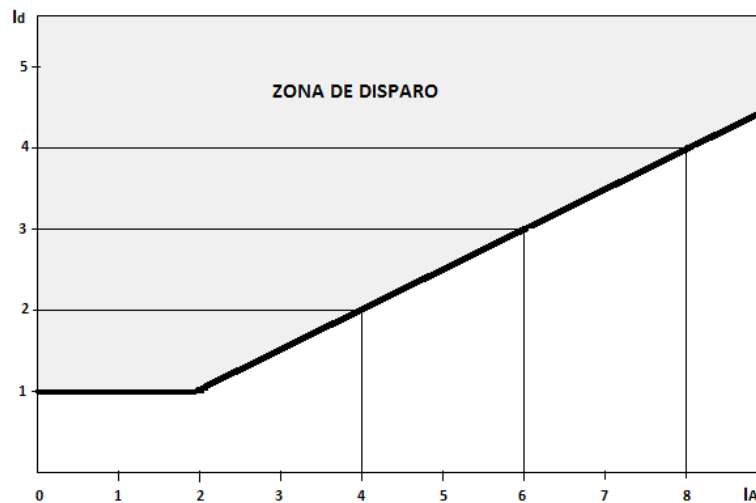


Fig. 2-7 Función de frenado de un relé diferencial.

En las conexiones en vacío de transformadores es usual obtener una elevada corriente de magnetización en el devanado que ha sido conectado. Como quiera que el otro devanado no lleva corriente, la corriente de magnetización aparecerá en el circuito diferencial de la protección.

El valor de esta corriente para transformadores de potencia superiores a 10 MVA y núcleos de grano orientado puede ser, en los instantes iniciales, de hasta:

- 5 a 10 I_n al conectar el lado A.T.
- 10 a 20 I_n al conectar el lado B.T.

La magnitud y duración de esta corriente depende, entre otras cosas, de:

- El diseño del transformador.
- Grupo de conexión.
- Sistema de puesta a tierra.
- Si hay otros transformadores en paralelo.
- En general, la duración puede ser de algunos segundos.

Las modernas protecciones diferenciales cuentan con un elemento para el frenado por corrientes magnetizantes. Este elemento se basa en el hecho que en la corrientes de este tipo hay una componente de segundo armónico muy superior a la que aparece en las corrientes de cortocircuito.

Algunos transformadores pueden verse sometidos, ocasionalmente, a sobretensiones de corta duración. Los transformadores con núcleo de grado orientado tienen una densidad de flujo magnético elevada. Por este motivo, la corriente de excitación con sobretensiones del 20 al 30 % puede llegar a valores de 10 a 100 veces su valor nominal. Esta corriente podría provocar la actuación de la protección.

Las protecciones diferenciales modernas cuentan con el hecho de que las corrientes de excitación, con altas densidades de flujo, contienen una componente del quinto armónico relativamente grande. Lo usual es montar en el circuito diferencial dos circuitos LC resonantes para las frecuencias de 100 y 250 Hz, respectivamente. La tensión obtenida se resta de la tensión diferencial. El resultado es el que se compara con la tensión producida por la corriente circulante.

La relación de espiras entre T1 y T2 determina la pendiente del relé.

Evidentemente, al asegurar cada vez más la correcta operación de una protección diferencial de un transformador, también se disminuye la sensibilidad del relé. En las faltas a tierra generalmente resulta inferior la corriente de cortocircuito, en especial cuando existe una impedancia limitadora entre el neutro y tierra. El valor de esta impedancia sumado a la resistencia del arco puede hacer que la corriente del cortocircuito provoque un desequilibrio que la protección diferencial sea incapaz de detectar.

No se debe olvidar que, en el caso de un transformador, el relé diferencial, tiene a uno y otro lado distintas relaciones de transformación. Así, un relé ajustado a un 1 A, con transformadores de intensidad de relaciones 1000/5 y 4000/5, operará para desequilibrios de 200 A en el arrollamiento de A.T. y 800 A en el de baja tensión. Si

este arrollamiento está puesto a tierra a través de una impedancia limitadora, es posible que una falta a tierra no supere los 800 A de desequilibrio.

2.4.3 Protección diferencial utilizando relés de sobreintensidad temporizados

Los relés de sobreintensidad sin frenado se utilizan raramente debido a su susceptibilidad a falsas operaciones por las siguientes causas:

- Errores de saturación y de desigualdad en los transformadores de intensidad.
- Corrientes de conexión fluyendo desde la alimentación al conectar el transformador.

Para compensar los errores de saturación y de desigualdad, los relés de sobreintensidad deberían ajustarse para operar por encima de los valores esperados de la corriente de conexión. También es necesario un tiempo de retardo para invalidar la corriente de conexión. Debido a la saturación del transformador de potencia se debe evitar el uso de este relé donde haya exposición a corrientes geomagnéticamente inducidas.

2.4.4 Protección diferencial utilizando relés diferenciales de porcentaje

Para solventar los problemas de la aplicación de relés de sobreintensidad a la protección diferencial, los fabricantes desarrollaron los relés diferenciales de porcentaje. Estos relés ofrecen una protección diferencial sensible a bajas corrientes y toleran mayores desigualdades a grandes corrientes, manteniendo el disparo para faltas internas.

La base de funcionamiento del relé diferencial de porcentaje es que la corriente diferencial (medida en los finales de las zonas protegidas) sea mayor que un porcentaje predeterminado de la corriente de frenado.

Se utilizan diferentes alternativas para obtener la corriente de frenado I_R . Se utilizan varias combinaciones de las corrientes en los dos terminales del transformador:

$$I_R = K * |I_1 + I_2| \quad (2.1)$$

$$I_R = K * (|I_1| + |I_2|) \quad (2.2)$$

$$I_R = \max(|I_1|, |I_2|) \quad (2.3)$$

En estas ecuaciones, “K” es una constante que usualmente tiene un valor de 1 ó 0,5. Las dos últimas ecuaciones ofrecen la ventaja de poder ser aplicables a diferentes relés con más de dos frenados.

El porcentaje puede ser fijo o variable según el diseño del relé. También hay un umbral mínimo de corriente diferencial antes del disparo, independientemente de la corriente de frenado. Los detalles sobre el disparo mínimo, la corriente de frenado y la pendiente de característica varían según el fabricante. La pendiente no tiene por qué ser una recta, sino una curva creciente dependiendo del diseño del sistema de frenado por porcentaje. Esta curva permite incluso grandes porcentajes de desigualdad durante corrientes de falta externa elevadas. Estas opciones se muestran en la figura 2-8.

Los transformadores de potencia de alta tensión presentan muchas posibilidades de corrientes desiguales vistas por el relé diferencial. Estas desigualdades, causadas por diferentes fenómenos, pueden sumarse o desplazar unas de las otras, haciendo difícil de percibir el valor resultante. Por tanto, el relé diferencial de porcentaje debe ser tolerante al peor caso posible de los errores de desigualdad.

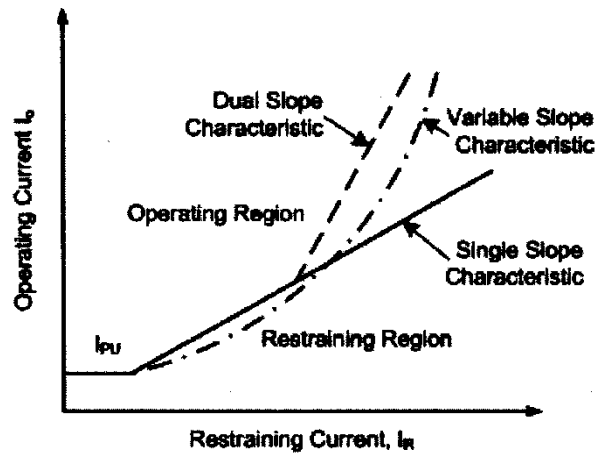


Fig. 2-8 Opciones típicas para las características de relés diferenciales de porcentaje.

Primero, la relación de transformación hace que las corrientes primarias y secundarias sean diferentes. Dependiendo de la relación de transformación, en ocasiones esta diferencia es exactamente compensada utilizando la misma relación con los transformadores de intensidad.

Para transformadores con conexión estrella-triángulo, el desfase de 30° se compensa con una apropiada conexión de los arrollamientos del secundario de los transformadores de intensidad cuando se utilicen relés electromecánicos, aunque la diferencia en la relación de intensidades se vea afectada por el multiplicador de corrientes que salen del secundario del transformador de intensidad.

Segundo, una contribución muy importante a la desigualdad de corrientes es la aplicación de cambiadores de tomas para la regulación de tensión. Un caso típico con una regulación de 10% en la tensión, crea una variación de la corriente del 10%. El relé diferencial no debe operar para estas desigualdades. En relés electromecánicos, se obtenía incrementando la pendiente de porcentaje, y esta aproximación también se utiliza para algunos relés numéricos. No obstante los relés con microprocesadores monitorizan la posición de los cambiadores y las desigualdades son tenidas en cuenta en el software.

Tercero, la diferencia en el funcionamiento de los transformadores de intensidad aplicados a diferentes terminales del transformador son causa de desigualdad en las corrientes. Para corrientes bajas, como la de carga, los errores son muy pequeños e insignificantes. Para faltas importantes fuera de la zona protegida la saturación de los transformadores de intensidad es altamente posible. La diferencia en el funcionamiento en la intensidad en diferentes terminales del transformador aparece como una corriente diferencial en el relé. Algunos relés numéricos monitorizan la saturación de los transformadores de intensidad y toman medidas para permanecer a salvo de falsas corrientes diferenciales causadas por la saturación de los transformadores de intensidad.

Cuarto, las corrientes de conexión de un transformador desenergizado también son causa de desigualdad en las corrientes. Las corrientes de magnetización pueden ser varias veces superiores a la corriente nominal del transformador.

Quinto, la sobreexcitación debida a un exceso de tensión en los terminales del transformador es causa de desigualdad de las corrientes. Cuando la tensión excede el valor nominal, el flujo también excede el valor nominal. Normalmente se tolera un 10% desde que el transformador está funcionando en la zona lineal de la característica de magnetización del núcleo.

2.4.5 Frenado por armónicos

El frenado por armónicos se utiliza para evitar disparos intempestivos de los relés diferenciales de porcentaje debido al flujo de las corrientes de conexión cuando el transformador es conectado. Se utilizan diferentes métodos para el frenado por armónicos.

El principio general de operación cuando se utiliza frenado por armónicos se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$|I_0| > s|I_R| + K_2|I_2| + K_3|I_3| + \dots \quad (2.4)$$

Donde:

- I_0 es la componente fundamental de la corriente de operación.
- $I_2, I_3, \dots$ segunda, tercera y siguientes componentes armónicas de la corriente de operación.
- I_R es la corriente de frenado sin filtrar.
- $K_2, K_3, \dots$ son constantes de proporcionalidad.
- S es la pendiente de la característica del relé diferencial de porcentaje.

El frenado por armónicos es elevado cuando se utiliza esta aproximación, y proporciona seguridad ante las corrientes de conexión a expensas de la velocidad de operación para faltas internas con saturación de los transformadores de intensidad. En algunos relés sólo se utilizan para el frenado las componentes armónicas de la corriente de operación. En otros, el efecto de la corriente de frenado puede hacerse despreciable. La operación del relé diferencial se puede expresar según la ecuación:

$$|I_0| > K_1|I_1| + K_2|I_2| + \dots \quad (2.5)$$

2.4.5.1 Frenado por segundo y quinto armónico

El relé diferencial trifásico con frenado por segundo y quinto armónico fue presentado por Einvall y Linders en el año 1975. Este relé utiliza la componente del segundo armónico de la corriente de operación para identificar corrientes de conexión, y fue originalmente propuesto por Sharp y Glassburn en el año 1958. La figura 2-9 muestra el aspecto de este relé.

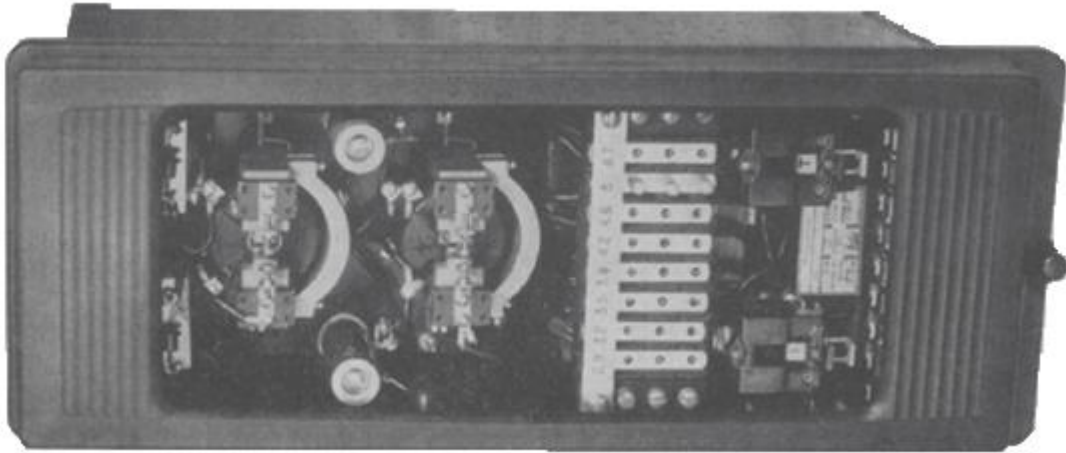


Fig. 2-9 Relé diferencial trifásico con frenado por segundo armónico de Sharp y Glassburn, 1958.

También utiliza la componente del quinto armónico de la corriente de operación para evitar operaciones incorrectas durante una sobreexcitación del transformador. El relé incluye un detector de máxima corriente que produce la corriente diferencial de frenado por porcentaje, por tanto la cantidad de frenado es la mostrada en la ecuación (2.3). El relé forma un frenado adicional sumando las componentes del segundo y quinto armónico de la corriente de operación, la ecuación básica para la operación de una fase del relé es la mostrada en la siguiente ecuación.

$$|I_0| > s|I_R| + K_2|I_2| + K_5|I_5| \quad (2.6)$$

En algunos relés el frenado por armónicos es proporcional a la suma de las componentes del segundo y quinto armónico de los elementos trifásicos del relé. Por tanto, su operación queda expresada por la ecuación:

$$|I_0| > s|I_R| + \sum_{n=1}^3 (k_2|I_{2n}| + k_5|I_{5n}|) \quad (2.7)$$

La figura 2-10 muestra la lógica del elemento de un relé diferencial con frenado por segundo y quinto armónico, de acuerdo con la ecuación (2.2).

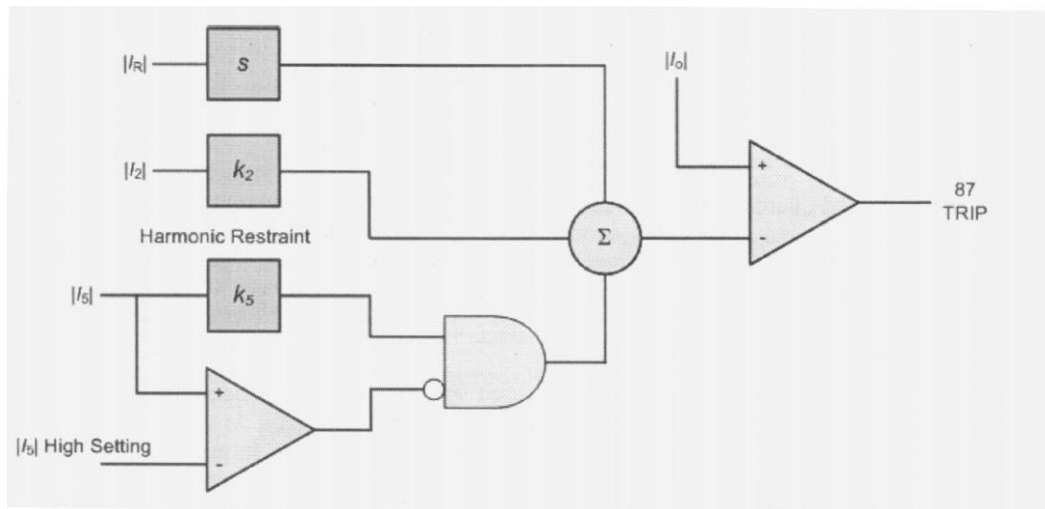


Fig. 2-10 Lógica de un elemento diferencial para frenado por 2º y 5º armónico.

Nótese que en este elemento de frenado por armónicos, la corriente de operación debería sobrepasar a los efectos combinados de la corriente de frenado y al segundo y quinto armónico de la corriente de operación. Como ya se ha indicado, la corriente de quinto armónico aparece en el transformador cuando es sobreexcitado debido a un exceso de tensión aplicada en él. Un exceso en la corriente de quinto armónico puede dañar el transformador, razón por la cual muchos relés incluyen un ajuste de alta corriente para el quinto armónico. El frenado para quinto armónico es suprimido si I_5 supera el ajuste.

El frenado común por armónicos o bloqueo incrementa la seguridad del relé diferencial, pero es preferible retardar la operación del relé para faltas internas combinado con corrientes de conexión en las fases sanas.

2.4.5.2 Frenado de armónicos pares

El uso de los armónicos pares (segundo y cuarto) en un sistema con frenado es otro método que da seguridad durante las corrientes de conexión que pudieran tener una muy baja corriente de segundo armónico. La ecuación que representa esta función diferencial es la siguiente:

$$|I_0| > s|I_R| + K_2|I_2| + K_4|I_4| \quad (2.8)$$

En contraste con los armónicos impares, que son generados por la saturación del transformador de intensidad por un exceso de corriente alterna, los armónicos pares son un mejor indicador de la corriente de conexión. Los armónicos pares provienen de la saturación por corriente continua del transformador de intensidad y son transitorios por naturaleza. El uso de los armónicos pares (y no sólo el segundo armónico) proporciona una mejor discriminación entre corrientes de conexión corrientes de falta interna.

2.4.6 Bloqueo por armónicos

El bloqueo por armónicos consiste en un bloqueo total de la protección diferencial, el bloqueo es instantáneo (o bloquea la protección o no).

El bloqueo por armónicos también puede utilizarse para evitar disparos intempestivos por los relés diferenciales de porcentaje debido al flujo de las corrientes de conexión cuando se conecta el transformador.

2.4.6.1 Bloqueo por segundo armónico

En el diseño de Sharp y Glassburn el relé consistía en una unidad diferencial y una unidad de armónico. La corriente de operación definida por la ecuación:

$$I_0 = I_1 - I_2 \quad (2.9)$$

Esta ecuación es la que se usa en la unidad diferencial. La corriente es rectificada y aplicada a la bobina de operación de una unidad de relé polarizado. La corriente aplicada a la unidad de frenado tiene la forma de la ecuación (2.10).

La unidad de relé polarizado realiza una comparación de las amplitudes de la corriente operación y la corriente de frenado e implementada la característica diferencial de porcentaje utilizada en la ecuación siguiente:

$$|I_0| > m - |I_r| \quad (2.10)$$

La unidad de armónico compara una señal de operación formada por la componente fundamental más los armónicos de orden tres y superiores de la corriente de operación, con una señal de frenado que es proporcional al segundo armónico de la corriente operación. La operación de unidad de bloqueo por armónicos puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$|I_0| + K_3|I_3| + K_4|I_4| + \dots > K_2|I_2| \quad (2.11)$$

2.4.6.2 Bloqueo por segundo y quinto armónico

Usualmente, los relés diferenciales numéricos utilizan una lógica de bloqueo por segundo y quinto armónicos. El relé diferencial genera un disparo si la condición definida por la ecuación (2.10) es satisfecha así como las condiciones definidas en las ecuaciones siguientes:

$$|I_0| > k_2|I_2| \quad (2.12)$$

$$|I_0| > k_5|I_5| \quad (2.13)$$

Es importante apreciar que, en este caso, la corriente operación es comparada independientemente con la corriente de frenado y con las componentes del segundo y quinto armónico de la corriente operación.

Es práctica común utilizar el quinto armónico de la corriente operación para evitar la operación del relé diferencial cuando el transformador protegido experimenta sobreexcitación. Una solución puede ser utilizar un sistema de bloqueo de armónicos en el cual el quinto armónico es independientemente comparado con la corriente operación. En este esquema, dado un ajuste del relé, en términos del porcentaje del quinto armónico, siempre representa la misma condición de sobreexcitación. En un sistema de frenado por quinto armónico, un ajuste dado puede representar diferentes condiciones de sobreexcitación dependiendo de otros armónicos que puedan estar presentes.

2.4.6.3 Compartición de armónicos

La compartición de armónicos es una modificación de la técnica de bloqueo por armónicos. En esa técnica el contenido armónico de las tres fases es sumada antes de comprobar si la relación de la componente fundamental y las componentes armónicas de la corriente operación supera un umbral preestablecido. Esta aproximación añade seguridad en aplicaciones en las cuales el control de armónicos de una o dos fases no es suficiente para bloquear la operación del relé.

2.4.7 Métodos de reconocimiento de la forma de onda

Las técnicas de reconocimiento de la forma de onda representan otra alternativa para discriminar faltas internas de condiciones de conexión del transformador. No obstante, estas técnicas fallan al identificar la sobreexcitación del transformador como la presencia del quinto armónico realiza con efectividad. La identificación de la separación de los picos de la corriente diferencial representa un grupo importante de los métodos de reconocimiento de la forma de onda. En [8] el autor propone bloquear la operación del relé si los sucesivos picos de la corriente diferencial no ocurren en aproximadamente entre 7,5 y 10 ms para un sistema de 60 Hz.

2.4.8 Método de detección de baja corriente

En [9] se utiliza un principio muy conocido que reconoce la longitud de los intervalos de tiempo durante los cuales la corriente diferencial es casi nula. La figura 2-11 muestra el concepto básico de este sistema de detección.

La corriente diferencial es comparada con los umbrales positivo y negativo de magnitudes iguales. Esta comparación ayuda a determinar los intervalos durante los cuales el valor de la corriente es menor que el valor del umbral. Los intervalos de tiempo se comparan entonces electrónicamente con el valor umbral de un cuarto de ciclo. Para las corrientes de conexión mostradas en la parte (a) de la figura 2-11, los intervalos de baja corriente, t_A , son mayores que un cuarto de ciclo y el relé es

bloqueado. En faltas internas mostradas en la parte (b) de la figura 2-11, los intervalos de baja corriente, t_b , son menores que un cuarto de ciclo, y el relé opera.

Es posible que los intervalos de baja corriente de la corriente de conexión no sean mayores que un cuarto de ciclo que en algún caso específico. Si esto sucede, en la técnica de detección de corriente falla son necesarias medidas de corrección para identificar la situación como de conexión.

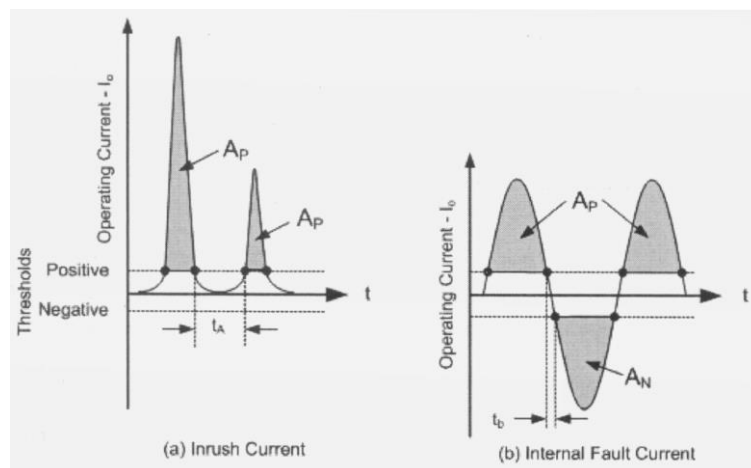


Fig. 2-11 Bloqueo de relé diferencial mediante el reconocimiento de la duración de los intervalos de baja corriente.

2.4.9 Método de bloqueo por corriente continua

Este método de reconocimiento de la forma de onda depende de la información de la señal de corriente continua además del contenido eran únicos de la corriente diferencial. La componente de corriente continua de la corriente de conexión usualmente tiene una constante de tiempo mayor que para el caso de faltas internas. La presencia de un desplazamiento de corriente continua en la corriente de conexión es un indicador adicional que se puede utilizar para garantizar la seguridad del relé durante la conexión del transformador. Este método de reconocimiento de la forma de onda es relativamente sencillo de aplicar en los relés digitales, ya que la componente de corriente continua es un proceso de filtrado pasa-bajo.

El método de bloqueo por corriente continua lo realiza el relé dividiendo la corriente diferencial en sus semiciclos positivos y negativos y calcula las sumas de un ciclo para ambos semiciclos. La suma de los semiciclos positivos es proporcional al área A_P mostrada en la figura 2-12, y la suma de los semiciclos negativos es proporcional al área A_N . Las sumas de ciclo positiva S_P y negativa S_N de la corriente diferencial son obtenidas así. Por tanto, el mínimo y el máximo de los valores absolutos de las dos sumas de un ciclo son determinados, y la relación de corriente continua D_R se calcula dividiendo la suma del ciclo menor entre la suma del ciclo mayor. Cuando D_R es menor que un valor umbral el relé envía una señal de bloqueo. La figura 2-12 muestra el diagrama lógico del método de bloqueo por corriente continua para un relé elemental.

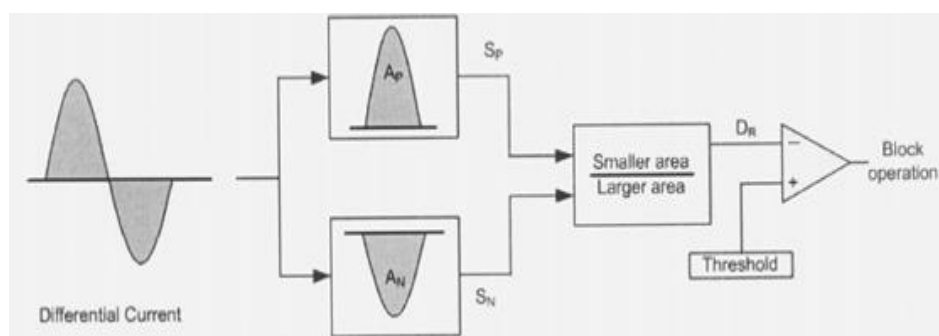


Fig. 2-12 Diagrama lógico del bloqueo por corriente continua.

2.4.10 Relé de bloqueo lógico

La seguridad de los relés frenados por armónicos se puede mejorar utilizando una señal de bloqueo cruzado temporal que consiste en frenar toda la unidad cuando la corriente de una fase tiene suficiente con su armónico en vez de requerir un contenido de armónicos suficiente en las tres fases. Esto es deseable, aunque el problema es que tienen control único suficiente en algunas fases durante la conexión. No obstante, el bloqueo común tiene la desventaja de la posibilidad de retardar un disparo al conectar un transformador en falta si las fases sanas detectan conexión. El efecto del bloqueo cruzado puede limitarse a la conexión utilizando una limitación temporal ya que el bloqueo por armónicos puede también causar retardos al disparo en faltas internas por saturación de los transformadores de intensidad.

Los relés diferenciales trifásicos que utilizan frenado por armónicos independiente para cada fase realizan una acción de protección cuando cualquiera de los tres elementos de fase opera. Los relés diferenciales trifásicos que utilizan bloqueo por armónicos usan dos aproximaciones diferentes. Una aproximación consiste en utilizar el frenado por armónicos en cada elemento de fase del relé; en este diseño el relé realiza una acción de protección cuando cualquiera de los elementos de fase opera. La segunda aproximación consiste en bloquear la operación del relé trifásico si el elemento de bloqueo opera para alguno de los elementos de fase.

Los relés diferenciales numéricos modernos dan la opción al usuario de configurar el relé de forma que pueda elegir entre varias opciones de bloqueo, como el frenado por armónicos pares, bloqueo por quinto armónico, bloqueo por corriente continua o cualquier combinación de los bloqueos descritos, como se puede observar en la lógica utilizada para seleccionar estas opciones en uno de los relés se muestra en la figura 2-13. En este caso, los elementos diferenciales operan en modo de bloqueo sólo. La habilitación o deshabilitación de cada función de bloqueo se obtiene con los interruptores S_2 a S_5 .

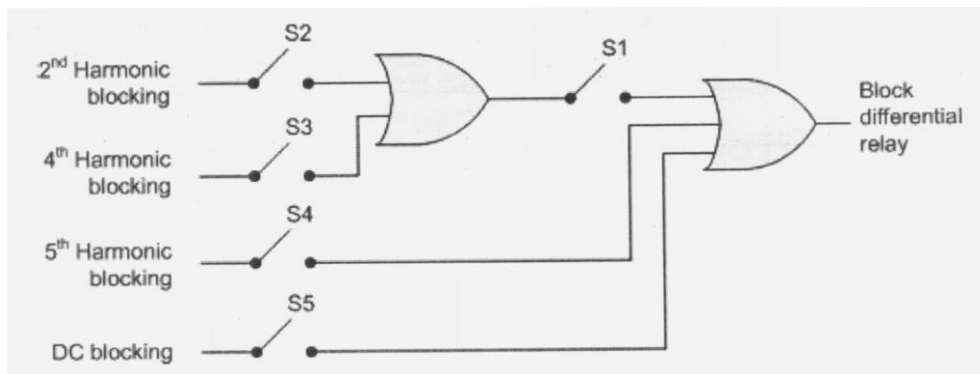


Fig. 2-13 Esquema de bloqueo lógico para relé diferencial numérico.

El propósito de este diseño es proporcionar un relé que frene adecuadamente sin importar la cantidad de corriente de conexión pero que permita una relativamente alta velocidad de operación si ocurre una falta interna con o sin corriente de conexión simultánea.

Para proporcionar protección durante la saturación del transformador de intensidad, los relés diferenciales modernos con frenado por armónicos también incorporan relés de sobreintensidad instantáneos sin frenado que son ajustados por encima del máximo de la corriente de conexión esperada pero por debajo de la corriente que puede resultar en la saturación por corriente alterna del transformador de intensidad. El ajuste habitual es de ocho a 10 veces el valor nominal.

Al utilizar relés frenados por armónicos se debe tener en cuenta el funcionamiento durante la sobreexcitación del transformador. El funcionamiento del relé diferencial sobre una corriente de excitación debida a la sobreexcitación depende de la magnitud de la corriente, el contenido de armónicos en la corriente (fundamentalmente armónicos impares), la forma de la onda y la característica de frenado del relé. Un relé que frena para armónicos impares (en adición al segundo armónico presente durante la corriente de conexión) es poco probable que opere bajo tales condiciones. Por otro lado los transformadores conectados a rectificadores de sistemas de control de velocidad, cuyas corrientes contienen altos niveles de

armónicos impares, se protegerían mejor por el relés frenados por armónicos utilizando sólo el segundo armónico.

Los relés diferenciales frenados por armónicos a menudo se justifican en base a los siguientes puntos:

- Menos disparos falsos debidos a la corriente de conexión.
- Tiempo de operación más rápido.
- Menor subida.

Se han observado disparos intempestivos de relés diferenciales frenados por armónicos cuando se energizan transformadores directamente conectados a líneas de transporte. Un análisis de las formas de onda de las corrientes de conexión en esta configuración ha demostrado una reducción en el contenido de armónicos comparado con transformadores aislados de la línea.

2.5 Protección diferencial digital

Según [8] desde los años 70 se están proponiendo relés digitales que utilizan microcomputadores.

Las principales características que han animado a muchos investigadores a trabajar en la posibilidad del diseño de relés digitales para la protección de sistemas de potencia son su economía, fiabilidad, flexibilidad y funcionamiento mejorado comparado con los relés convencionales y la posibilidad de integrar un relé digital en la jerarquía de un sistema por ordenador dentro de la subestación. La introducción de los microprocesadores ha creado nuevas posibilidades económicas para el desarrollo de sistemas de protección para sistemas de potencia y aparatos de potencia. La capacidad de los microprocesadores actuales es tal que un sistema con microprocesador puede realizar todas las funciones digitales que antes realizaba un ordenador.

Como resultado de esto muchos investigadores publican los resultados de su trabajo con relación a técnicas de software para relés basados en microprocesador.

Se han publicado muchos trabajos sobre protección digital de transformadores de potencia presentando nuevos algoritmos para la protección diferencial; el problema más importante en una protección diferencial es la discriminación entre una corriente de conexión y una falta interna del transformador. Para ello se han propuesto numerosas formas y métodos para discriminar entre ambas corrientes, de las cuales vamos a hablar en los siguientes apartados.

2.5.1 Métodos de discriminación

En este apartado se explican los diferentes algoritmos propuestos para la discriminación de las corrientes de conexión frente a las corrientes de falta interna, para el caso de protección diferencial digital de transformadores de potencia.

2.5.1.1 Métodos por segundo armónico

Sykes y Morrison [9] propusieron en 1972 el uso de filtros de paso de banda recurrente para calcular el contenido de la componente fundamental y del segundo armónico. Una vez obtenida la componente fundamental y el segundo armónico, rectificaban estas señales y para poder compararlas han implantado un filtro de pasa baja para 10 Hz, el cual se basa en la ecuación:

$$H(f) = \frac{\sum_{K=0}^K h_K * e^{-j2\pi f k \Delta t}}{1 - \sum_{P=1}^P g_P * e^{-j2\pi f p \Delta t}} \quad (2.14)$$

donde:

- K es número de ceros.
- P es número de polos.

Por lo que obtenemos la siguiente gráfica:

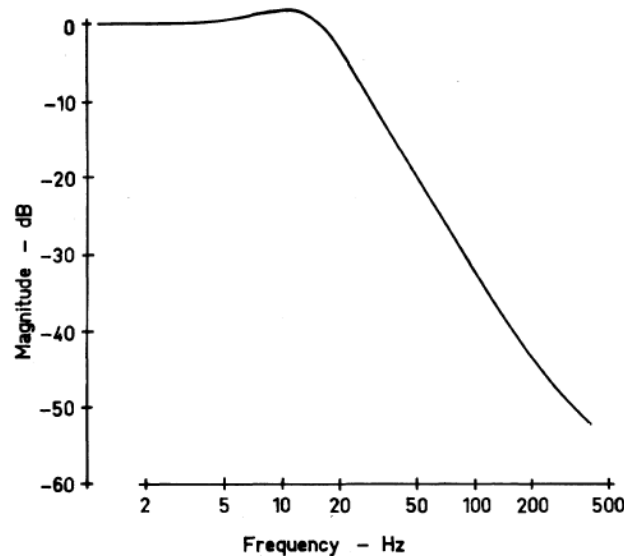


Fig. 2-14 Respuesta de frecuencia del filtro de paso bajo digital de 10 Hz.

De los datos obtenidos de esta gráfica ya pueden establecer un criterio de bloqueo de la protección diferencial, en el caso que tengamos una corriente de conexión “inrush”.

En la figura 2-15 podemos observar el esquema de la protección mencionada y en las figuras 2-16 y 2-17 se observa el comportamiento de la componente fundamental y de segundo armónico en una corriente de conexión o una falta interna.

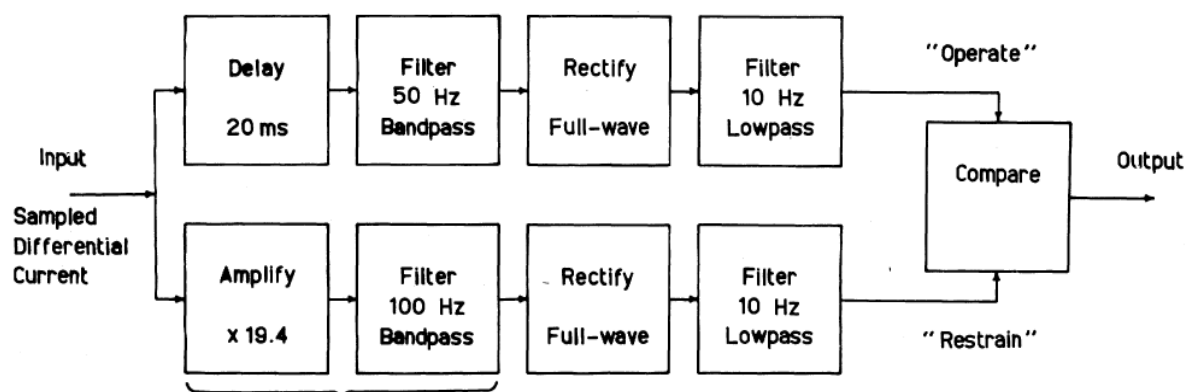


Fig. 2-15 Diagrama de bloques del método Sykes y Morrison.

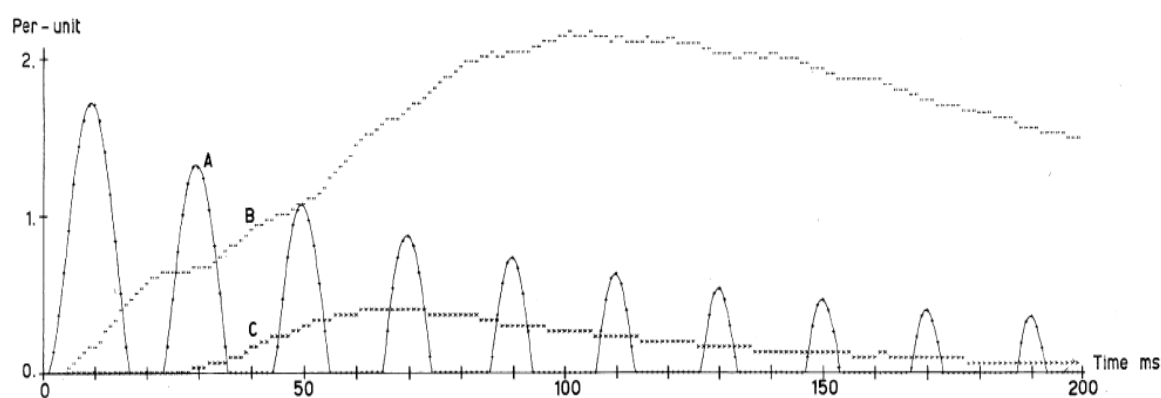


Fig. 2-16 Respuesta para una corriente de conexión.

donde:

- A – Corriente de conexión.
- B – Salida del filtro de 100 Hz.
- C – Salida del filtro de 50 Hz.

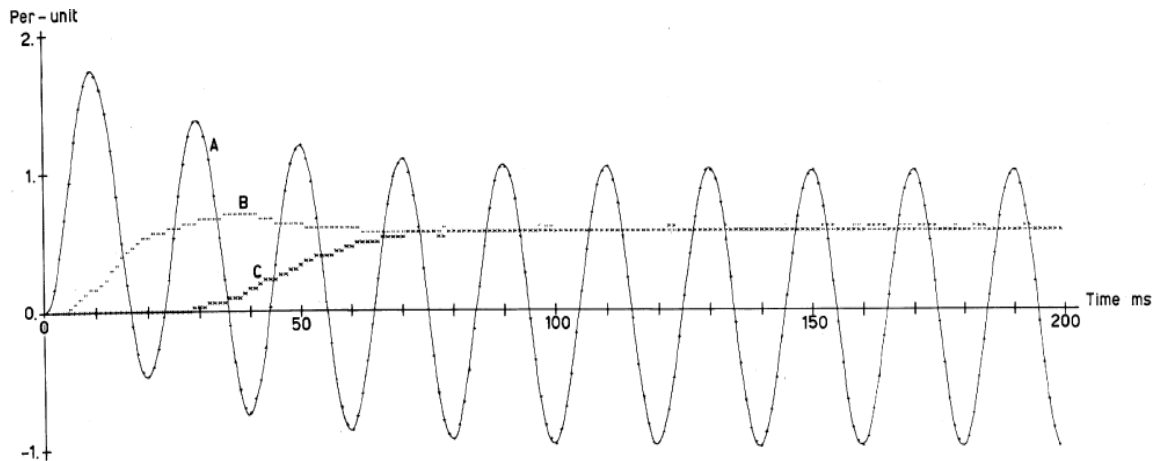


Fig. 2-17 Respuesta para una falta interna.

Los autores concluyeron que quedará demostrado que las técnicas de protección diferencial frenada por armónicos podría ser adaptada para la protección de transformadores mediante sistemas digitales.

Larson, Flechsig y Schweitzer [11] proponen en 1979 filtros de respuesta al impulso finita (FIR) para calcular la magnitud de las componentes fundamentales y de segundo armónico. Esto junto con un algoritmo de sobreintensidad diferencial se implementa en un sistema con microprocesador. Con este algoritmo consigue evitar la multiplicación y la división lo que permite el uso de un hardware de muy bajo coste.

Este sistema transformaba los datos analógicos del transformador en datos de entrada digitales discretos para los algoritmos del microprocesador. Los algoritmos, operando en tiempo real, suministraron salidas correctas, indicando la presencia de corriente de conexión, corriente de falta o baja corriente diferencial. En la siguiente figura se puede observar un diagrama de flujo del algoritmo:

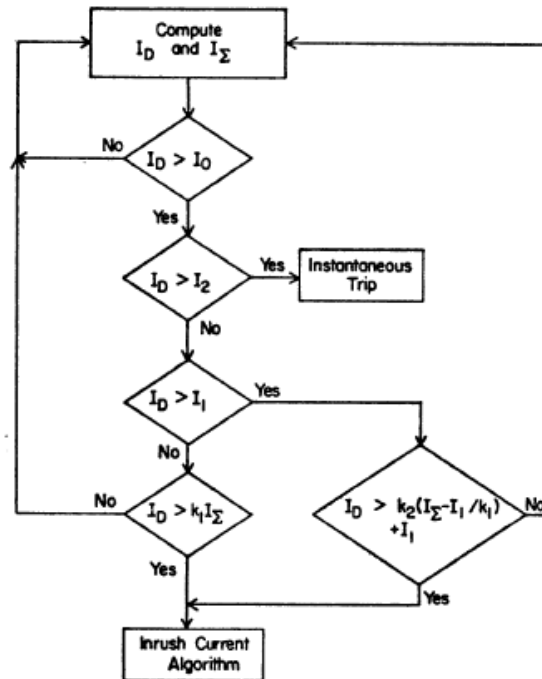


Fig. 2-18 Diagrama de flujo del algoritmo de sobreintensidad diferencial de Larson, Flechsig y Schweitzer.

En 1981 Degens [12] y posteriormente Rahman, Dash y Downton en 1982 [13], presentaron un algoritmo para la detección de la corriente de conexión. El algoritmo se basaba en el ajuste de la curva por mínimos cuadrados de muestras de la corriente diferencial por medio del amortiguamiento de la corriente continua y cinco componentes armónicas. La corriente de conexión se detecta a través de la relación entre la componente fundamental y el segundo armónico de la corriente diferencial. La frecuencia de muestreo y la ventana de datos se eligen de acuerdo a una relación cerrada entre la amplificación del ruido y las características de frecuencia de los filtros digitales utilizados. A pesar del detallado ajuste de la curva la carga de los cálculos se mantiene en un mínimo mediante una adecuada elección del tiempo de referencia.

En la figura 2-19 se ve el diagrama de flujo de la protección propuesta en [12].

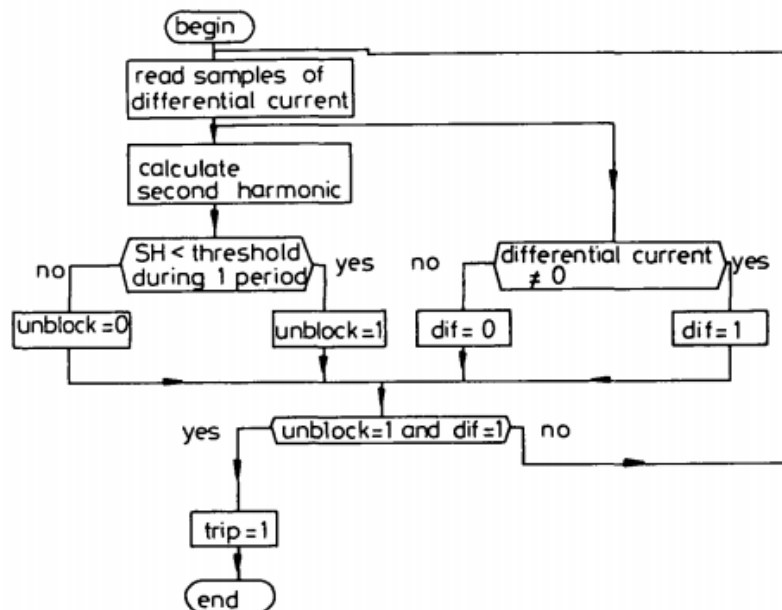


Fig. 2-19 Diagrama de flujo del sistema de protección propuesto.

2.5.1.2 Método con funciones de Walsh

Rahman, Jeyasurya, B. y Gangopadhyay, A., propusieron [16] el uso de las funciones de Walsh para la protección digital de transformadores en 1985.

Las funciones de Walsh forman un conjunto completo de funciones ortonormales. Estas funciones, notadas como $wal(k, t)$, son semejantes a las funciones seno-coseno de la transformación de Fourier, apareciendo como versiones al cuadrado de ellas. Sólo toman el valor ± 1 y cambian de signo sólo cuando t es múltiplo de una potencia de $\frac{1}{2}$. El método de Walsh es muy conveniente cuando se toma un número limitado de muestras que sean potencia entera de dos, ya que precisa una carga computacional más baja. Utilizando las ecuaciones descritas en [16], se puede llegar a los siguientes resultados, en los cuales observamos cómo se puede distinguir fácilmente una corriente de conexión de una falta interna.

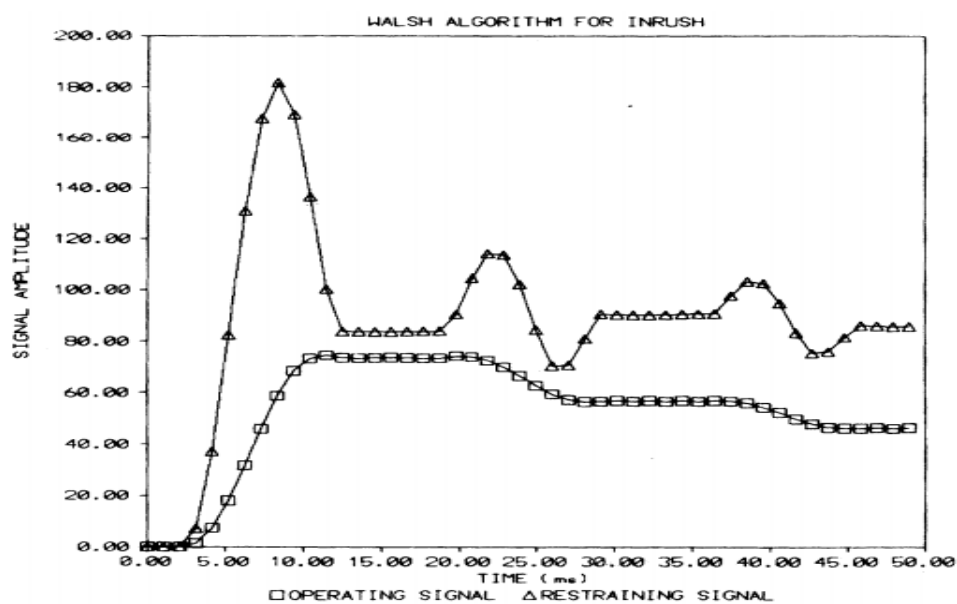


Fig. 2-20 Algoritmo Walsh para corriente de conexión.

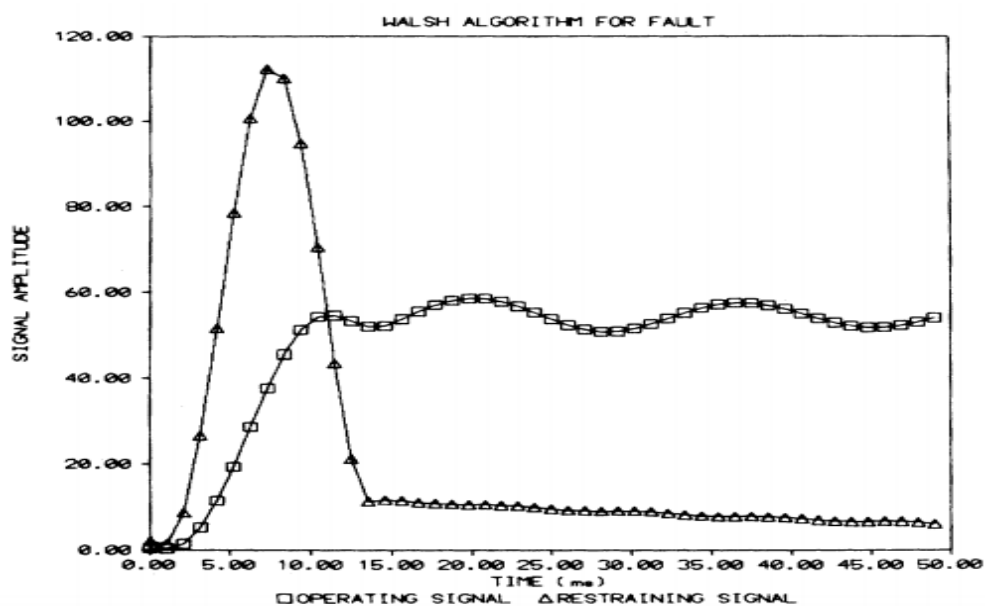


Fig. 2-21 Algoritmo Walsh para falta interna.

2.5.1.3 Método por lógica difusa

En 1995 Wiszniewsky y Kasztenny [20] presentaron un relé diferencial para la protección de transformadores de potencia utilizando lógica difusa. En sistemas de protección digital las señales del relé son muestreadas a intervalos regulares, digitalizadas y procesadas dentro de una ventana de tiempo predefinida. Ciertas incertidumbres debidas a imprecisiones en la medida y a componentes transitorias pueden ser minimizadas si las señales del relé se representan mediante funciones difusas mediante funciones miembro debidamente definidas.

La figura 2-22 muestra la creación de una señal de relé difusa y en la figura 2-23 muestra la amplitud de un fasor de intensidad representado como señal difusa.

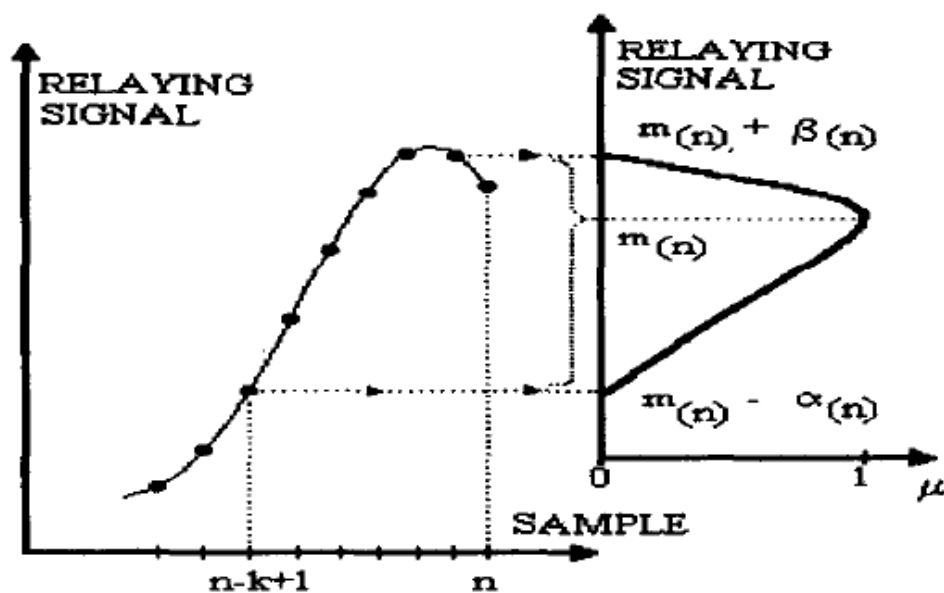


Fig. 2-22 Creación de una señal de relé difusa.

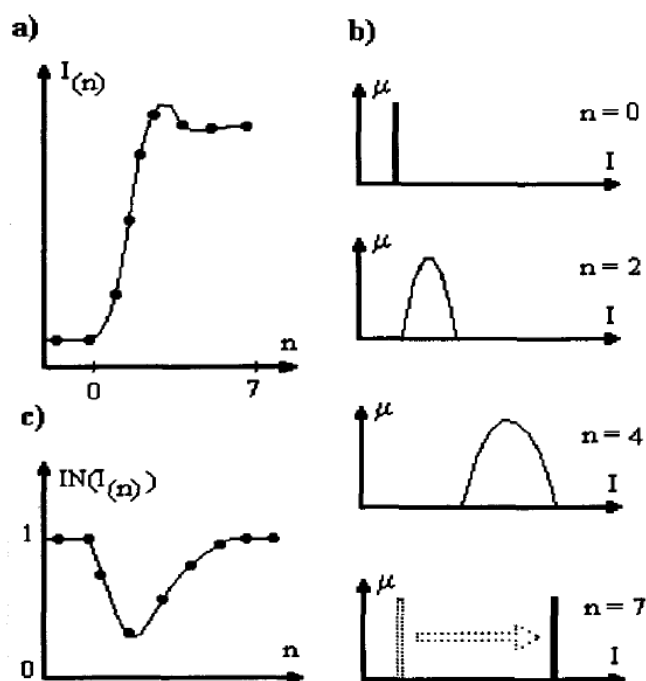


Fig. 2-23 Amplitud de un fasor de intensidad representado como señal difusa.

2.5.1.4 Método por redes neuronales artificiales

Zaman y Rahman, en 1998 [21] presentaron un estudio experimental de la aplicación de las redes neuronales artificiales a la protección de transformadores de potencia para discriminar entre corrientes de conexión y corrientes de falta interna. Puesto que la presencia de 2º y 5º armónicos no constituye por sí misma una indicación de la presencia de una corriente de conexión, se hace preciso utilizar algoritmos que no tengan en cuenta el contenido armónico, sino un patrón diferente.

Las redes neuronales artificiales han sido exitosamente implementadas en problemas de reconocimiento de patrones. El problema básico en la utilización de las redes neuronales artificiales es la formulación del problema, para lo que se hace necesario reconocer las entradas y las salidas del sistema. Obviamente las entradas serán las corrientes diferenciales, que en el caso de un transformador trifásico serán tres corrientes diferenciales en cada instante. En cada instante, se toma una ventana

de 16 muestras consecutivas de corrientes, como se muestra en la figura 2-24. La salida será simplemente una indicación de la presencia o no de una corriente de conexión.

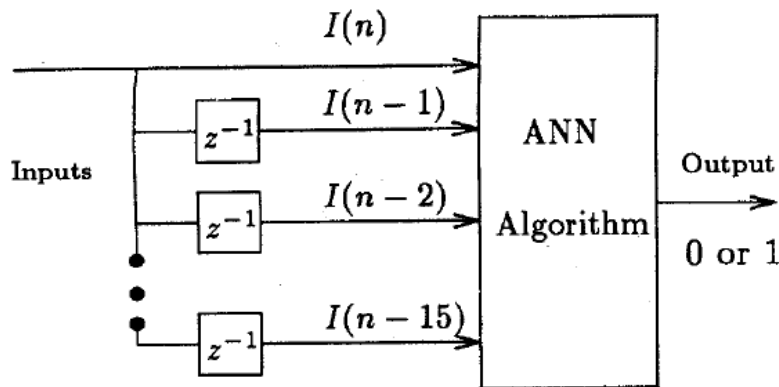


Fig. 2-24 Entradas y salida de la red neuronal artificial.

La filosofía de las redes neuronales artificiales consiste en entrenarlas. La red “aprende” unos patrones dados de entradas-salida. Cada patrón de entrada es aplicado a la red la cual se propaga hacia cada uno de los niveles superiores hasta que se alcanza la salida. El entrenamiento se repite hasta que el error en la salida es llevado a un valor mínimo.

Los autores concluyen afirmando la robustez del sistema, sistema que tiene como característica diferenciadora que en el método empleado no se ha utilizado ningún modelo del circuito equivalente del transformador ni se analizó el contenido armónico de las señales.

Nikhil Kumar y otros, en 2008 [01] propusieron un algoritmo parecido al presentado por Zaman y Rahman, el cuál realizaron con el programa de simulación MATLAB SIMULINK como se muestra en la figura 2-25.

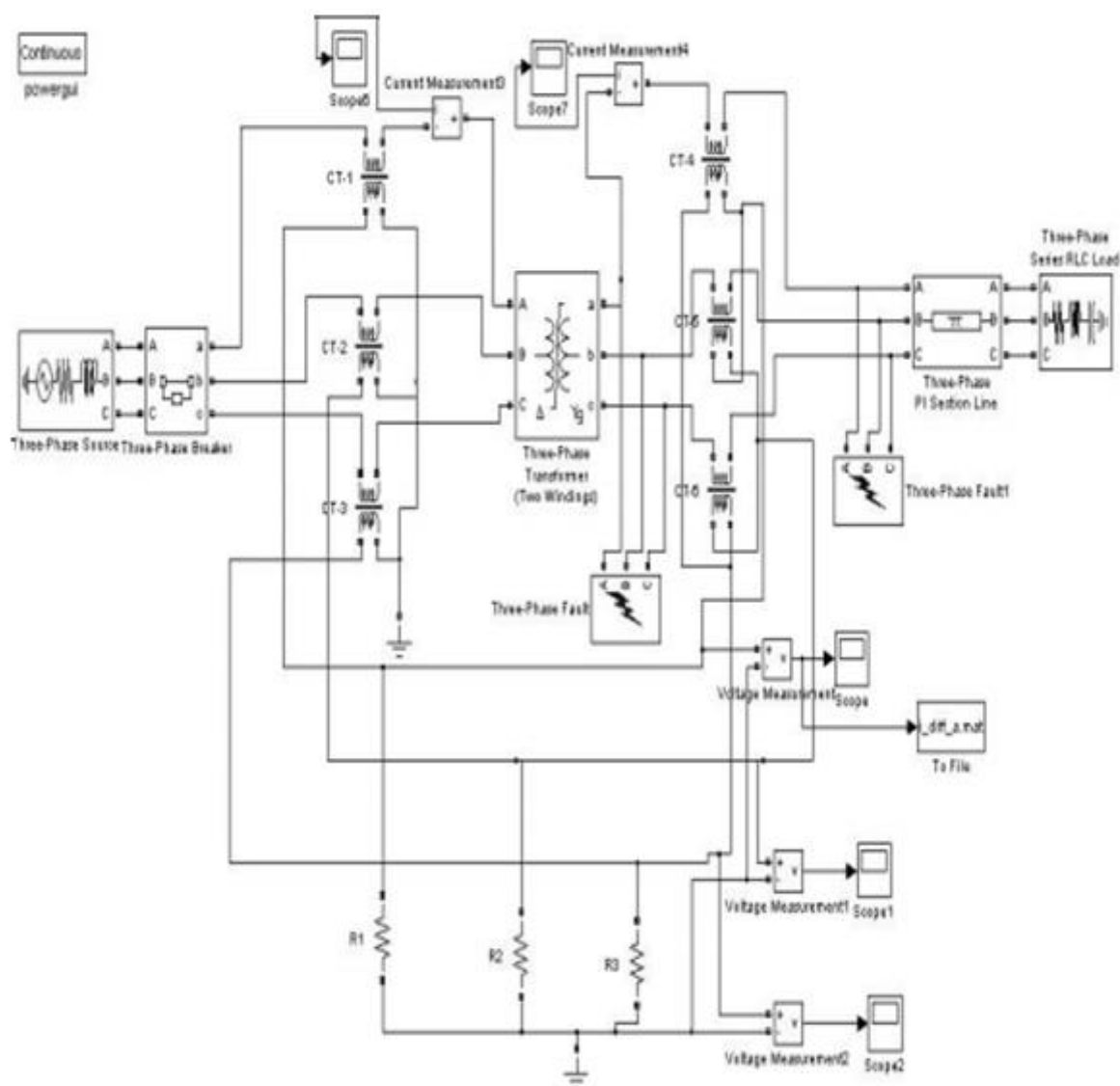


Fig. 2-25 Esquema simulado en MATLAB-SIMULINK.

Una vez realizadas las simulaciones llegaron a la conclusión de que el método utilizado es muy útil para su incorporación en una protección diferencial, ya que no solo discrimina entre corriente de conexión y falta interna, sino también para faltas externas.

2.5.1.5 Métodos por transformada wavelet

A continuación se realizará un breve estudio del arte sobre las protecciones diferenciales basadas en la transformada wavelet. En el siguiente apartado profundizaremos más sobre la transformada wavelet, ya que es en lo que se basa el actual trabajo.

En 1984 Fakruddin, Parthasarathy, Jenkins y Hogg [15] investigaron sobre la aplicación de las funciones de Haar a la protección diferencial. Las funciones de Haar tienen la propiedad de representar una función con gran precisión utilizando un número reducido de términos. Las características de convergencia de la expansión en las funciones de Haar son superiores a otras funciones. La eficiencia en el cálculo se mejora considerablemente utilizando un algoritmo de factorización similar al utilizado en la transformada rápida de Fourier y en la transformada de Walsh. El número total de sumas o restas es $2(N-1)$. Por tanto el tiempo de transformación es linealmente proporcional al número de términos N , en contraste con las transformaciones de Fourier y Walsh en la que es proporcional a $N \cdot \log_2 N$.

En 2000 P.L. Mao¹, R.K. Aggarwal [02] propusieron un método de lógica para discriminar entre corriente de conexión y falta interna basado en la transformada wavelet, ya que según los autores las características extraídas por la transformada wavelet tiene una propiedad más clara de distinguir estos dos efectos, que la que se consigue mediante la transformada de Fourier, debido a la rápida localización de frecuencias características de la transformada wavelet. Como resultado de las características extraídas nos indica que la decisión para distinguir entre corriente de conexión y falta interna en diferentes sistemas de transformadores de potencia es realizable con precisión. Para ello se propuso el siguiente diagrama de flujo para realizar el estudio:

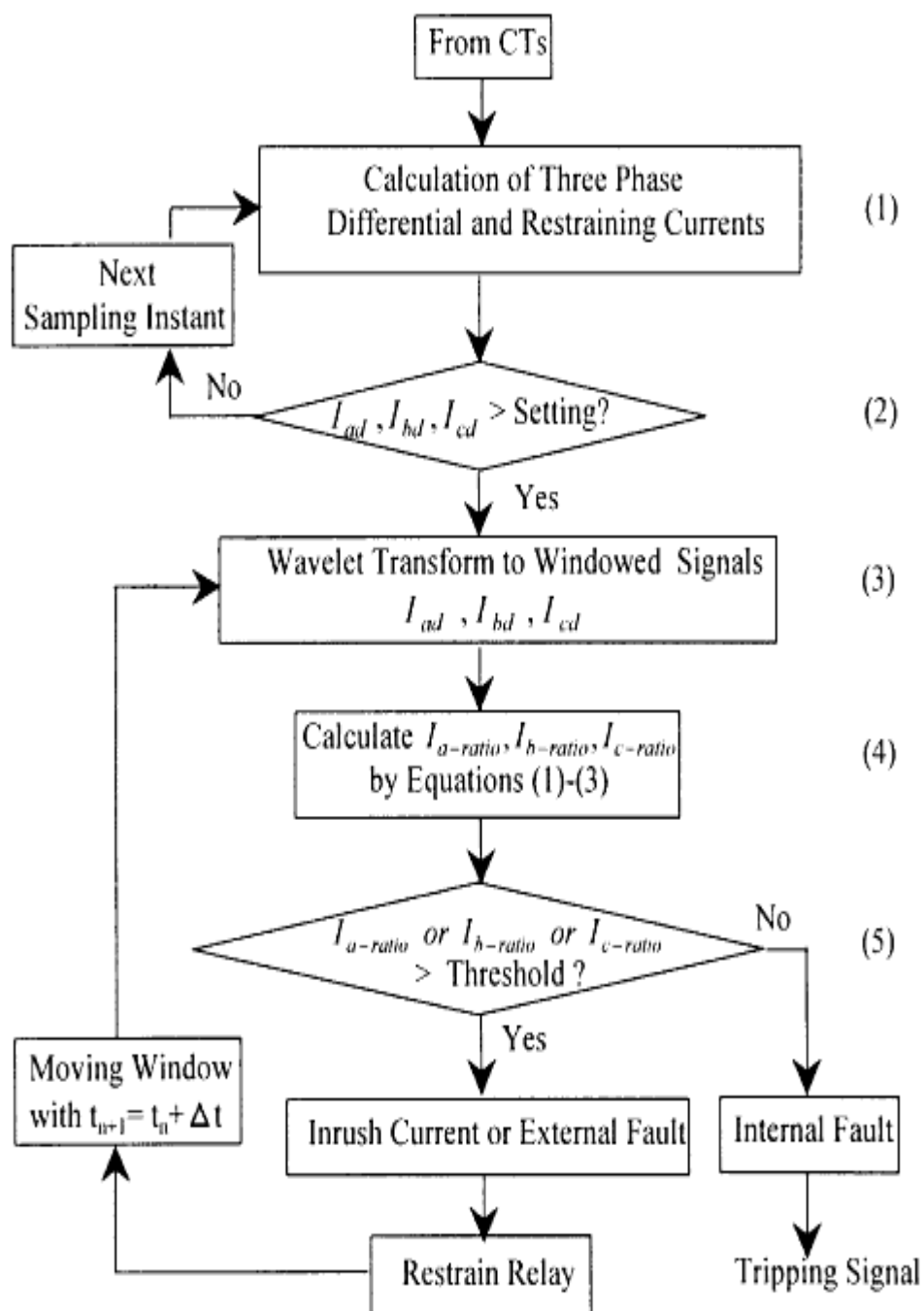


Fig. 2-26 Diagrama de flujo de toma de decisiones.

Para determinar si la intensidad diferencial es debida a una corriente de conexión o a una falta interna, los autores utilizan las ecuaciones (2.15) , (2.16) y (2.17) para compararlas con un valor ϵ , el cual han determinado que es 0,4. En el caso que alguno de los valores obtenidos de las ecuaciones anteriores es mayor que ϵ , tenemos una corriente de conexión o una falta externa, en caso contrario tenemos una falta interna.

$$I_{a-ratio} = \frac{I_a^k - d1, max}{I_a - d1, max} \quad (2.15)$$

$$I_{b-ratio} = \frac{I_b^k - d1, max}{I_b - d1, max} \quad (2.16)$$

$$I_{c-ratio} = \frac{I_c^k - d1, max}{I_c - d1, max} \quad (2.17)$$

En 2005 A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam [03] propusieron un método similar al anterior, ya que utiliza la transformada wavelet, pero en [02] utilizan el primer detalle de la transformada de wavelet de Daubechies (d1) y en el actual utilizan el sexto (d6). Proponen utilizar la señal primitiva y la suma absoluta de la señal obtenida de “d6”; también van un paso más adelante y no sólo proponen discriminar entre falta interna y corriente de conexión, sino también fenómenos como una conmutación de carga o de un condensador. La ecuación utilizada no se menciona en este artículo, pero si muestran los distintos resultados obtenidos como muestran las siguientes figuras:

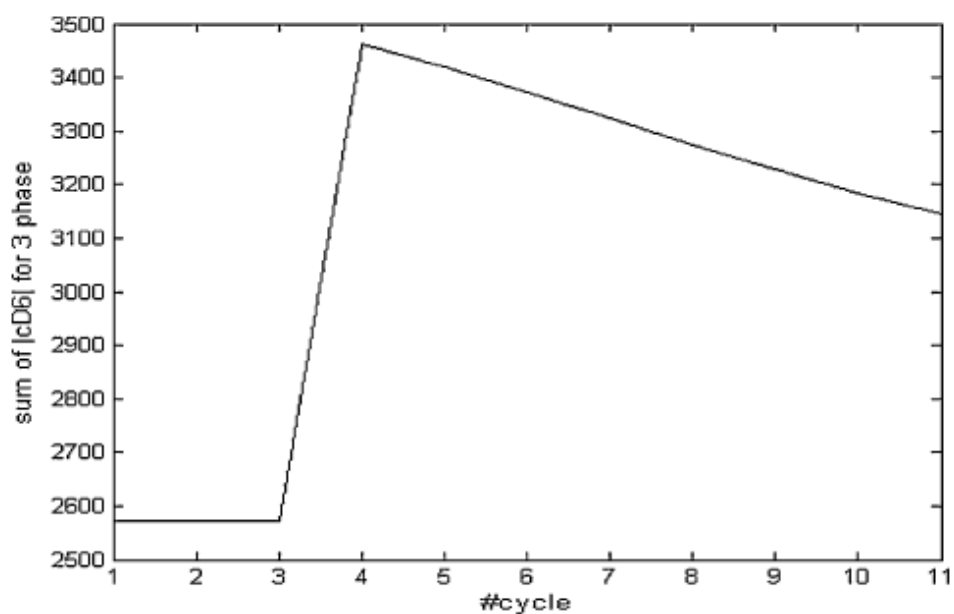


Fig. 2-27 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una corriente de conexión.

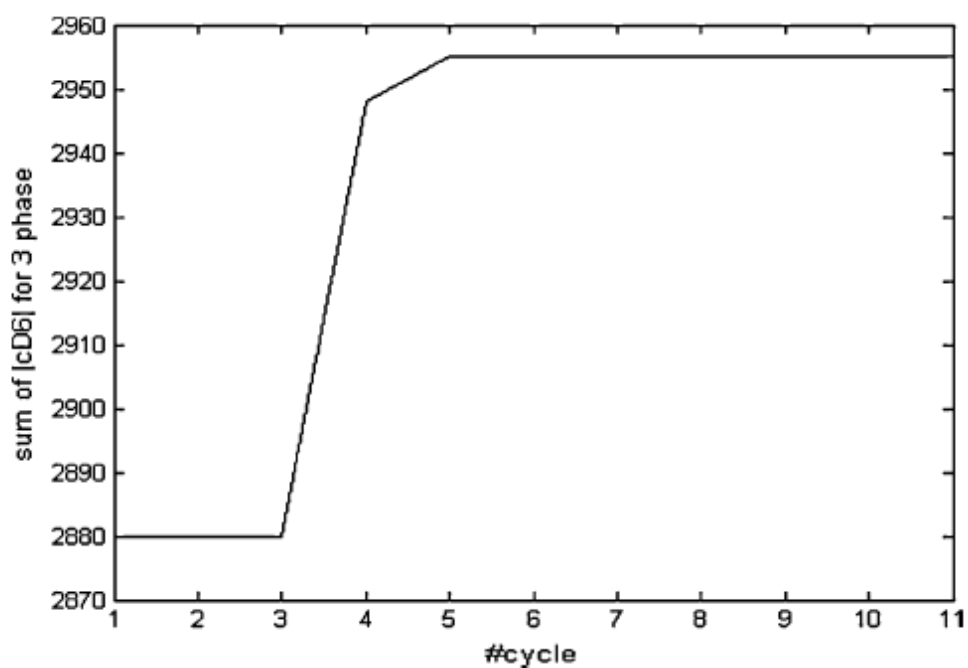


Fig. 2-28 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una conmutación de carga.

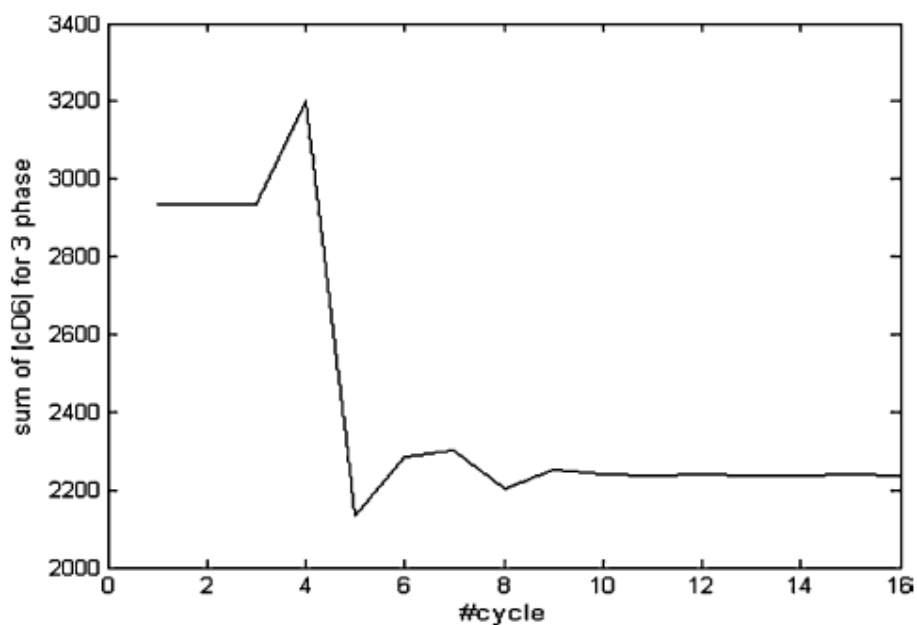


Fig. 2-29 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una conmutación de condensador.

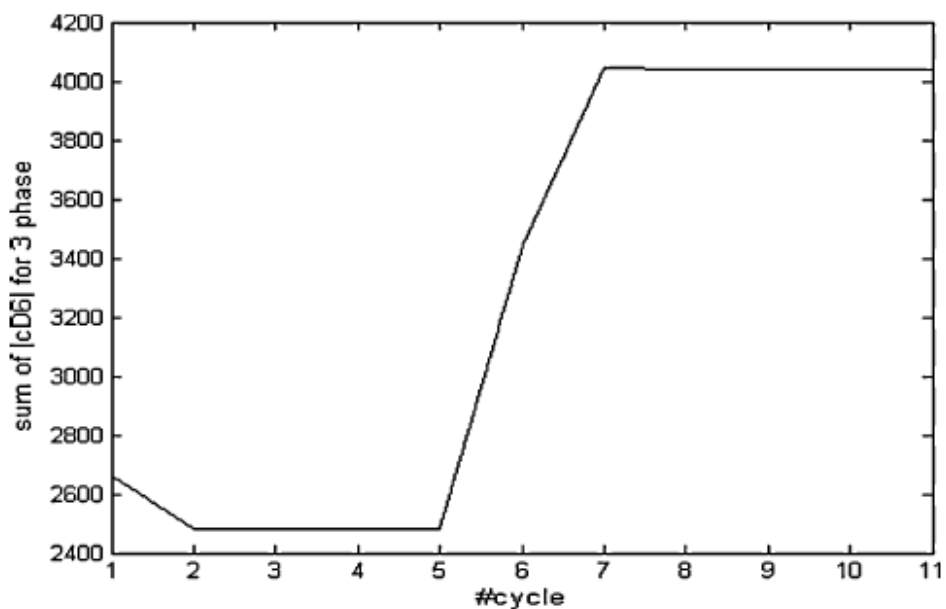


Fig. 2-30 Resultado obtenidos del algoritmo propuesto para una falta a tierra.

Los autores concluyen que los resultados de simulación muestran que el método propuesto es aplicable en la detección de la corriente de entrada de varios tipos de fenómenos transitorios.

En 2005 S. A. Saleh, M. A. Rahman [04], presentan un nuevo algoritmo para la protección diferencial de transformadores de potencia trifásicos que se basa en el paquete de la transformada wavelet. El paquete de la transformada wavelet se emplea para extraer ciertas características de la corriente diferencial para distinguir entre la corriente de magnetización y diferentes corrientes de falla internos. El algoritmo se basa en la evaluación de los coeficientes “wavelet packet transform” (WPT) de la segunda sub-banda de frecuencias de nivel. La selección del análisis wavelet óptimo que incluye la selección tanto de la wavelet madre óptima y el número óptimo de niveles de resolución se lleva a cabo utilizando los criterios de datos de longitud mínima de descripción “Minimum Description Length” (MDL). El algoritmo propuesto se prueba fuera de línea utilizando los datos obtenidos de un transformador de potencia trifásico de laboratorio prototipo. Los resultados del ensayo muestran una reducción de la carga computacional de alta velocidad y alta precisión. En las siguientes figuras podemos observar las distintas gráficas obtenidas con el actual método en distintos casos y en la figura 2-31 se presenta el diagrama de flujo planteado para su implantación en una protección diferencial.

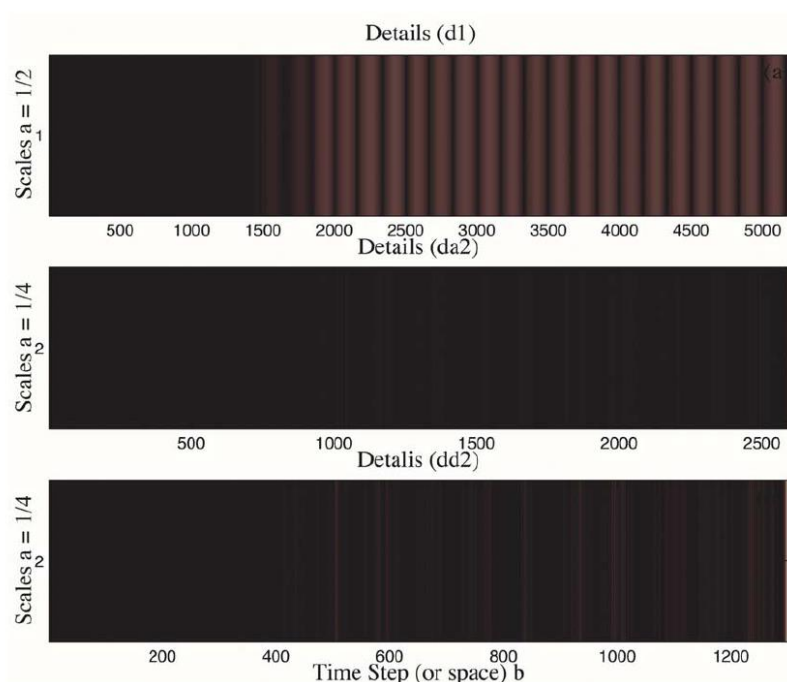


Fig. 2-31 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente de funcionamiento normal.

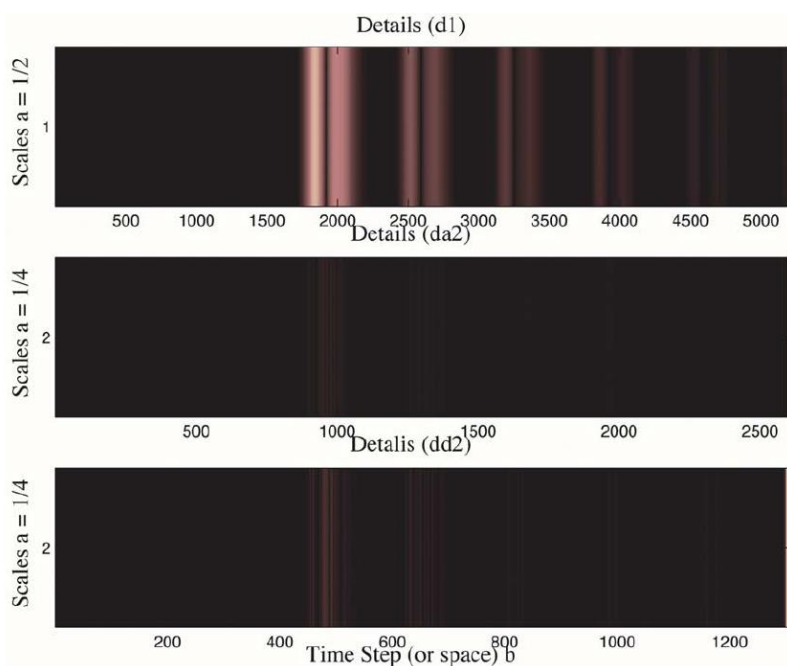


Fig. 2-32 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente de conexión.

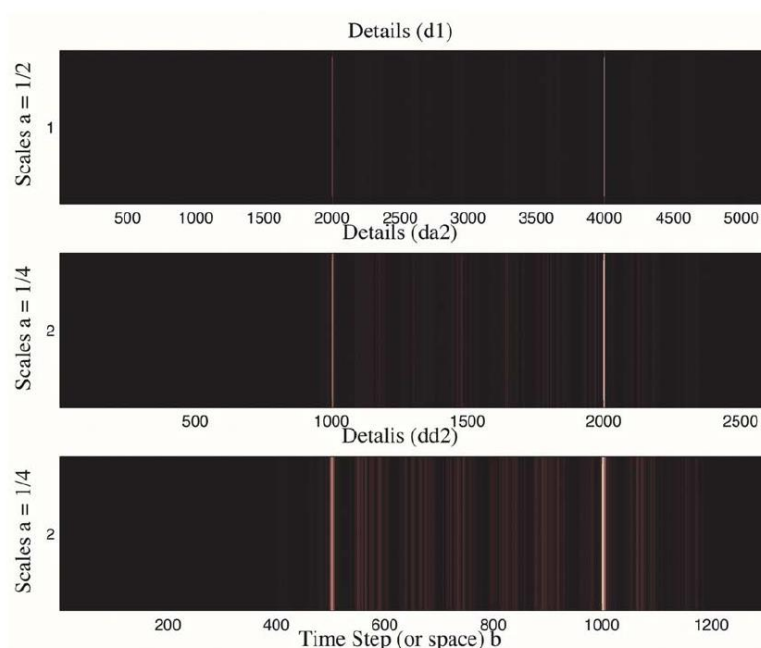


Fig. 2-33 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente falta fase-tierra.

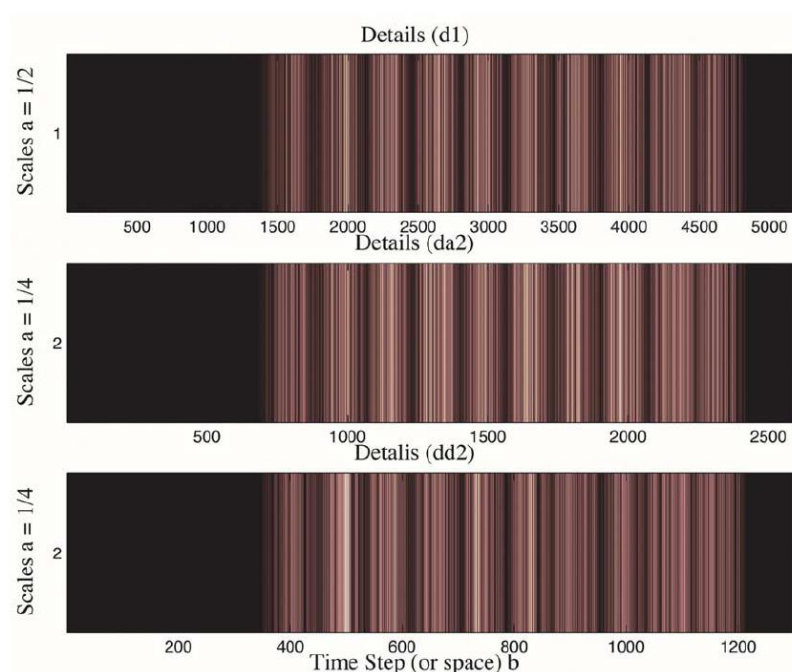


Fig. 2-34 Primer y segundo detalle de WPT para una corriente falta trifásica-tierra.

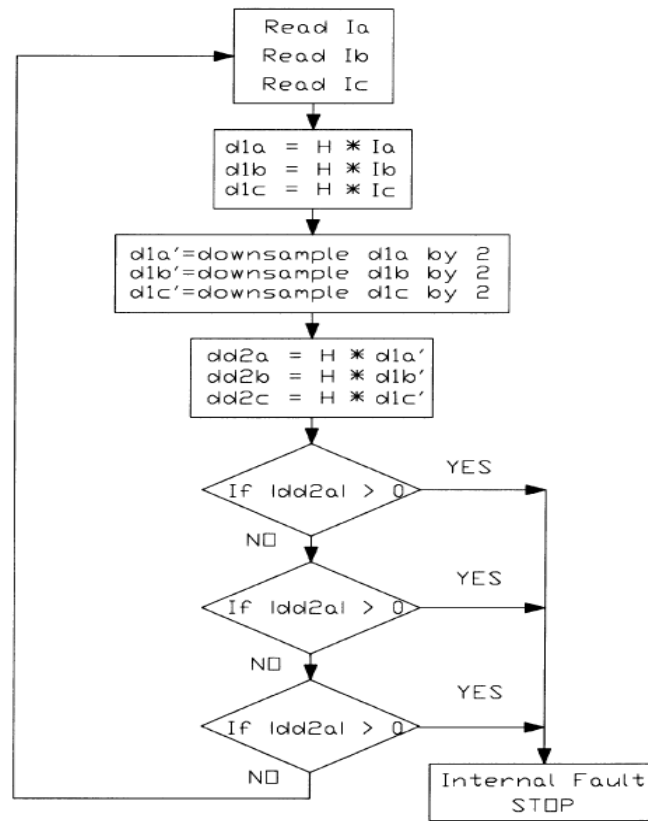


Fig. 2-35 Diagrama de flujo de protección diferencial.

En 2007 H. Monsef y S. Lotfifard [05], proponen utilizar la transformada wavelet junto con sistema de inferencia difusa basada en la red adaptativa (ANFIS), para discriminar entre corriente de conexión y falta interna. Para ello observaron que una corriente de conexión posee mayor pendiente que una falta interna; una pendiente más grande en el dominio del tiempo muestra que hay frecuencias más altas en el dominio de frecuencia.

Con base en los principios anteriores, se espera que la amplitud de las altas frecuencias en los instantes iniciales del tiempo tenga una tendencia a desaparecer después de las faltas internas. Esta tendencia se ha mostrado en la figura 2-36 (D1-D5), donde la corriente diferencial debido a la falta interna AB-G en $t = 0.3$ s y niveles de frecuencia de la WT se demuestran.

También se espera que la amplitud de las componentes de alta frecuencia en el momento inicial tenga una tendencia creciente en la corriente de conexión. Esto significa que sus amplitudes aumentan desde un valor bajo a un valor alto. La intensidad diferencial debida a la corriente de conexión en $t = 0,3$ s y la frecuencia resultante de WT se presentan en la figura 2-37 (D1-D5). Las características descritas anteriormente son claramente visibles en D5. La figura 2-38 muestra la forma de onda de corriente diferencial debido a la corriente de fallo y la corriente de conexión en D5.

Como se muestra en esta figura, la corriente de conexión tiene una tendencia creciente a D5, y la corriente de falta interna tiene una tendencia decreciente.

Para realizar la detección en el menor tiempo posible, que en este caso es de medio ciclo, se utiliza ANFIS y se entrena la protección para que el error producido sea mínimo y por tanto reducir el número de cálculos a realizar para la detección de una falta.

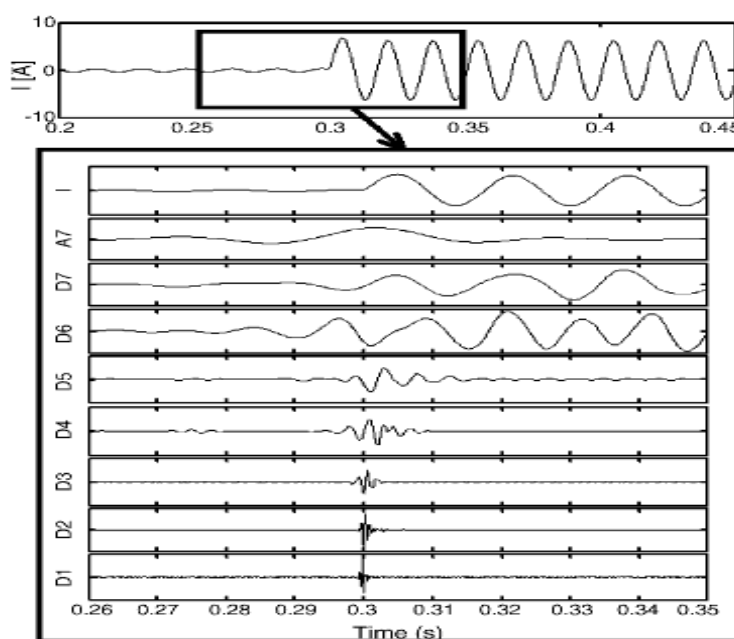


Fig. 2-36 Corriente diferencial para una falta interna AB-G y los distintos detalles de TW.

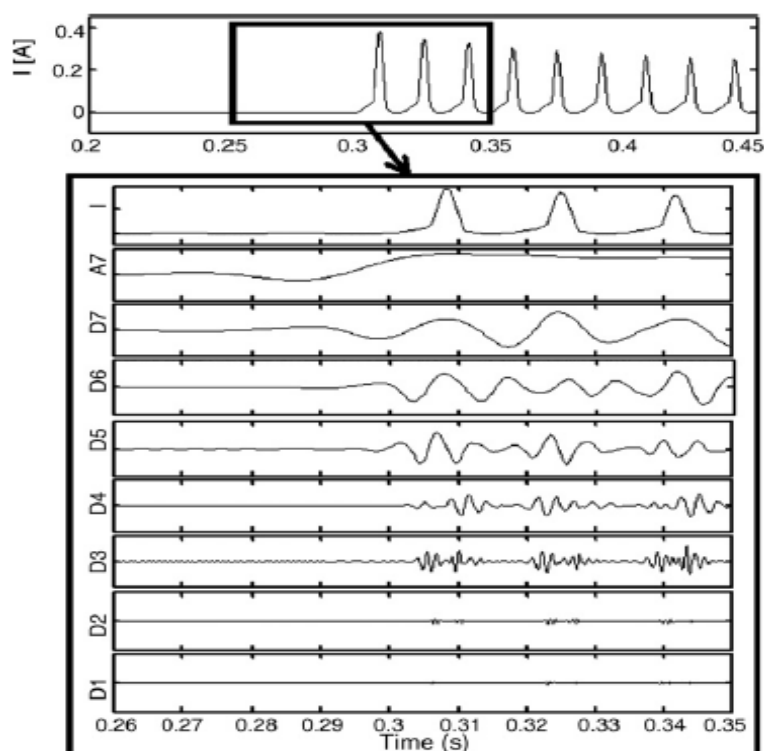


Fig. 2-37 Corriente diferencial de una corriente de conexión y los distintos detalles de TW.

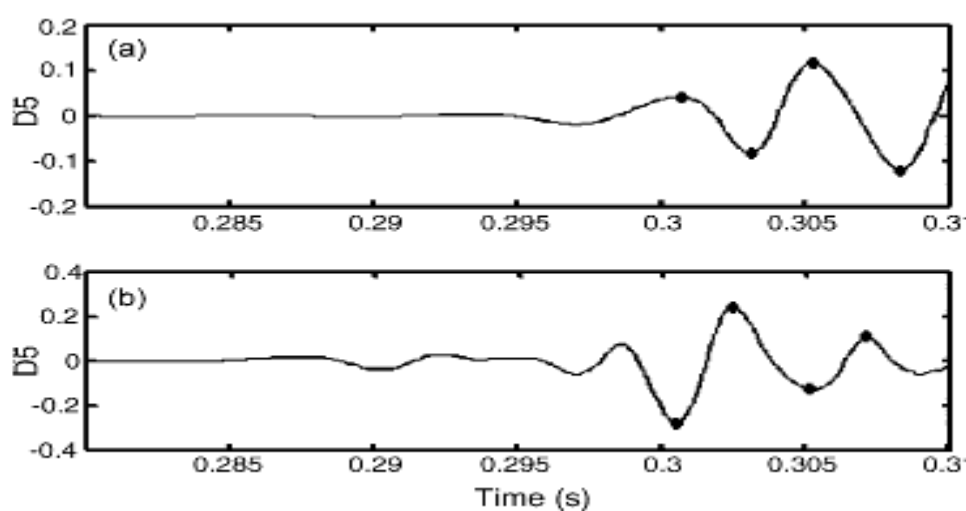


Fig. 2-38 (a) corriente de conexión, (b) Falta interna para D5.

En 2011 A. Rahmati and M. Sanaye-Pasand [06], proponen otro algoritmo para discriminar entre la corriente de conexión y faltas internas. La técnica se basa en el

reconocimiento de patrones de las corrientes diferenciales usando las componentes de alta frecuencia generadas durante la perturbación. Estas componentes se extraen mediante un procesador basado en wavelets. Utilizando el criterio desarrollado para tres fases, las faltas internas se detectan correctamente en aproximadamente 1/8 ciclo después de la ocurrencia de la perturbación.

Para desarrollar el algoritmo se compara la pendiente de la corriente diferencial como se muestra en la figura 2-39, para observar como es la variación de la pendiente en el tiempo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\left| \frac{dl_{diff_i}}{dt} \right| < \left| \frac{dl_{diff_f}}{dt} \right|, t \in \left(dist_t, dist_t + \frac{T}{4} \right) \quad (2.18)$$

donde, l_{diff_i} e l_{diff_f} son corrientes diferenciales instantáneas en condiciones de corriente de conexión y falta interna, respectivamente, “t” es el tiempo, “T” es el período y $dist_t$ es el tiempo de perturbación.

Además, el algoritmo propuesto se basa en el hecho de que el punto de variación de pendiente para la condición de corriente de conexión comienza más tarde en comparación con la de la condición de falta. Eso significa que al menos para una de las tres fases:

$$t_{Max\left\{\frac{dt_{diff_i}}{dt}\right\}} - dist_t = \text{intervalo de tiempo corriente de conexión.} \quad (2.19)$$

$$t_{Max\left\{\frac{dt_{diff_f}}{dt}\right\}} - dist_t = \text{intervalo de tiempo falta.} \quad (2.20)$$

$$\text{intervalo de tiempo corriente de conexión} > \text{intervalo de tiempo falta} \quad (2.21)$$

Se sabe que las variaciones bruscas en el dominio del tiempo (es decir, lugares en los que la pendiente de la señal cambia rápidamente) dan componentes de alta frecuencia en el dominio de la frecuencia. En consecuencia, se puede concluir que,

en el intervalo de tiempo inicial después de una perturbación, los componentes de alta frecuencia para una falta interna son más altos comparados con los de la corriente conexión. Mediante la aplicación de la WT a la corriente diferencial instantánea del transformador, se espera que los componentes más altos se obtengan para la falta interna en comparación con los componentes de la corriente de conexión.

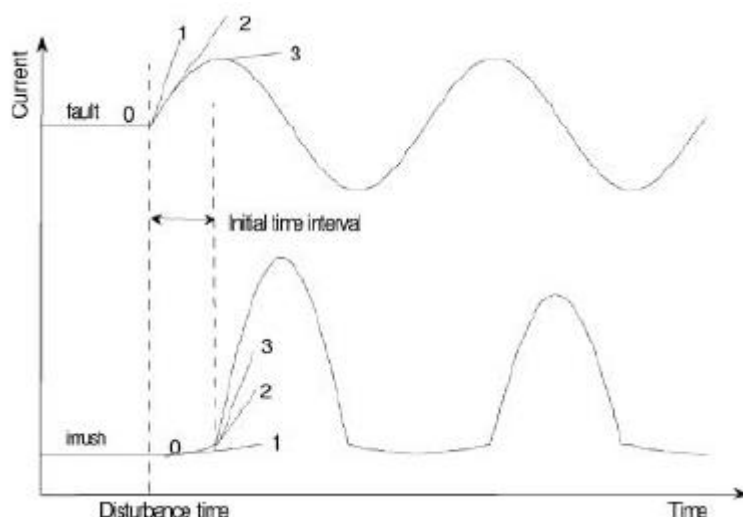


Fig. 2-39 Comparación entre falta interna y corriente de conexión.



TRANSFORMADA WAVELET

CAPÍTULO 3. TRANSFORMADA WAVELET

3.1	Introducción.....	60
3.2	Bases de la función escala.....	61
3.3	Bases Wavelet	63
3.3.1	Transformada Wavelet.....	64
3.3.2	Wavelets ortogonales y discretas	65
3.3.3	Descomposición Wavelet.....	67
3.3.4	Reconstrucción Wavelet	71
3.3.5	Tipos de familias de transformada wavelet.....	71
3.3.5.1	Haar	71
3.3.5.2	Daubechies	72
3.3.5.2.1	Daubechies para MATLAB.....	73
3.3.5.3	Biorthogonal	78
3.3.5.4	Coiflets	78
3.3.5.5	Symlets.....	79

3.1 Introducción

En el presente capítulo nos centraremos en la llamada Transformada Wavelet, desde el punto de vista histórico [7]. El análisis por la transformada wavelet es un método novedoso, por otra parte sus fundamentos matemáticos se basan a la obra de Joseph Fourier en el siglo XIX.

La primera mención que se tiene constancia de la expresión WAVELET fue en 1909, en la tesis de Alfred Haar. Aunque el concepto de transformada wavelet como lo conocemos actualmente fue propuesto por primera vez por Jean Morlet y su equipo en el Centro de Física Teórica de Marsella en Francia.

Los métodos desarrollados hasta el momento han sido llevados a cabo principalmente por Y. Meyer y su equipo. El algoritmo principal es desarrollado por Stephane Mallat en 1988. Desde ese momento los investigadores han demostrado gran interés por este método. En la actualidad la investigación sobre la transformada wavelet se desarrolla principalmente en EEUU, donde está encabezada por los científicos Ingrid Daubechies, Ronald Coifman, y Víctor Wickerhauser. Dicho lo anterior, no podemos olvidarnos del profesor M. A. Rahman actualmente profesor en una universidad de Canadá, que ha realizado un gran trabajo en el campo de la aplicación de la transformada wavelet aplicada a señales eléctricas.

Esta herramienta es eficiente para el análisis local de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad y, al igual que la Transformada de Fourier con Ventana, analiza la señal en una representación de tiempo-escala. La diferencia está en que la Transformada Wavelet provee análisis de multiresolución con ventanas dilatadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas estrechas y el análisis de las frecuencias de menor rango se hace utilizando ventanas anchas.

La Transformada Wavelet no es solamente local en tiempo, como ocurre en otros métodos, sino también en frecuencia.

Esta poderosa herramienta se utiliza, además del análisis local de señales no estacionarias, en el análisis de señales electrocardiográficas, sísmicas, de sonido, de

radar, así como también se utiliza para la compresión y procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones.

3.2 Bases de la función escala

La función de escala es una base ortonormal que juega el papel de función promedio. La correlación entre la función de escala y una función continua arbitraria produce la aproximación promediada de la última.

La función de escala básica $\phi(t)$, dilatada por un factor de escala 2^i , es desplazada con un factor de escala discreto de traslación k ,

$$\phi_{i,k}(t) = 2^{-i/2} \phi(2^{-i}t - k) \quad (3.1)$$

Las funciones de escala básica $\phi(t)$ que se emplean satisfacen la condición de ortogonalidad, tal que las traslaciones discretas $\{\phi(t-k)\}$ con $k \in \mathbf{Z}$, forman un conjunto ortonormal. La proyección de una función $f(t) \in \mathbf{L}_2(\mathbf{R})$ en la base ortonormal $\{\phi(t-k)\}$ es una correlación entre la función $f(t)$ original y la función de escala $\phi(t)$ muestreada a intervalos enteros.

Como resultado de la proyección de $f(t)$ en la base de la función de escala, se obtiene una aproximación menos detallada de $f(t)$. Todas las aproximaciones de $f(t)$ forman un subespacio $V_0 \in \mathbf{L}^2(\mathbf{R})$. El espacio vectorial V_0 puede ser interpretado como el conjunto de todas las posibles aproximaciones de la función en $\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$ generado por el conjunto ortonormal $\{\phi(t-k)\}$.

Las funciones de escalas para todas las escalas $s = 2^i$ con $i \in \mathbf{Z}$, generadas a partir de la misma $\phi(t)$, son todas de forma similar. Debido a que la función de escala básica $\phi(t)$ genera la base ortonormal $\{\phi(t-k)\}$ de V_0 , con un paso de traslación entero, la función de escala dilatada $\phi(t/2)$ generará la base ortonormal $\{\phi(2^{-1}t-k)\}$ de V_1 con un paso de traslación igual a 2, y $\phi(t/4)$ generará la base ortonormal $\{\phi(2^{-2}t-k)\}$ de V_2 con un paso de traslación igual a 4, y así sucesivamente. Existe entonces un conjunto

de bases ortogonales de las funciones de escala. Cada base de la función de escala es ortonormal en el espacio de la misma escala:

$$\langle \phi_{i,k}, \phi_{i,n} \rangle = \delta_{k,n} \quad (3.2)$$

para todo k y $n \in \mathbb{Z}$.

Las proyecciones en $L^2(\mathbb{R})$ sobre el conjunto de bases ortonormales de la función de escala, forman un conjunto de subespacios V_i . Cada subespacio V_i es el conjunto de todas las posibles aproximaciones de la función en $L^2(\mathbb{R})$ generado por la base ortonormal de la función de escala $\{\phi(2^{-i}t-k)\}$. El subespacio V_i es abarcado por la base ortonormal de la función de escala en el nivel de resolución i . Por lo tanto, la función de escala $\phi(t)$ genera los subespacios del análisis multiresolución.

Las aproximaciones de una función $f(t)$ en diferentes resoluciones deben ser similares, ya que son todas generadas por la misma función de escala con escalas diferentes. Los espacios de aproximación V_i pueden ser, entonces, deducidos unos de otros por simple dilatación:

$$f(t) \in V_i \leftrightarrow f(2t) \in V_{i-1} \quad (3.3)$$

Toda la información útil para calcular la función de aproximación en el nivel de menor resolución i , está contenida en la función de aproximación en el nivel de mayor resolución $(i-1)$. Entonces, V_i es un subespacio de V_{i-1} .

3.3 Bases Wavelet

A causa de que la proyección de una función sobre la base de la función de escala ortonormal es una aproximación menos detallada de la función en un nivel de resolución particular, se pierde algo de información en el proceso; esto significa que la función de escala ϕ no es completa a cualquier nivel. Por lo tanto, se usan las proyecciones sobre otras funciones, denominadas *wavelet ortonormales* (o simplemente *wavelets*), para obtener la información complementaria de los detalles de la función.

Como se verá más adelante, las wavelets son generadas a partir de la *wavelet madre* $\psi(t)$ por traslaciones y dilataciones discretas

$$\Psi_{i,k}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - k) \quad (3.4)$$

Cuando la transformada de Fourier $\psi(w)$ de la wavelet madre satisface la condición de ortogonalidad, las traslaciones discretas de las wavelet madre $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$ forman una base ortonormal para cada escala 2^i . Más aún, en el mismo nivel de resolución, el conjunto de traslaciones wavelet es ortogonal al conjunto de traslaciones de la función de escala en el espacio de la misma resolución

$$\langle \phi_{i,k}, \psi_{i,n} \rangle = 2^{-i} \int \phi_i(t-k) \psi_i(t-n) dt = 0 \quad (3.5)$$

para todo k y $n \in \mathbb{Z}$.

La proyección de $f(t)$ sobre las bases wavelet ortonormales es una correlación entre $f(t)$ y $\psi(t)$ muestreada a intervalos discretos. Las proyecciones de las funciones en $L^2(\mathbb{R})$ sobre la base wavelet ortonormal $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$, forman un subespacio W_i . El subespacio W_i es abarcado por $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$.

Como la base wavelet $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$ es ortogonal a la base de función de escala $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$, dentro de la misma escala, el subespacio W_i es el complemento ortogonal del subespacio V_i :

$$W_i \perp V_i \quad (3.6)$$

Tanto V_i como W_i son subespacios de V_{i-1} ($V_i, W_i \in V_{i-1}$), y en razón de que W_i es el complemento ortogonal de V_i , el subespacio V_{i-1} es la suma directa de V_i y W_i :

$$V_{i-1} = V_i \oplus W_i \quad (3.7)$$

3.3.1 Transformada Wavelet

Genéricamente, la Transformada Wavelet de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\Psi_{s,\tau}(t)$, que forman una base y son llamadas las “*Wavelets*”. La Transformada Wavelet se define como:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \Psi_{s,\tau}(t) dt \quad (3.8)$$

Las Wavelets son generadas a partir de la traslación y cambio de escala de una misma función wavelet $\psi(t)$, llamada la “*Wavelet madre*”, y se define como:

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3.9)$$

donde s es el factor de escala, y τ es el factor de traslación.

Las wavelets $\Psi_{s,\tau}(t)$ generadas de la misma función wavelet madre $\Psi(t)$ tienen diferente escala “ s ” y ubicación τ , pero tienen todas la misma forma. Se utilizan siempre factores de escala $s > 0$. Las Wavelets son dilatadas cuando la escala $s > 1$, y son contraídas cuando $s < 1$. Así, cambiando el valor de “ s ” se cubren rangos diferentes de frecuencias. Valores grandes del parámetro “ s ” corresponden a frecuencias de menor rango, o una escala grande de $\Psi_{s,\tau}(t)$. Valores pequeños de “ s ” corresponden a frecuencias de mayor rango o una escala muy pequeña de $\Psi_{s,\tau}(t)$.

3.3.2 Wavelets ortogonales y discretas

Cuando la función $f(t)$ es continua y las wavelets son continuas con factor de escala y traslación discretas, la Transformada Wavelet resulta en una serie de coeficientes wavelets, y es llamada la descomposición en Series Wavelet.

La función $f(t)$ puede ser reconstruida desde los coeficientes wavelets discretos $W_f(s, \tau)$, de la siguiente manera:

$$f(t) = A \sum_s \sum_\tau W_f(s, \tau) \Psi_{s, \tau}(t) \quad (3.10)$$

donde A es una constante que no depende de $f(t)$.

A estas funciones wavelets continuas con factores de escala y traslación discretos se las denomina *Wavelets discretas*. Los factores de escala y traslación de las wavelets discretas pueden ser expresados como:

$$s = s_0^i \quad y \quad \tau = k\tau_0 s_0^i \quad (3.11)$$

donde el exponente i y la constante k son enteros, y $s_0 > 1$ es un paso fijo de dilatación.

El factor de traslación τ depende del paso de dilatación “ s ”, como se aprecia en Ec. (3.11). Entonces, a partir de la Ec. (3.9) y con la Ec. (3.11), las correspondientes wavelets discretas quedan expresadas como:

$$\Psi_{i,k}(t) = s_0^{-i/2} \Psi\left(s_0^{-i}(t - k\tau_0 s_0^i)\right) = s_0^{-i/2} \Psi(s_0^{-i} t - k\tau_0) \quad (3.12)$$

A través de la Ec. (3.8), la Transformada Wavelet de una función continua es realizada a frecuencias y tiempos discretos que corresponden a muestreos con distintas traslaciones (tiempo) y distintas dilataciones (o cambios de escala).

El paso de muestreo en tiempo es pequeño para el análisis utilizando wavelets de pequeña escala, mientras que es grande para el análisis con wavelets de gran escala. La posibilidad de variar el factor de escala “ s ” permite usar wavelets de escala muy pequeña para concentrar el análisis en singularidades de la señal. Cuando solo los detalles de la señal son de interés, solamente son necesarios unos pocos niveles

de descomposición. Por lo tanto el análisis wavelet provee una forma más eficiente de representar señales transitorias.

A modo de ejemplo, podemos hacer una analogía entre el análisis de Wavelet y el microscopio. Así, el factor de escala s_0^i corresponde al aumento o resolución del microscopio y el factor de traslación τ corresponde a la ubicación donde se hace la observación con el microscopio. Si queremos mirar detalles muy pequeños, el aumento y la resolución deben ser grandes, lo que se corresponde con una i grande y negativa. Esto da lugar a una función wavelet muy concentrada, y a pasos de traslación pequeños. Para un valor de i grande y positivo, la wavelet se extiende y los pasos de traslación son adaptados a esa amplitud.

Eligiendo adecuadamente $\Psi(t)$ y los parámetros s_0, τ_0 , es posible lograr que las funciones $\Psi_{s,\tau}(t)$ constituyan una base ortonormal de $L^2(\mathbf{R})$. En particular si se elige $s_0=2$ y $\tau_0=1$, entonces existe $\Psi(t)$, con buenas propiedades de localización tiempo–frecuencia, tal que $\Psi_{s,\tau}(t)$ constituye una base ortonormal $L^2(\mathbf{R})$.

De esta forma, si las funciones wavelets discretas forman una base ortonormal, una función $f(t)$ de soporte finito puede ser reconstruida como una suma de los coeficientes wavelets discretos $W_f(s, \tau)$ multiplicados por las funciones de la base, como sigue:

$$f(t) = \sum_s \sum_\tau W_f(s, \tau) \Psi_{s,\tau}(t) \quad (3.13)$$

Una descomposición wavelet ortonormal no posee información redundante y representa la señal en forma unívoca. Una base wavelet ortonormal es posible con wavelets con factores de traslación y dilatación discretos [8]. Por lo tanto, para estas funciones wavelets discretas ortogonales, los productos internos son iguales a cero:

$$\int \Psi_{i,k}^*(t) \Psi_{m,n}(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{Si } i = m \text{ y } k = n \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.14)$$

3.3.3 Descomposición Wavelet

Sea la función $f(t) \in V_0$ que puede ser representada como la combinación lineal de las funciones de escala trasladadas $\phi(t-k)$ en V_0

$$f(t) = \sum_k c_0(k) \phi(t-k) \quad (3.15)$$

donde los coeficientes

$$c_0(k) = \langle f, \phi_{0,k} \rangle = \int f(t) \phi(t-k) dt \quad (3.16)$$

La función a ser analizada pertenece a V_0 , el cual corresponde al nivel de digitalización inicial al comenzar la descomposición. En el siguiente nivel de menor resolución $i = 1$, existen dos subespacios mutuamente ortogonales $\{\phi_{i,k}(t)\}$ y $\{\psi_{i,k}(t)\}$, respectivamente. Debido a que V_0 es la suma directa de V_1 y W_1 , existe una única forma de expresar una función $f(t) \in V_0$, como combinación lineal de funciones v_1 y w_1 , donde $v_1 \in V_1$ y $w_1 \in W_1$. En particular, la función $f(t) \in V_0$ puede descomponerse en sus componentes a lo largo de V_1 y W_1 :

$$f = (P_1 + Q_1)f \quad (3.17)$$

donde las dos componentes son las proyecciones ortonormales de $f(t)$ sobre V_1 y W_1 :

$$P_1 f = \sum_n c_1(n) \phi_{1,n} \quad Q_1 f = \sum_n d_1(n) \psi_{1,n} \quad (3.18)$$

Multiplicando ambos lados de la Ec. (3.19) por $\phi_{1,k}$ y calculando los productos internos, se obtiene:

$$\langle \phi_{1,k}, f \rangle = \langle \phi_{1,k}, P_1 f \rangle \quad (3.19)$$

Haciendo lo mismo en la Ec. (3.18) pero multiplicando por $\phi_{1,n}$ y usando la Ec. (3.15), se obtiene:

$$c_1(k) = \langle \phi_{1,k}, f \rangle = \langle \phi_{1,k}, P_1 f \rangle = \sum_n \langle \phi_{1,k}, \phi_{0,n} \rangle c_0(n) \quad (3.20)$$

donde el producto interno entre los dos conjuntos de la función de escala $\{\phi_{1,k}\}$ y $\{\phi_{0,n}\}$ se puede calcular como

$$\langle \phi_{1,k}, \phi_{0,n} \rangle = 2^{-1/2} \int \phi\left(\frac{t}{2} - k\right) \phi(t - n) dt = 2^{1/2} \int \phi(t) \phi(2t - (n - 2k)) dt \quad (3.21)$$

Sustituyendo $\phi(t)$ por la relación dos-escala en la Ec. (3.21) y usando la ortonormalidad del conjunto $\{\phi(2t)\}$ se obtiene:

$$C_1(k) = 2^{-1/2} \sum_n p(n - 2k) c_0(n) \quad (3.22)$$

La secuencia $c_1(k)$ o *tendencia* contiene los coeficientes del desarrollo de la función continua $f(t)$ en la base de la función de escala continua $\{\phi_{1,k}\}$ en V_1 . La secuencia $c_1(k)$ representa la versión suavizada de los datos originales $c_0(n)$.

Simultáneamente, multiplicando ambos lados de las Ec. (3.17) y (3.18) por la wavelet $\Psi_{1,n}$ y calculando los productos internos, se obtiene:

$$d_1(k) = \langle \Psi_{1,k}, Q_1 f \rangle = \langle \Psi_{1,k}, f \rangle = \sum_n \langle \Psi_{1,k}, \phi_{0,n} \rangle C_0(n) \quad (3.23)$$

y siguiendo los pasos aplicados para la obtención de $c_1(k)$ se llega a que:

$$d_1(k) = 2^{-1/2} \sum_n q(n - 2k) C_0(n) \quad (3.24)$$

De acuerdo con la Ec. (3.17), la proyección ortonormal $Q_1 f$ sobre W_1 es la información de *detalle* de $f(t)$. La secuencia $d_1(n)$ representa la diferencia entre la $f(t)$ original y la aproximación $P_1 f$, y se conoce como los *coeficientes wavelet discretos*.

La descomposición en aproximaciones suavizadas y detalles a menor resolución se puede continuar tanto como se desee.

Generalizando,

$$P_{i-1} f = P_i f + Q_i f = \sum_k C_i(k) \phi_{i,k} + \sum_k d_i(k) \Psi_{i,k} \quad (3.25)$$

donde:

$$c_i(k) = 2^{-1/2} \sum_n p(n - 2k) C_{i-1}(n) \quad (3.26)$$

$$d_i(k) = 2^{-1/2} \sum_n q(n - 2k) C_{i-1}(n) \quad (3.27)$$

La secuencia $c_i(n)$ y $d_i(n)$ pueden ser calculadas a partir de $c_{i-1}(n)$ por filtrado iterativo.

De esta manera, iterando hasta un nivel de resolución M , donde M toma un valor determinado, se puede representar la función original $f(t)$ por una serie de funciones detalle más una aproximación gruesa:

$$f(t) = P_M f + Q_M f + Q_{M-1} f + \dots + Q_1 f \quad (3.28)$$

$$f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} 2^{-M/2} C_M(k) \phi(2^{-M}t - k) + \sum_{i=1}^M \sum_{k \in \mathbb{Z}} 2^{-i/2} d_i(k) \Psi(2^{-i}t - k) \quad (3.29)$$

La Ec. (3.29) es la descomposición $f(t)$ en Series Wavelet. En esta descomposición wavelet las bases de la función de escala y las *bases wavelet* son todas continuas. Los coeficientes de aproximación $c_M(k)$ y los *coeficientes wavelet* $d_i(k)$ con $i = 1, 2, \dots, M$ y $k \in \mathbb{Z}$ son discretos.

Los coeficientes $c_1(n)$ y $d_1(n)$ se pueden calcular con un algoritmo discreto implementado por la aplicación recursiva de filtros discretos paso-alto y paso-bajo a las aplicaciones discretas $c_{i-1}(n)$. Este algoritmo es conocido como algoritmo piramidal o de Mallat. Los dos primeros pasos del algoritmo para calcular la descomposición wavelet se muestran en la figura 3.1 y en la figura 3.2 puede observarse un ejemplo de descomposición wavelet de una señal “S”, según [07].

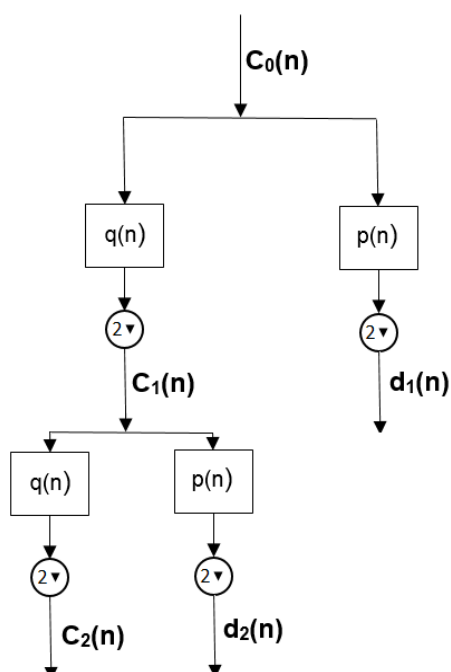


Fig. 3-1 Esquema de descomposición en series Wavelet.

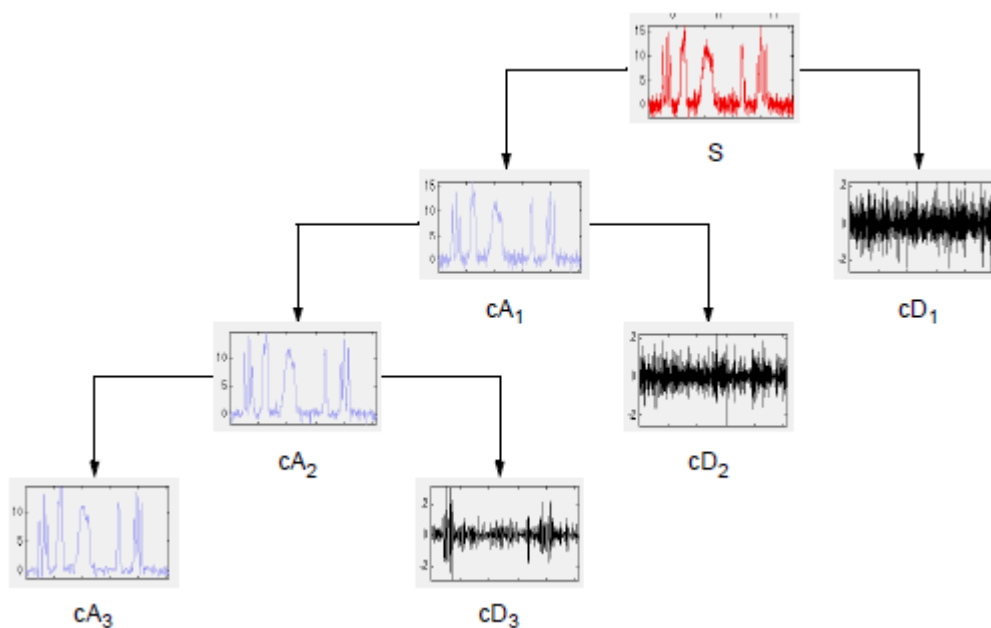


Fig. 3-2 Ejemplo de descomposición de una señal por DWT.

3.3.4 Reconstrucción Wavelet

La secuencia de la señal original $c_0(n)$ puede ser reconstruida a partir de las secuencias de coeficientes de aproximación $c_i(n)$ y de los *coeficientes wavelet* $d_i(n)$ con $0 < i \leq M$, donde $i = M$ es la menor resolución en la descomposición [8].

La aproximación discreta $c_{i-1}(n)$ en el próximo nivel de mayor resolución puede ser obtenida como la suma de dos descomposiciones, una entre la aproximación discreta $c_i(n)$ y el filtro paso-bajo $p(n)$ y otra entre los *coeficientes wavelet* $d_i(n)$ y el filtro paso-alto $q(n)$,

$$C_{i-1}(n) = \langle P_{i-1}, \phi_{i-1,n} \rangle = \sum_k C_i(k) \langle \phi_{i,k}, \phi_{i-1,n} \rangle + \sum_k d_i(k) \langle \psi_{i,k}, \phi_{i-1,n} \rangle = 2^{-1/2} \sum_k C_i(k) p(n-2k) + 2^{-1/2} \sum_k d_i(k) q(n-2k) \quad (3.30)$$

3.3.5 Tipos de familias de transformada wavelet

Vamos a describir las distintas familias de transformada wavelet propuestas por los distintos investigadores, cada una de ella es aplicable a un campo de investigación o puede ser que se use en más de un campo, por lo tanto realizaremos un breve resumen de cada una de ellas [7], con especial atención en la familia DAUBECHIES, ya que es la que más resultados da en el campo del análisis de señales.

3.3.5.1 Haar

La familia Haar es la primera en ser desarrollada y la más simple de todas, es una función discontinua y se asemeja a una función escalonada como se muestra en la figura para una función Ψ .

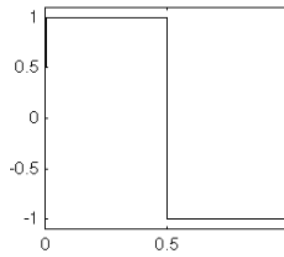


Fig. 3-3 Wavelet Haar para la función psi

3.3.5.2 Daubechies

Esta familia de wavelet fue desarrollada por Ingrid Daubechies, Ingrid es una de las investigadoras más brillantes en el mundo de las wavelet, desarrolló las llamadas ondas ortonormales apoyados compacta, por lo que se hace posible el análisis wavelet discreto.

Para la realización de la descomposición por db1 se recurre a la siguiente ecuación:

$$P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k \quad (3.31)$$

Donde C_k^{N-1+k} denota los coeficientes binominales.

$$|m_0(\omega)|^2 = \left(\cos^2 \frac{\omega}{2} \right)^N P \left(\sin^2 \frac{\omega}{2} \right) \quad (3.32)$$

donde:

$$m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-ik\omega}$$

La forma de identificar la mencionada familia es con dbN, donde N es el orden o detalle que queremos. La wavelet db1, es exactamente igual a la Haar anteriormente mencionada. A continuación podemos ver algunos ejemplos de esta familia aplicada a la función Ψ .

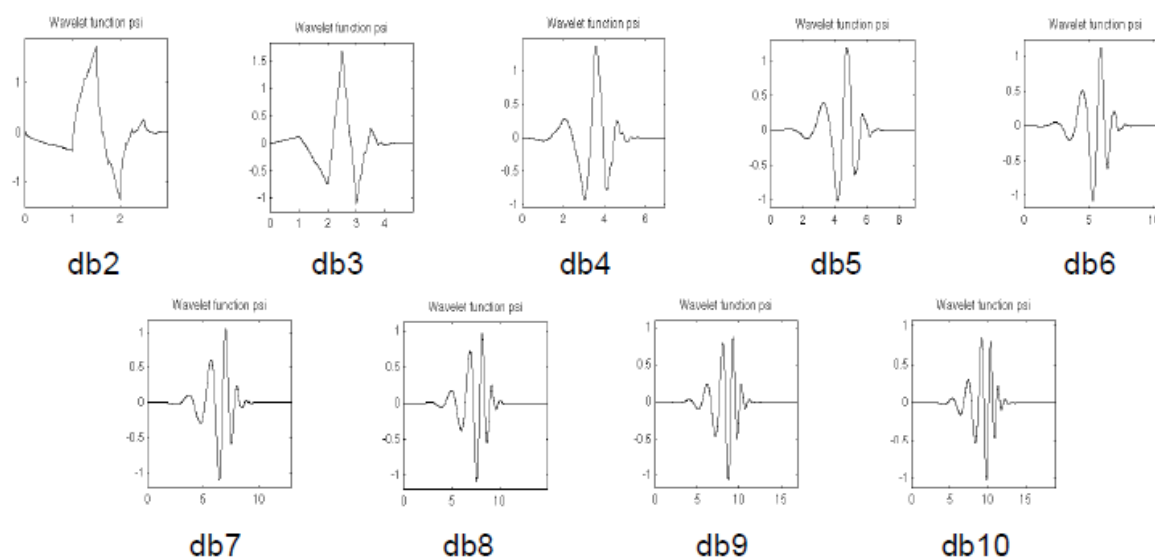


Fig. 3-4 Wavelets Daubechies para la función ψ .

3.3.5.2.1 Daubechies para MATLAB

La plataforma de simulación MATLAB nos da dos opciones para el análisis por wavelet Daubechies: la primera es a través un menú interactivo y la segunda es conociendo los comandos necesarios para hacer un análisis por comando, vamos a explicar ambas formas, aunque para el trabajo actual utilizaremos la segunda forma, ya que se pueden obtener más datos.

Para la primera forma de análisis podemos seguir los siguientes pasos:

1. Una vez iniciado el programa MATLAB, escribimos en la línea de comandos “wavemenu”, y nos aparece el siguiente menú:

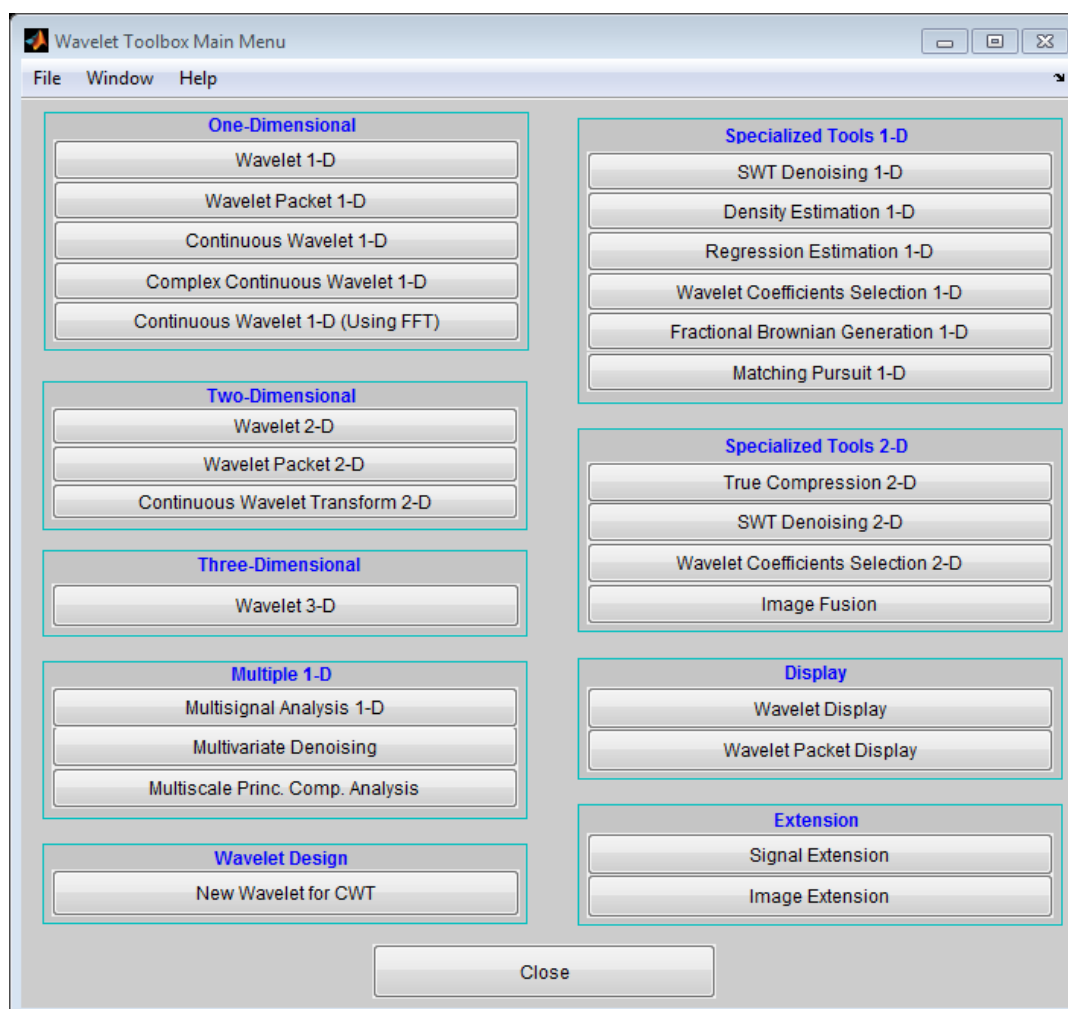


Fig. 3-5 Menú wavelet MATLAB.

2. En nuestro ejemplo vamos a hacer un análisis de una dimensión, seleccionamos “Wavete 1-D”.
3. Abrimos la señal a analizar.
4. Elegimos el tipo de familia con la que queremos analizar la señal, y el nivel de detalle que queremos, en nuestro ejemplo es por Daubechies (db1).
5. Una vez presionamos el botón “Analyze” obtenemos los siguientes resultados, donde podemos ver la señal descompuesta en 5 detalles y la aproximación de la señal.

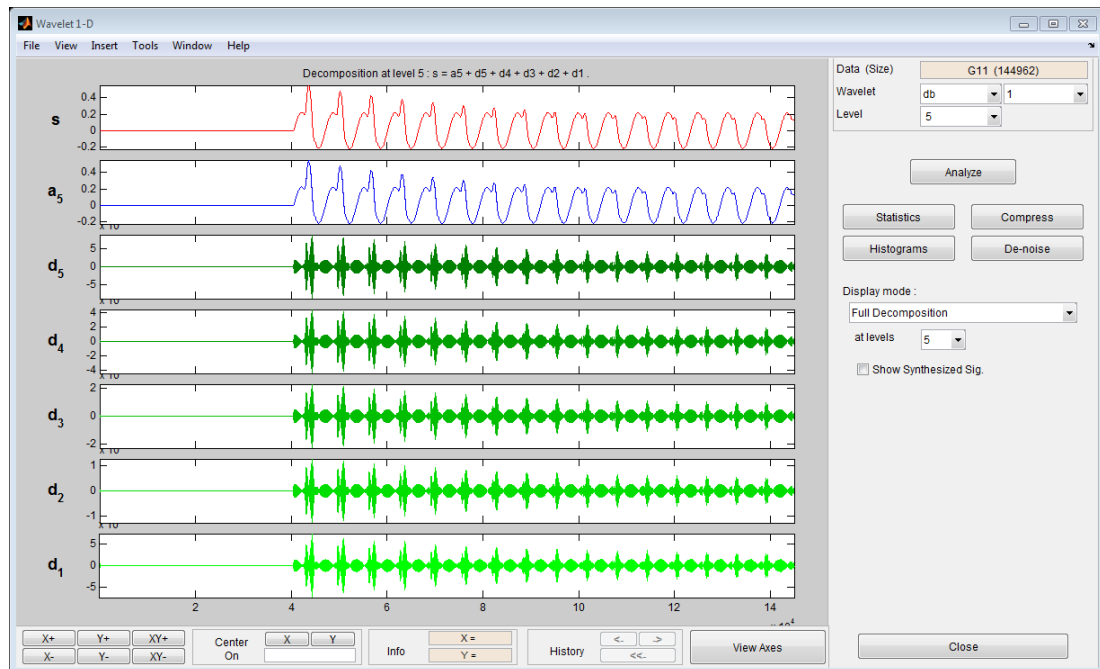


Fig. 3-6 Descomposición de una señal mediante Daubechies (por menú).

Para la segunda forma de análisis podemos seguir los siguientes pasos:

1. Lo primero que tenemos que hacer es llamar a la señal que queremos analizar:

```
s = load(filename, '-mat')
```

2. Contamos cuantos datos tiene la señal:

```
l_s = length(s)
```

3. Obtenemos los datos de detalle para el análisis de una dimensión (dwt) e indicamos qué Daubechies utilizar, en este caso db1 :

```
[cA1, cD1] = dwt(s, 'db1')
```

4. Descomponemos los datos anteriores para obtener la aproximación y el detalle que nos interese (upcoef), donde 'a' le indicamos que queremos la aproximación y 'b' indicamos que queremos detalle, luego indicamos de dónde saca los datos (ya debe estar indicado en el paso anterior), qué Daubechies

utilizar, nivel de detalle o aproximación necesarios y la longitud del “array” a analizar:

```
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s)
```

```
D1 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s)
```

5. Una vez obtenidos los datos necesarios, ya podemos visualizarlos o trabajar con ellos para obtener un algoritmo, en este caso vamos a visualizar los datos obtenidos:

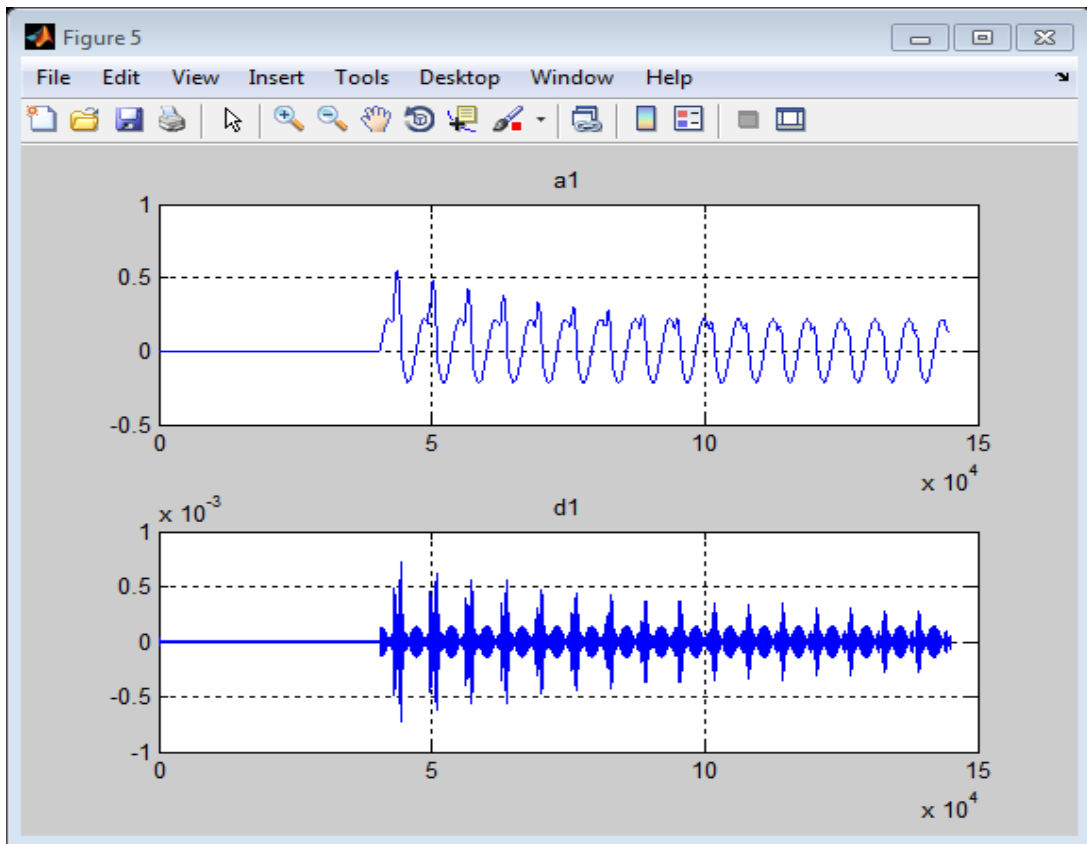


Fig. 3-7 Descomposición de una señal mediante Daubechies (por comando).

El procedimiento utilizado anteriormente es para la obtención del detalle y aproximación primera, en caso de querer más del primer detalle se realiza lo anterior y seguidamente se llevan a cabo los siguientes comandos.

```
[C,L] = wavedec(s,5,'db1')
```

```
A5 = wrcoef('a',C,L,'db1',5)
```

```
D1 = wrcoef('d',C,L,'db1',1)
```

```
D2 = wrcoef('d',C,L,'db1',2)
```

```
D3 = wrcoef('d',C,L,'db1',3)
```

```
D4 = wrcoef('d',C,L,'db1',4)
```

```
D5 = wrcoef('d',C,L,'db1',5)
```

En este ejemplo se quiere llegar hasta el detalle 5, por lo tanto si queremos otro detalle no hay más que cambiar en “wavedec” el número 5 por el que nos interese, y procedemos a visualizar los datos que nos interesen.

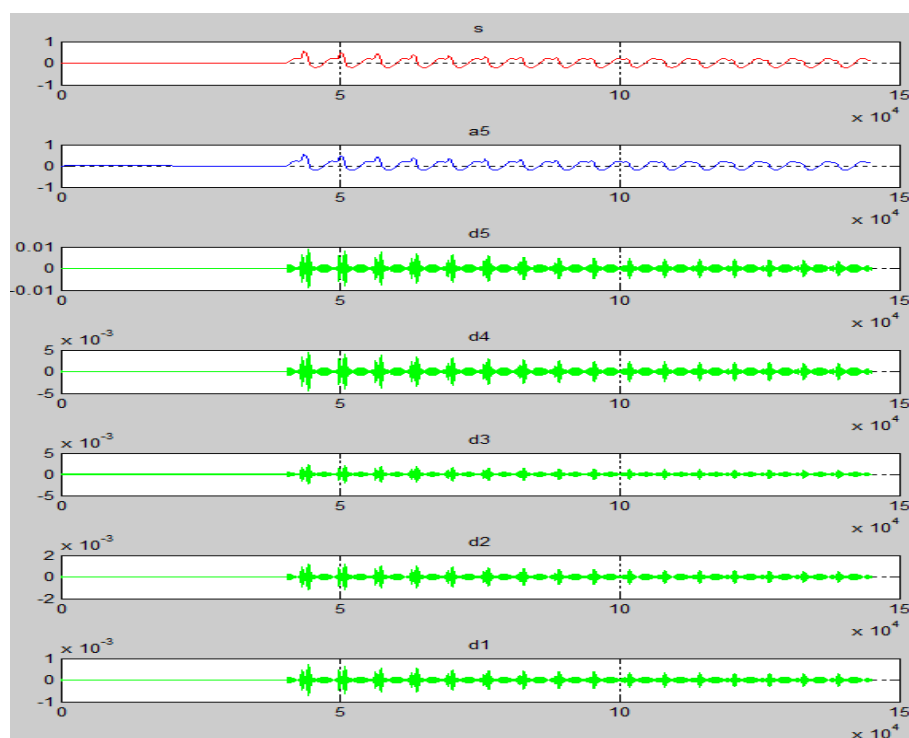


Fig. 3-8 Segunda descomposición de una señal mediante Daubechies (por comando).

3.3.5.3 Biorthogonal

La actual familia utiliza una característica de fase lineal; la descomposición por wavelets Biorthogonal es muy útil principalmente para el análisis de fotografías, ya que utiliza dos wavelets, una para la descomposición y otra para la reconstrucción de las imágenes, con el fin de obtener una imagen de mayor calidad. Aunque hemos indicado que principalmente esta familia es útil para imágenes también se puede utilizar para señales como se observa en la siguiente figura.

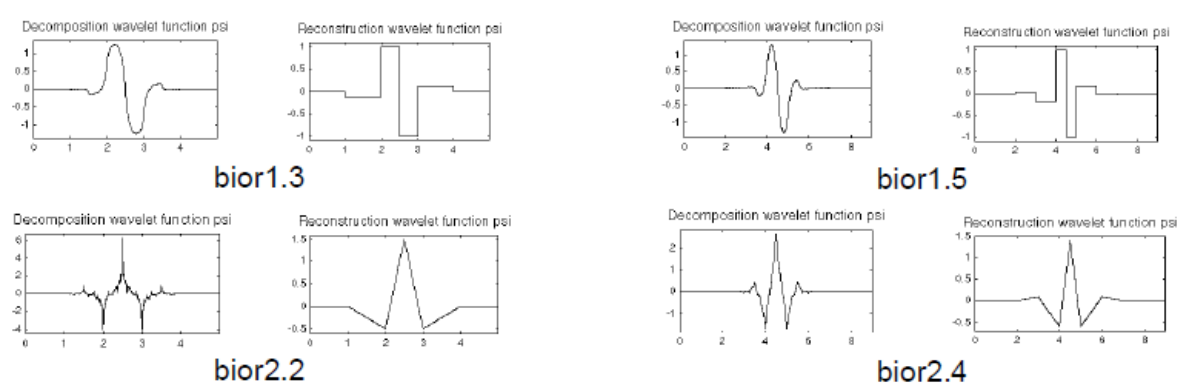


Fig. 3-9 Wavelets Biorthogonal para la función ψ .

3.3.5.4 Coiflets

La familia Coiflets ha sido desarrollada como la familia Daubechies por Ingrid Daubechies a petición de R. Coifman. Esta función wavelet consta de $2N$ momentos iguales a cero y la función de escala es igual a $2N-1$.

A continuación se ve la descomposición de la función Ψ (ψ), con este tipo de familia.

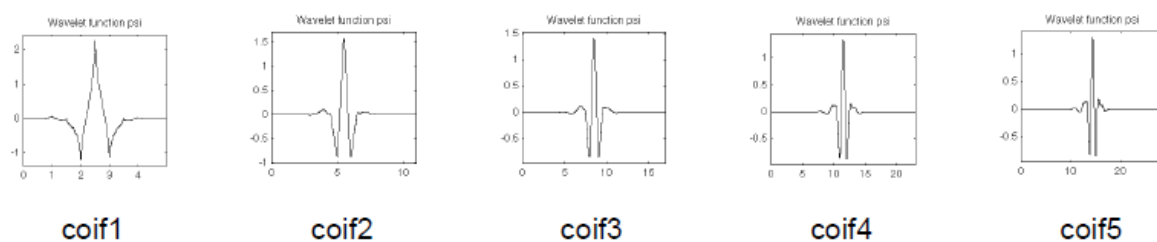


Fig. 3-10 Wavelets Coiflets para la función ψ .

3.3.5.5 Symlets

Las Wavelets Symlets son ondas casi simétricas propuestas por Daubechies como modificaciones a la familia db. Las propiedades de las dos familias de wavelets son similares.

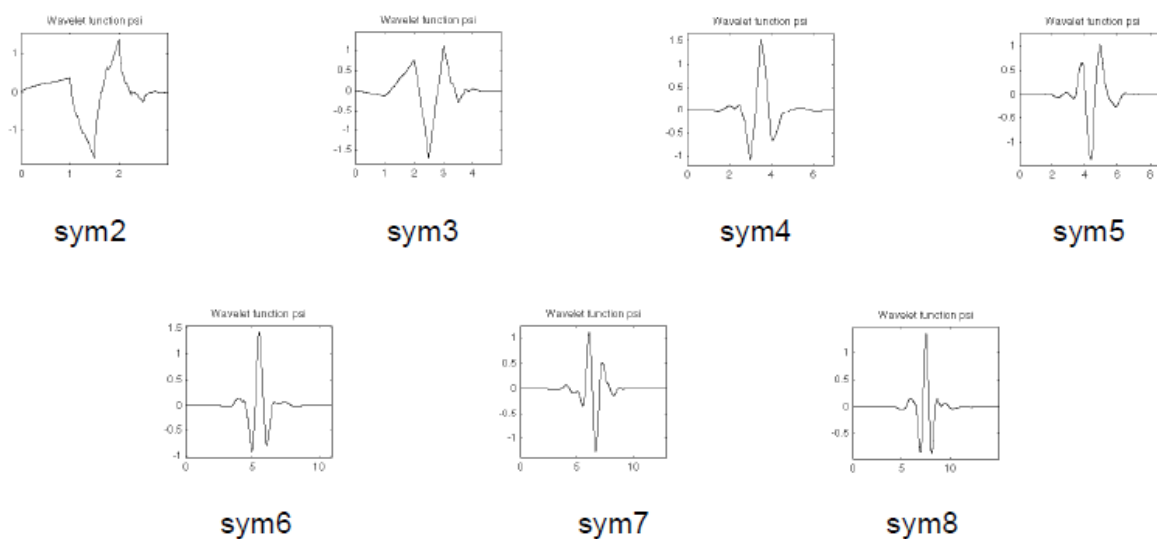


Fig. 3-11 Wavelets Symlets para la función ψ .

MODELADO DEL RELÉ

CAPÍTULO 4. MODELADO DEL RELÉ

4.1	Análisis de la corriente diferencial	82
4.1.1	Falta interna en el lado del primario	83
4.1.1.1	Cortocircuito fase - tierra	83
4.1.1.2	Cortocircuito fase – fase.....	86
4.1.1.3	Cortocircuito fase – fase – tierra.....	88
4.1.2	Falta interna en el lado del secundario	89
4.1.2.1	Cortocircuito fase – tierra	90
4.1.2.2	Cortocircuito fase – fase.....	92
4.1.2.3	Cortocircuito fase – fase – tierra.....	94
4.1.3	Corriente de conexión.....	96
4.1.4	Falta externa en el lado del primario	98
4.1.4.1	Cortocircuito fase – tierra	99
4.1.4.2	Cortocircuito fase – fase.....	101
4.1.4.3	Cortocircuito fase – fase – tierra.....	103
4.1.5	Falta externa en el lado del secundario	105
4.1.5.1	Cortocircuito fase – tierra	105
4.1.5.2	Cortocircuito fase – fase.....	107
4.1.5.3	Cortocircuito fase – fase – tierra.....	109
4.2	Análisis de la corriente diferencial mediante la transformada wavelet.....	111
4.2.1	Falta interna en el lado del primario	112
4.2.2	Falta interna en el lado del secundario	113

4.2.3	Falta externa en el lado del primario	114
4.2.4	Falta externa en el lado del secundario	115
4.2.5	Corriente de conexión	116
4.2.6	Conclusiones	116
4.3	Elección del detalle más idóneo para el análisis	117
4.3.1	Falta interna en el lado del primario	117
4.3.2	Falta interna en el lado del secundario	118
4.3.3	Falta externa en el lado del primario	118
4.3.4	Falta externa en el lado del secundario	119
4.3.5	Corriente de conexión	119
4.3.6	Conclusiones	120
4.4	Modelos realizados	120
4.4.1	Primer modelo	120
4.4.2	Segundo modelo	126
4.4.3	Tercer modelo	133
4.5	Modelo propuesto	136
4.6	Bloque MATLAB-SIMULINK realizado	141
4.6.1	Simulación y verificación del relé	146
4.6.1.1	Transformador 1	146
4.6.1.1.1	Energización	147
4.6.1.1.2	Falta externa	149
4.6.1.1.3	Falta interna	150
4.6.1.1.4	Verificación del relé en diferentes casos	154
4.6.1.2	Transformador 2	156

4.6.1.2.1	Energización	157
4.6.1.2.2	Falta externa	158
4.6.1.2.3	Falta interna	160
4.6.1.2.4	Verificación del relé en diferentes casos.....	164
4.6.1.2.5	Transformador 3.....	166
4.7	Conclusiones.....	167

4.1 Análisis de la corriente diferencial

En el presente capítulo se procederá al análisis del comportamiento de la corriente diferencial de un transformador de potencia en diferentes casos que se puedan dar en una instalación del sistema eléctrico de potencia. Para ello se realizará la simulación mediante el programa computacional SIMULINK para faltas internas, externas y de corriente de conexión con el objetivo de ver el comportamiento de esta corriente diferencial en las diversas situaciones.

El esquema que se ha procedido a simular es el indicado en la figura 4.1, el cual consta, en primer lugar, de un generador con una tensión de 2,4 kV y una frecuencia de 50 Hz, seguido de una resistencia e inductancias de línea. A continuación, se encuentran los transformadores de medida de intensidad para las tres fases del primario del transformador. En el centro se encuentra el transformador, con una potencia de 225 kVA y tensiones de 2400/600 V. En el lado del secundario se tienen los transformadores de medida de intensidad y una carga de 45 kW, por tanto, el transformador está funcionando a un 20% de su capacidad.

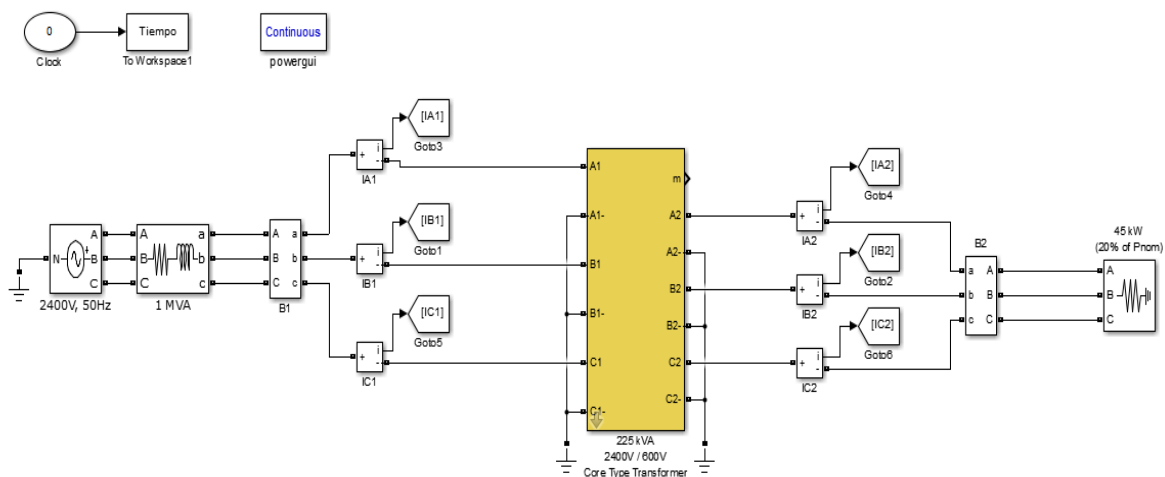


Fig. 4-1 Esquema del sistema de potencia a simular.

4.1.1 Falta interna en el lado del primario

Para simular una falta interna en el lado del primario se utilizará el esquema mostrado en la figura 4.1 y se colocará un bloque simulink, el cuál simulará el tipo de falta que le indicaremos y en qué instante se producirá tal falta, que quedará como aparece en la figura 4.2.

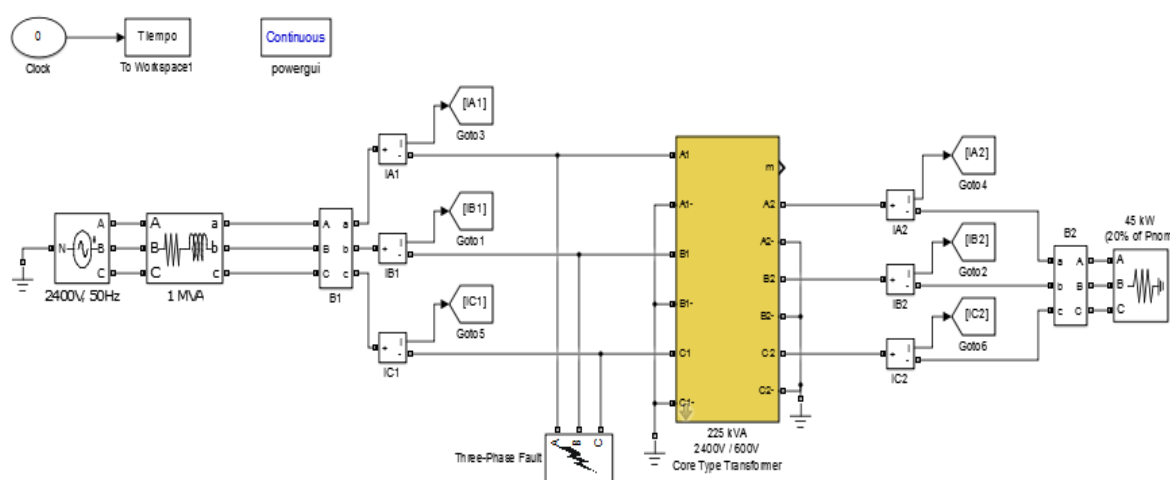


Fig. 4-2 Esquema para simular una falta interna lado primario.

A continuación se procederá a simular todas las posibles faltas que puedan ocurrir y ver las intensidades de entrada y salida del transformador.

4.1.1.1 Cortocircuito fase - tierra

El cortocircuito que se simula es realizado en la fase A con tierra. No se indican los realizados de fase B y C, ya que el resultado es aproximado.

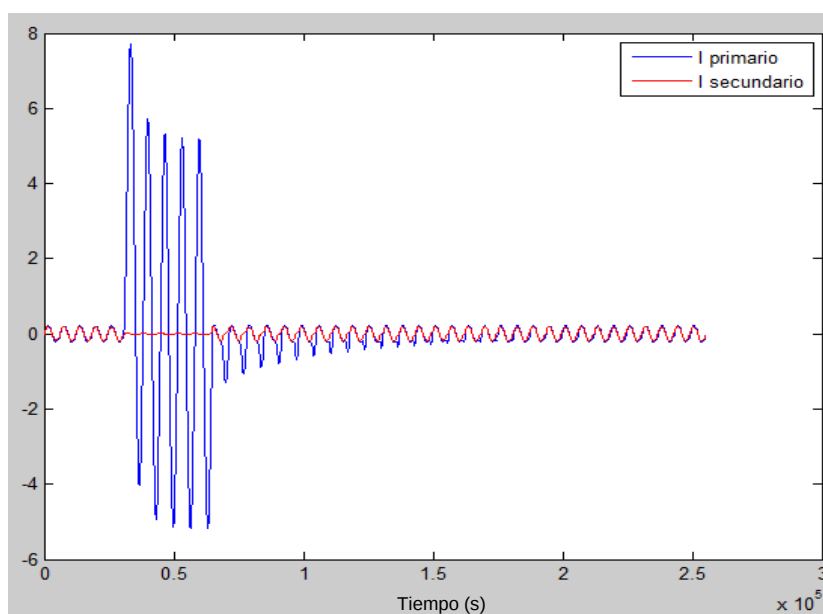


Fig. 4-3 Intensity primary vs intensity secondary for phase A.

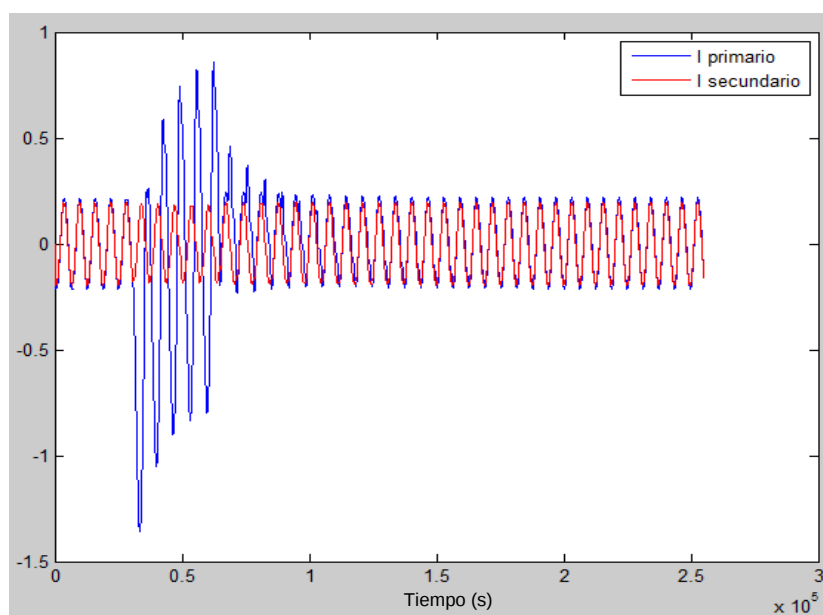


Fig. 4-4 Intensity primary vs intensity secondary for phase B.

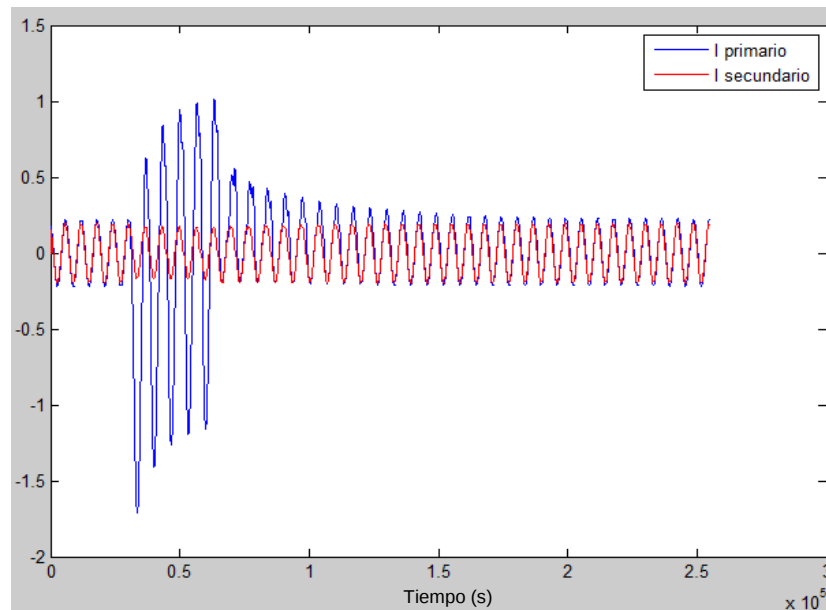


Fig. 4-5 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

De las figuras anteriores se puede ver que la intensidad del primario por la fase A es mucho mayor que la que pasa por las otras dos fases en la que no se ha producido el cortocircuito. Como es lógico, la intensidad que se mide en el secundario de la fase A es prácticamente cero, ya que toda la intensidad de esa fase se deriva a tierra. En la fase B y C la intensidad por el primario es mayor a la del secundario ya que se requiere una corriente adicional para contrarrestar el campo magnético necesario para que el transformador pueda funcionar.

Una vez se elimina la falta, la intensidad por el secundario vuelve a su valor inicial antes que la intensidad que se inyecta en el primario, ya que se necesita una intensidad adicional para magnetizar el núcleo del transformador nuevamente. Esto crea una intensidad no sinusoidal y se observan los pequeños ruidos en la señal.

4.1.1.2 Cortocircuito fase – fase

El cortocircuito que se simula es realizado entre la fase A y la fase B. No se indican las restantes combinaciones, ya que el resultado es aproximado.

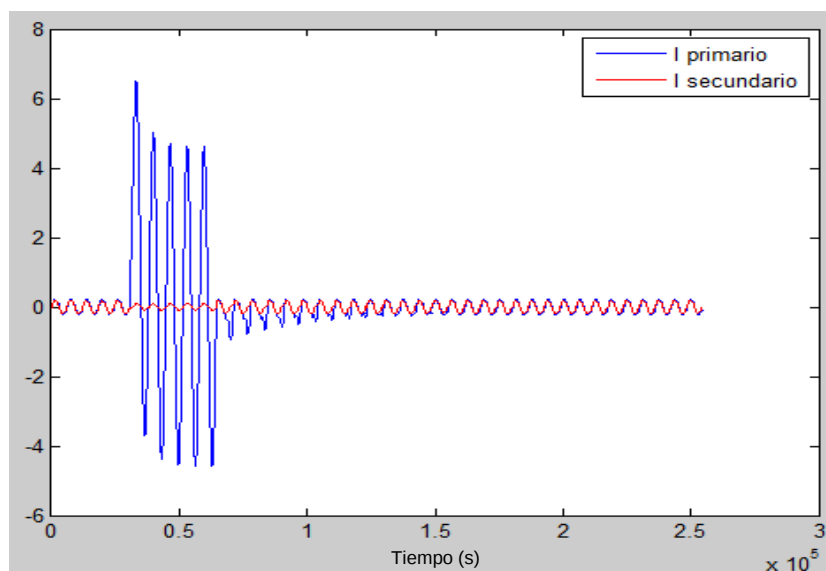


Fig. 4-6 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

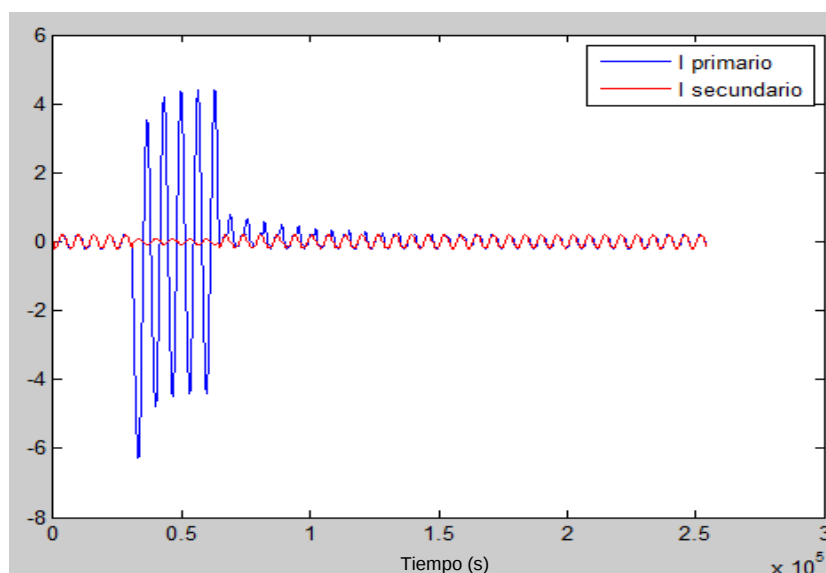


Fig. 4-7 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

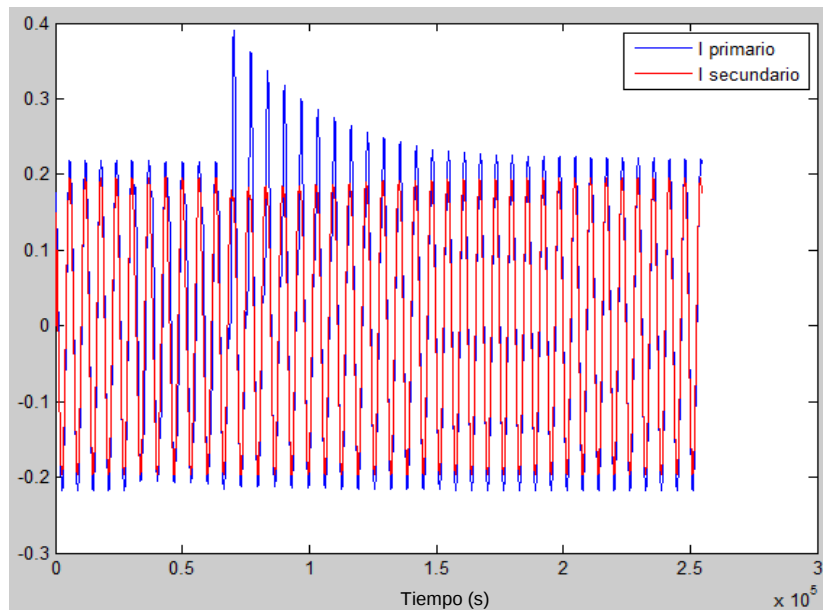


Fig. 4-8 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

Al realizarse el cortocircuito entre la fase A y B, se observa como estas dos se comportan de forma similar, aunque la intensidad primaria de la fase A es mayor que la de la fase B. Esto es debido al instante en el que se encuentra la intensidad en el momento que se produce el cortocircuito.

Respecto a la fase C no se produce gran cambio entre la intensidad del primario y la del secundario durante la falta, pero si se produce un aumento en la intensidad del primario cuando desaparece el cortocircuito. Esto es debido, como se ha indicado anteriormente, a la intensidad suplementaria para crear el campo magnético del transformador.

En el caso en el que el cortocircuito producido sea trifásico, las tres fases se comportan de igual forma a las fases afectadas en este caso, con la excepción de que la intensidad por el secundario durante la falta es cero. Esto se debe a que no hay ninguna fase sana que pueda inducir un campo magnético en las bobinas afectadas del transformador.

4.1.1.3 Cortocircuito fase – fase – tierra

Al igual que los anteriores casos, se simulará el cortocircuito entre las fases A y B y tierra, ya que las restantes secuencias son similares.

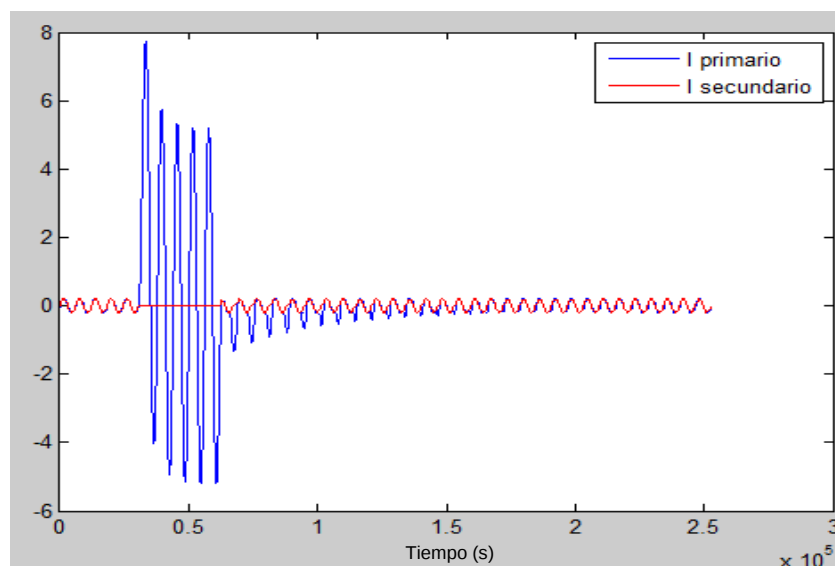


Fig. 4-9 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

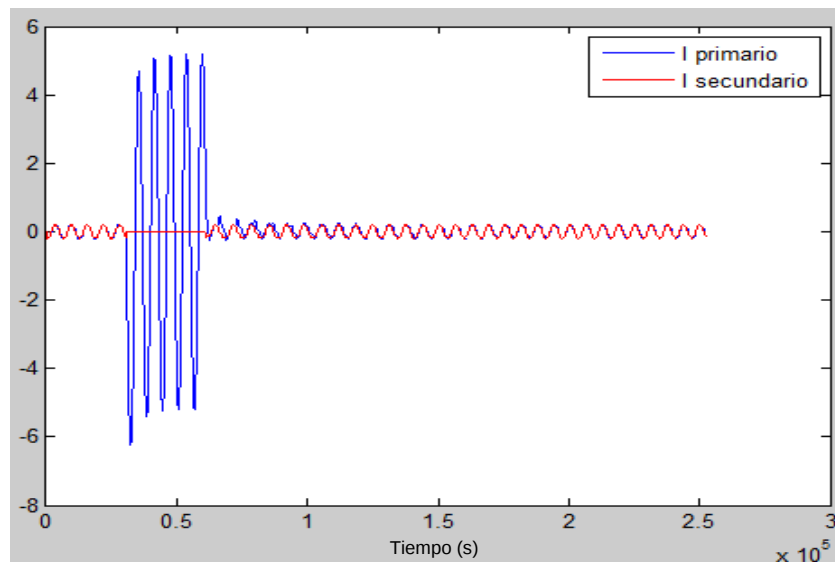


Fig. 4-10 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

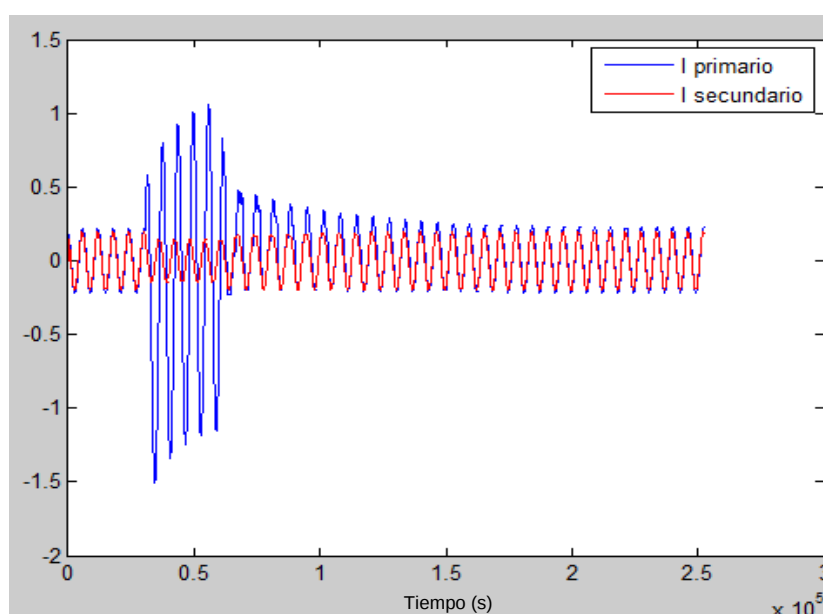


Fig. 4-11 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

Se puede ver que las fases afectadas se comportan como una falta bifásica sin estar conectadas a tierra, en cambio, la fase C, la cual no tiene producida ninguna falta, varía su intensidad. Este efecto es debido al desplazamiento del neutro al tener un cortocircuito desequilibrado y tener tierra, por lo que aparecen las corrientes homopolares.

4.1.2 Falta interna en el lado del secundario

Para simular una falta interna en el lado del secundario se utilizará el esquema mostrado en la figura 4.1 y se colocará un bloque simulink, el cuál simulará el tipo de falta que le indicaremos y el tiempo de inicio y fin del cortocircuito, el cual quedará como aparece en la figura 4.12.

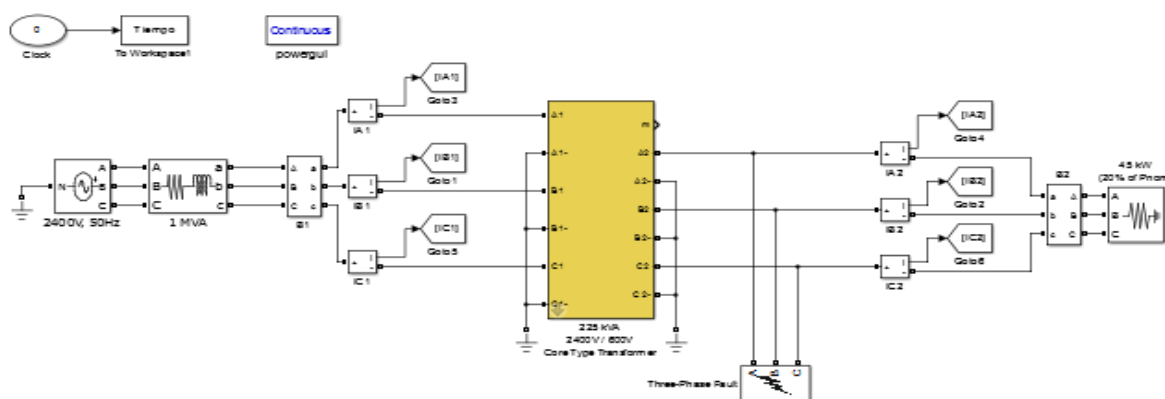


Fig. 4-12 Esquema para simular una falta interna lado secundario.

A continuación se procederá a simular todas las posibles faltas que puedan ocurrir y ver las intensidades de entrada y salida del transformador.

4.1.2.1 Cortocircuito fase – tierra

En este caso se procederá a simular un cortocircuito fase – tierra producido en la fase A, y se observará el comportamiento de las intensidades de entrada y salida del transformado a proteger.

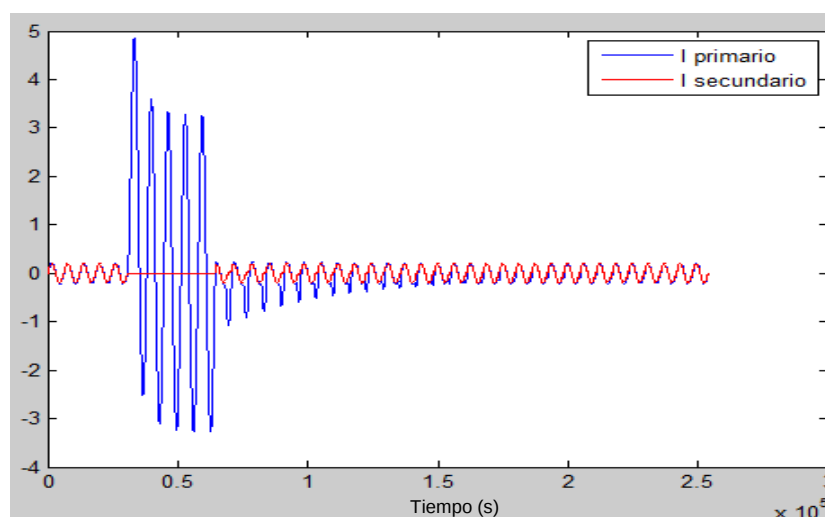


Fig. 4-13 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

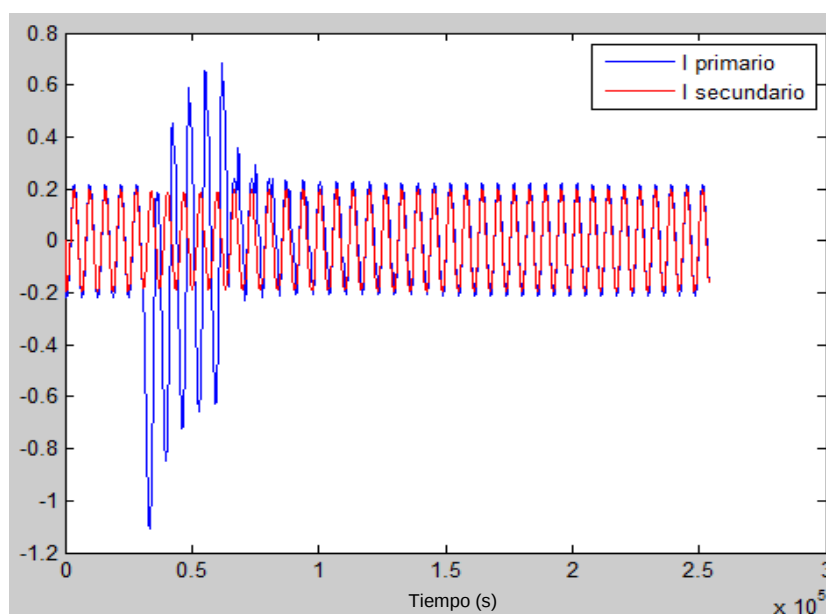


Fig. 4-14 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

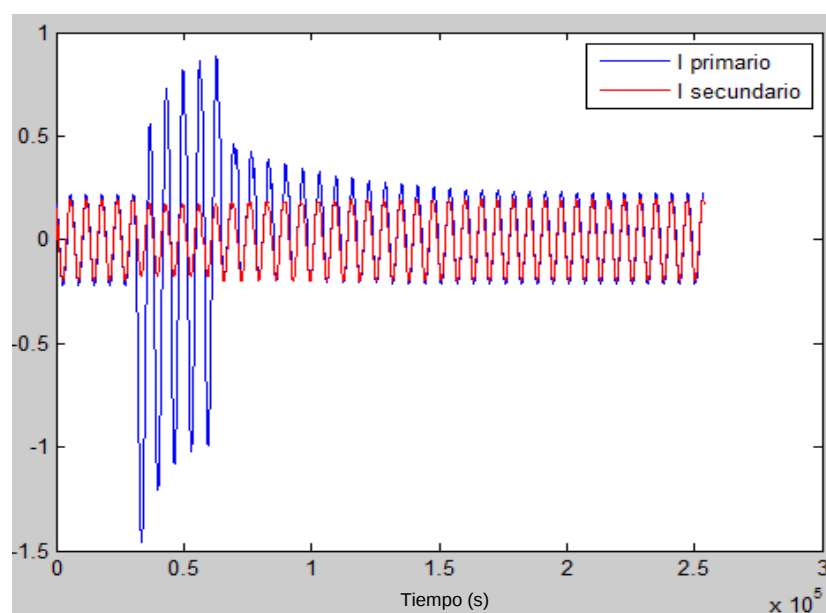


Fig. 4-15 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

Se pueden comparar estos resultados con los expuestos en la falta que se produce en el primario, y se puede observar que la diferencia que existe entre ellas únicamente se aprecia en la fase donde ocurre la falta, ya que en la falta que se ocasiona en el primario, la intensidad en el secundario no llega a ser cero, y en la falta que ocurre en el secundario sí que es cero. Esto se debe a que si la falta es en el primario las dos fases sanas del transformador inducen un campo magnético y una intensidad en la fase no sana, sin embargo, si el cortocircuito ocurre en el secundario toda la intensidad se deriva a tierra y no existe intensidad en el secundario.

Este efecto es muy importante, ya que si se evalúa la intensidad diferencial se obtiene una diferencia notable a la hora de producirse el cortocircuito en el primario o en el secundario.

4.1.2.2 Cortocircuito fase – fase

A continuación se presentarán los resultados obtenidos de la simulación de un cortocircuito bifásico producido en el secundario del transformador de potencia. Una vez evaluadas las señales resultantes, se puede afirmar que el comportamiento de estas es aproximadamente igual al producido si el cortocircuito se produce en el primario.

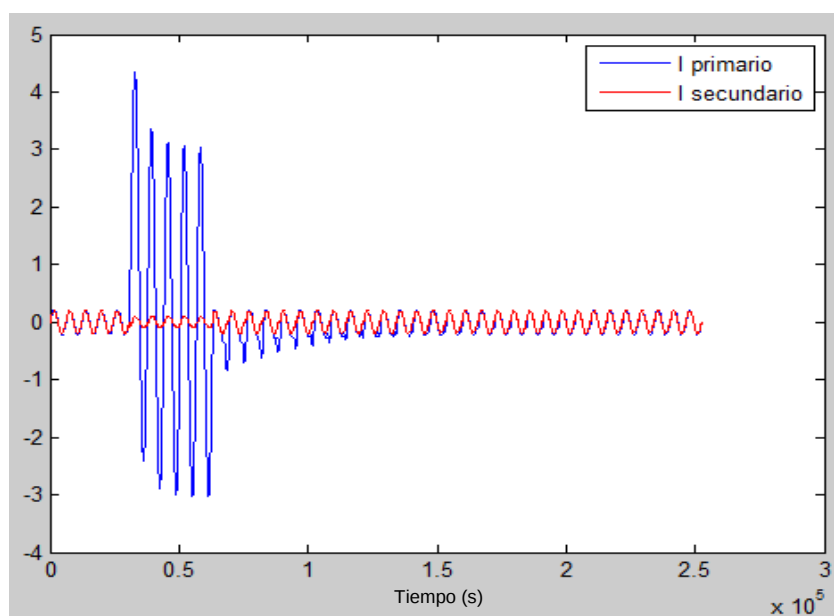


Fig. 4-16 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

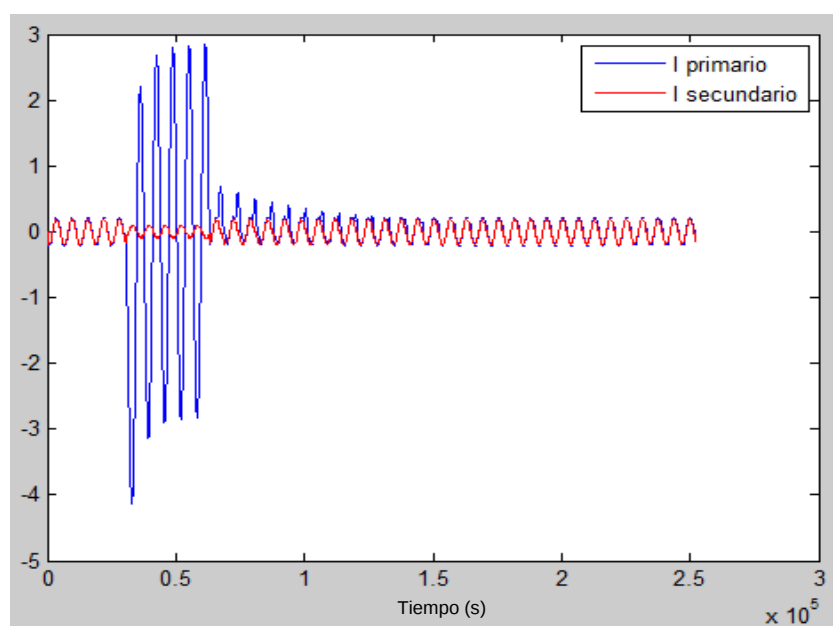


Fig. 4-17 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

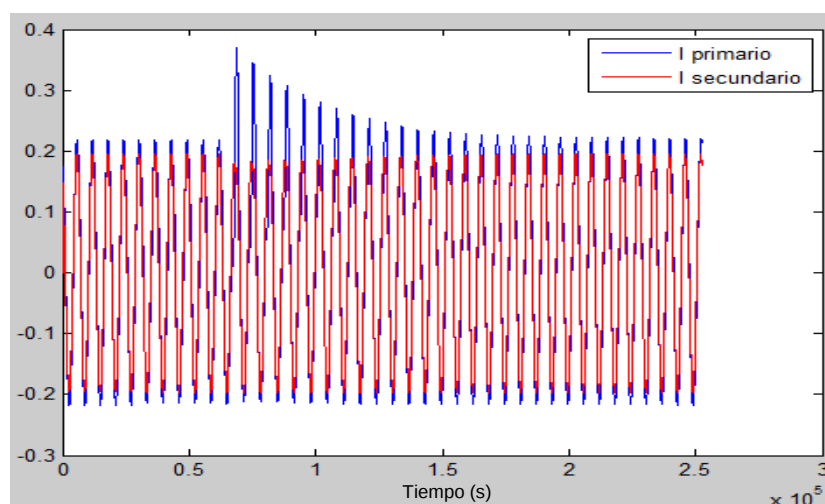


Fig. 4-18 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

4.1.2.3 Cortocircuito fase – fase – tierra

Como ocurre en el apartado anterior, esta falta producida en el secundario nos arroja, aproximadamente, los mismos resultados que la misma falta producida en el primario, con la excepción de que la intensidad primaria en este caso es menor que la se produce cuando la falta ocurre en el lado del primario.

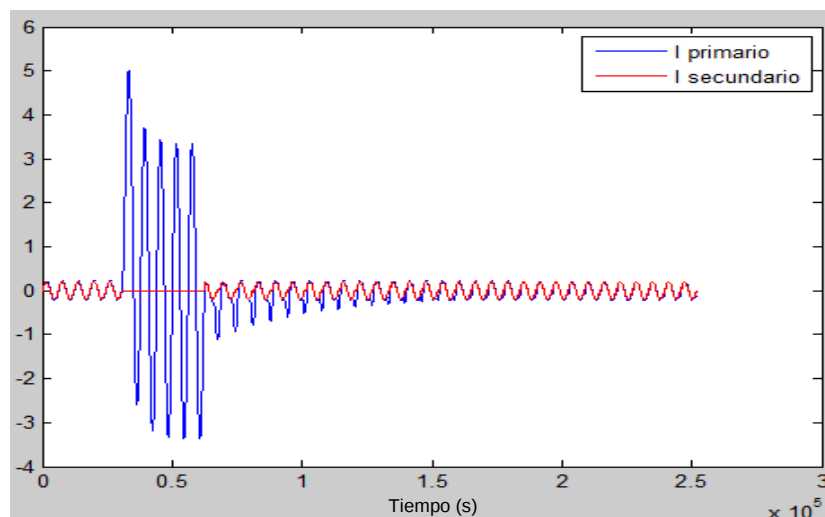


Fig. 4-19 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

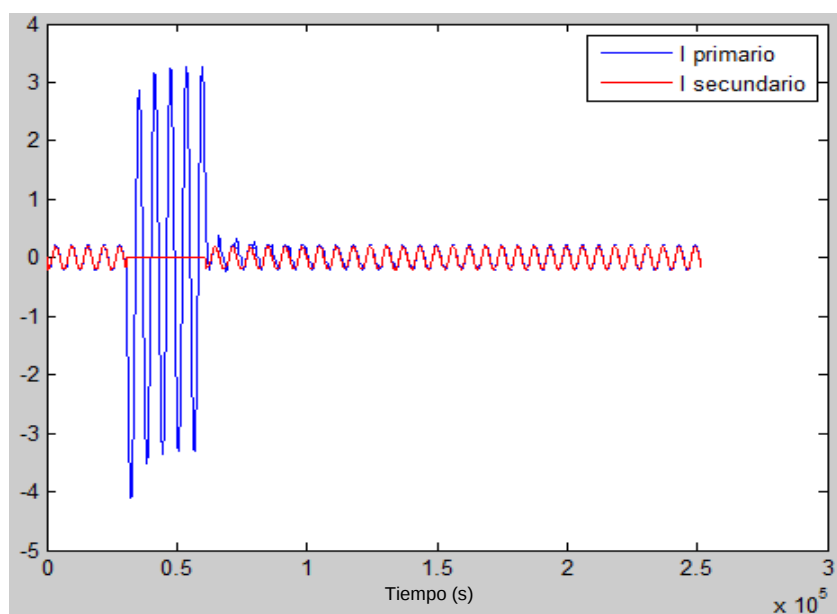


Fig. 4-20 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

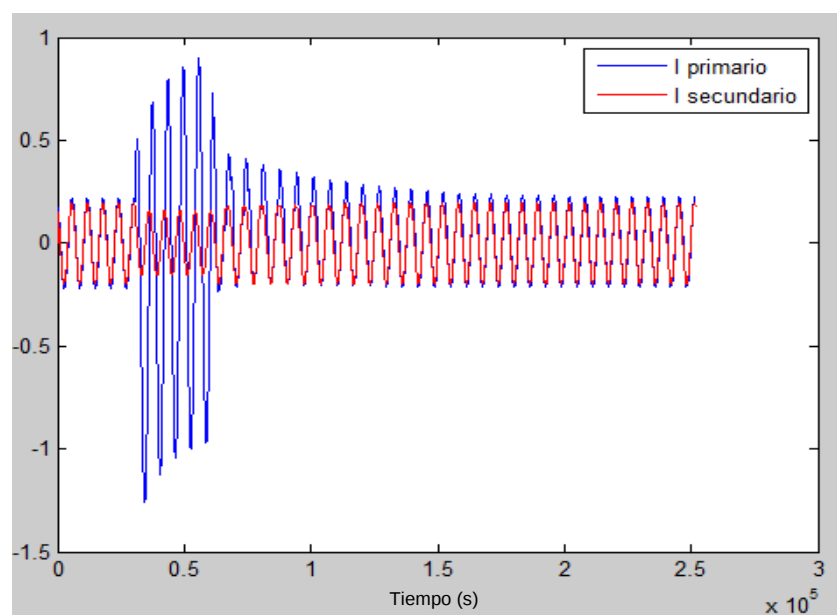


Fig. 4-21 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

4.1.3 Corriente de conexión

En el actual apartado se simulará la conexión de un transformador de potencia, por tanto, se procederá a obtener el comportamiento de la intensidad en cada una de las fases. Para ello se partirá del siguiente esquema para simular la conexión de un transformador de potencia.

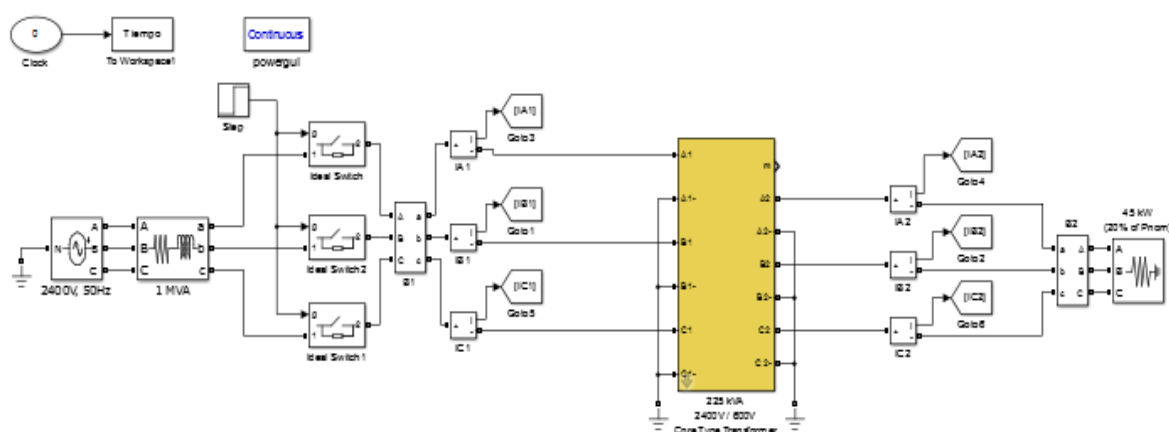


Fig. 4-22 Esquema para simular una corriente de conexión.

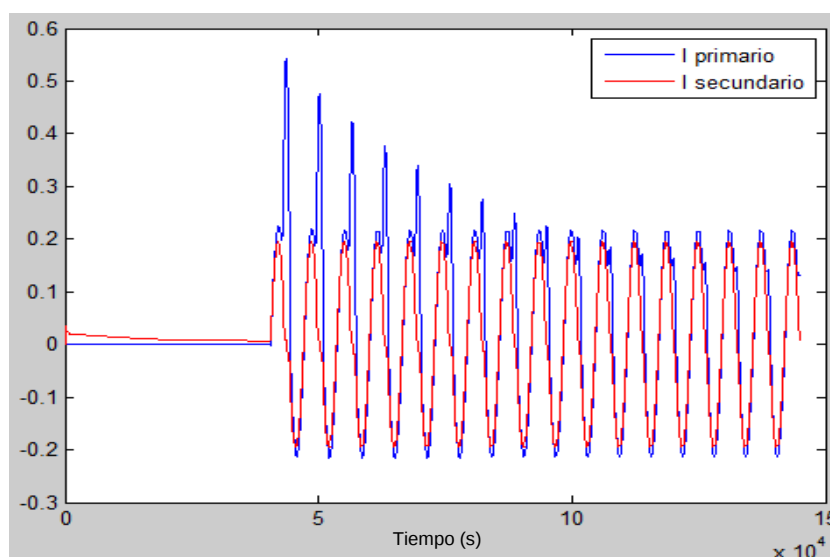


Fig. 4-23 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

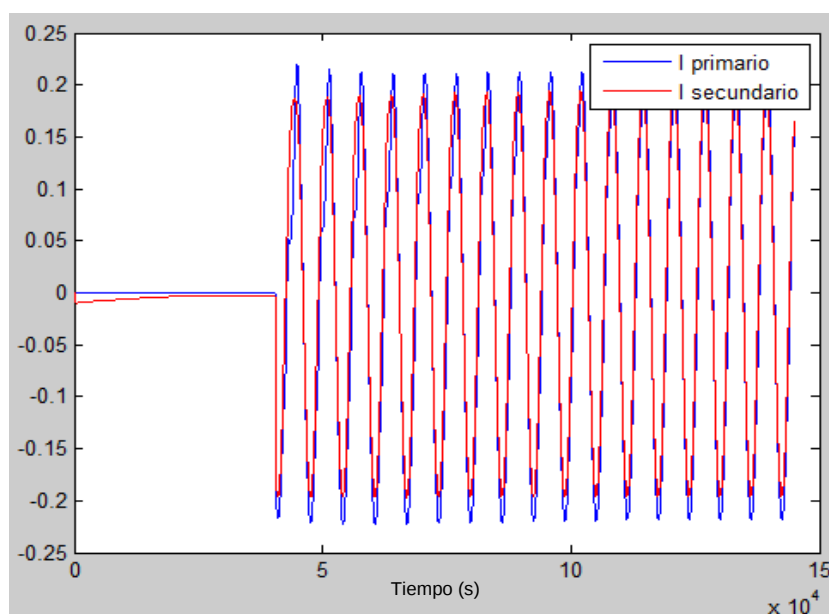


Fig. 4-24 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

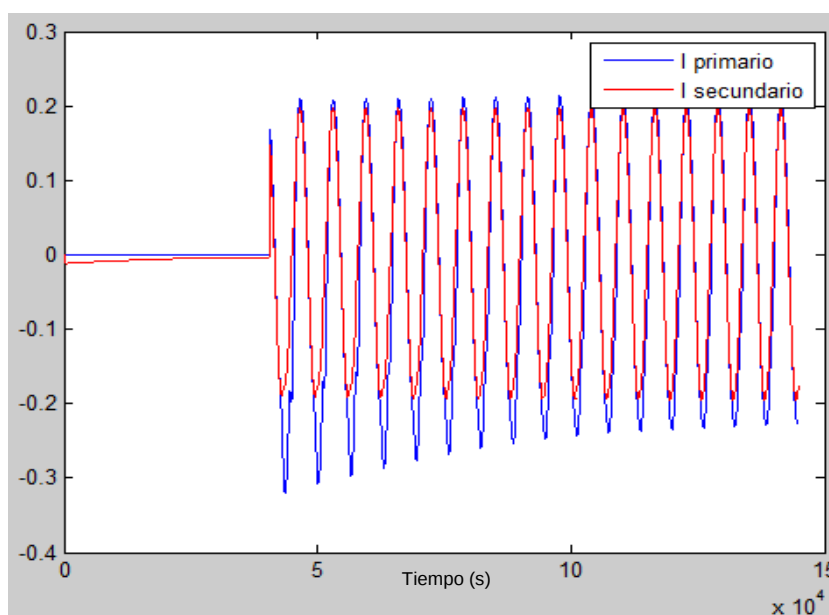


Fig. 4-25 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

Evaluando las tres figuras anteriores se puede ver como la intensidad en el primario es mayor a la producida en el secundario en las tres fases. Esto es debido a que el transformador necesita una intensidad adicional para magnetizar el núcleo del transformador, por lo que la intensidad adicional se invierte en este efecto. Una vez pasado un tiempo, las intensidades vuelven a su estado de funcionamiento normal.

Si se evalúa la intensidad diferencial en el tiempo que sucede tal efecto, se puede concluir que hay una falta interna, ya que se tiene más intensidad de entrada que de salida, por lo que se debe detectar en cada momento si la intensidad diferencial obtenida es una falta interna o una corriente de conexión.

Por otra parte, se observa que la intensidad por las tres fases no se comporta de igual forma, ya que esto depende del ángulo que tenga la tensión en el momento de la conexión. En este caso, el máximo ángulo de la tensión lo tiene la fase A, por lo que se puede observar una intensidad máxima muy por encima de las otras dos fases.

4.1.4 Falta externa en el lado del primario

Para simular una falta externa en el lado del primario se utilizará el esquema mostrado en la figura 4.1 y se colocará un bloque simulink, el cuál simulará el tipo de falta que se le indique y el tiempo de inicio y fin de la falta, el cual quedará como aparece en la figura 4.25.

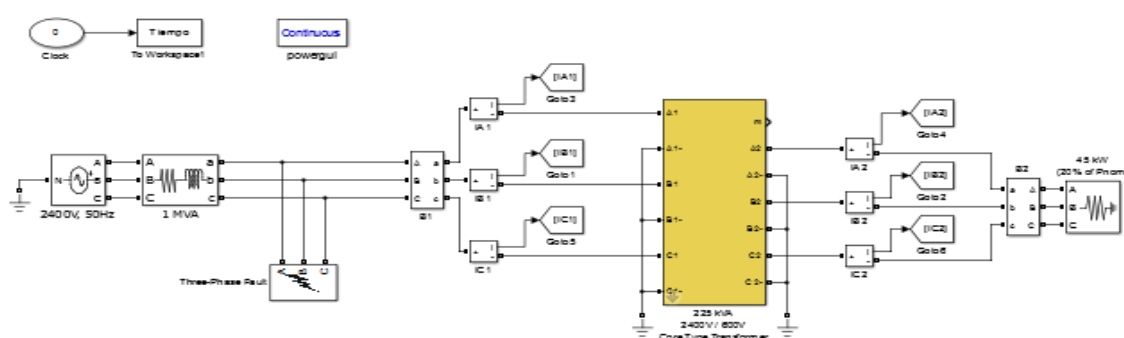


Fig. 4-26 Esquema para simular una falta externa lado primario.

A continuación se procederá a simular todas las posibles faltas que puedan ocurrir y ver las intensidades de entrada y salida del transformador.

4.1.4.1 Cortocircuito fase – tierra

En el actual apartado, como en los apartados anteriores, se visualizará el comportamiento de las intensidades primaria y secundaria de las tres fases del transformador de potencia. Para ello se simulará un cortocircuito fase A – tierra, no se repite la simulación con las restantes fases ya que el resultado es el mismo, solamente que lo que sucede, en este caso, en la fase A, ocurrirá en la fase cortocircuitada.

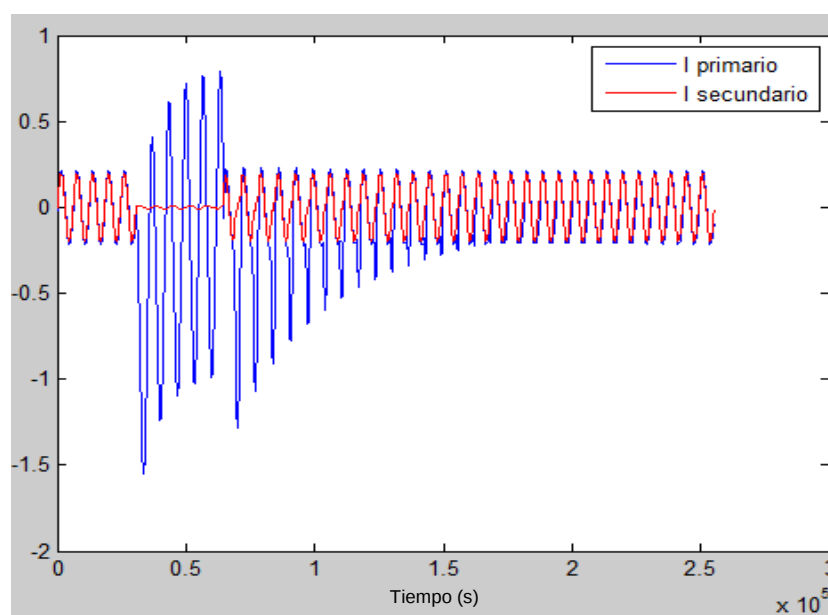


Fig. 4-27 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

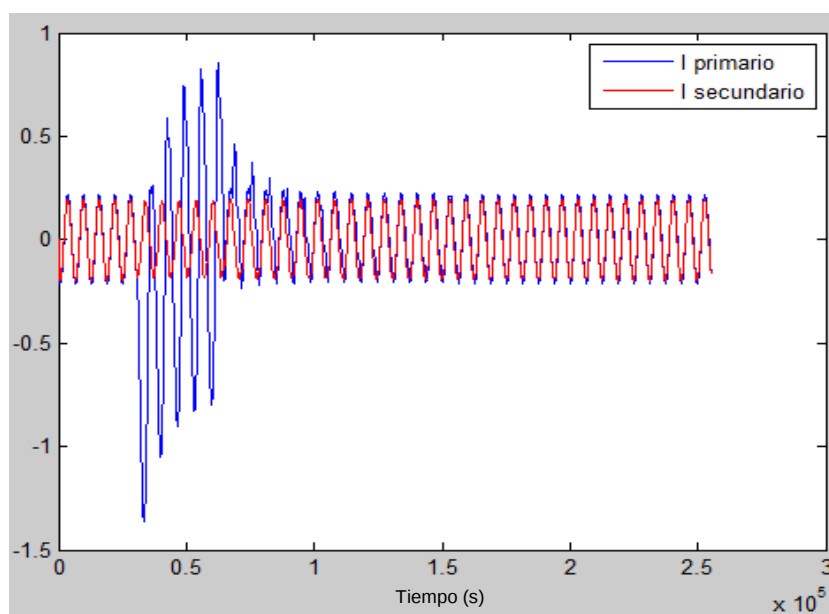


Fig. 4-28 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

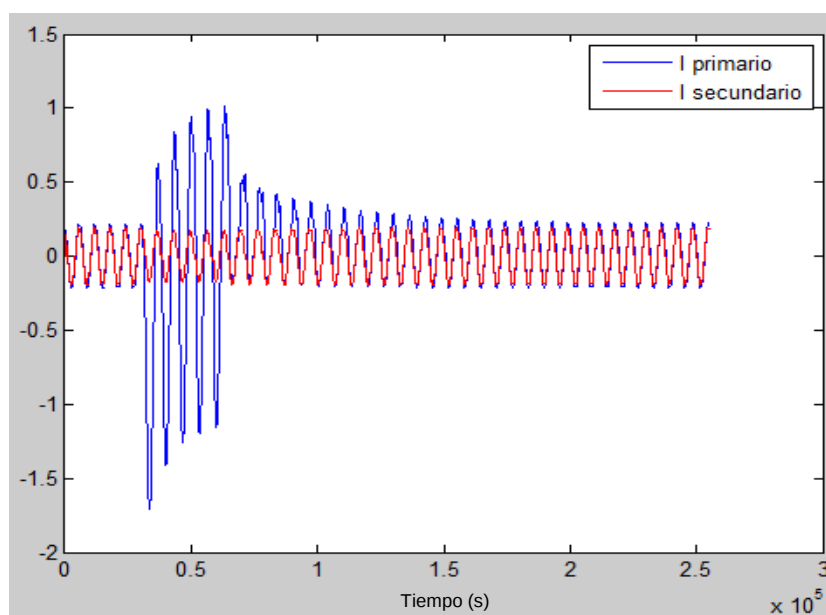


Fig. 4-29 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

En este caso, una falta externa produce alteraciones en la intensidad que transcurre por el transformador de potencia, por tanto, la protección diferencial que tiene instalada el transformador detectaría esta falta y actuaría. Para evitar esta actuación de la protección innecesaria se recurre a la protección porcentual, esta protección nos es necesaria en el caso que la protección de línea (a la cual corresponde la detección de este tipo de falta) no actúe a tiempo para subsanar la falta.

4.1.4.2 Cortocircuito fase – fase

Como se ha indicado anteriormente, se simula un cortocircuito entre las fases A y B y se visualiza el comportamiento de las intensidades del transformador de potencia.

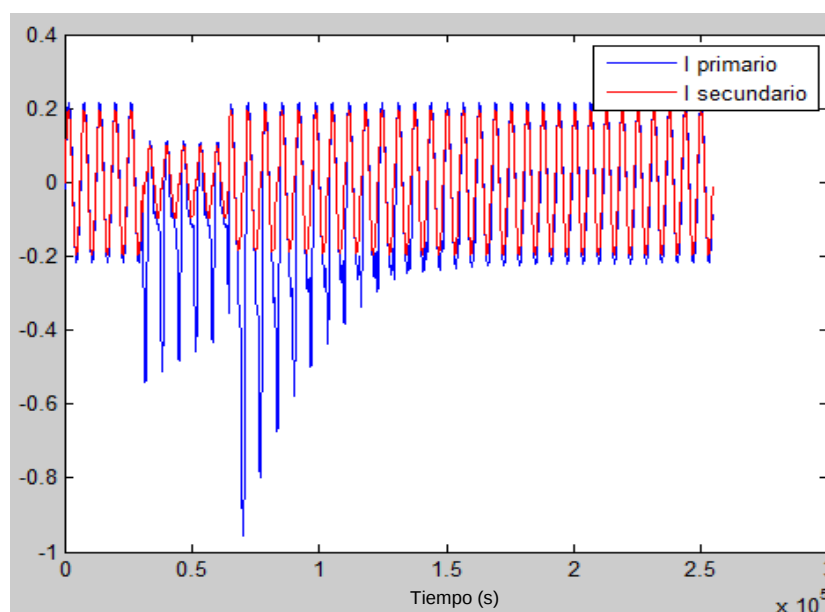


Fig. 4-30 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

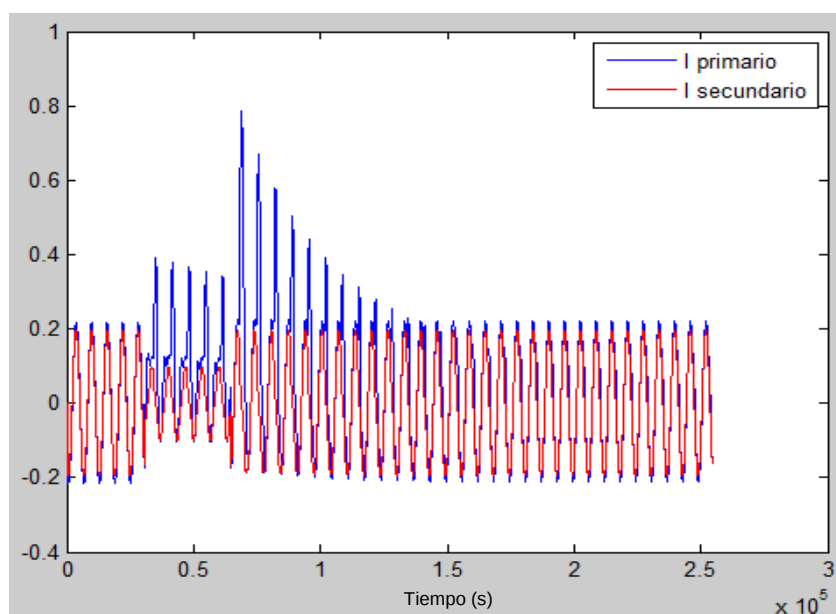


Fig. 4-31 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

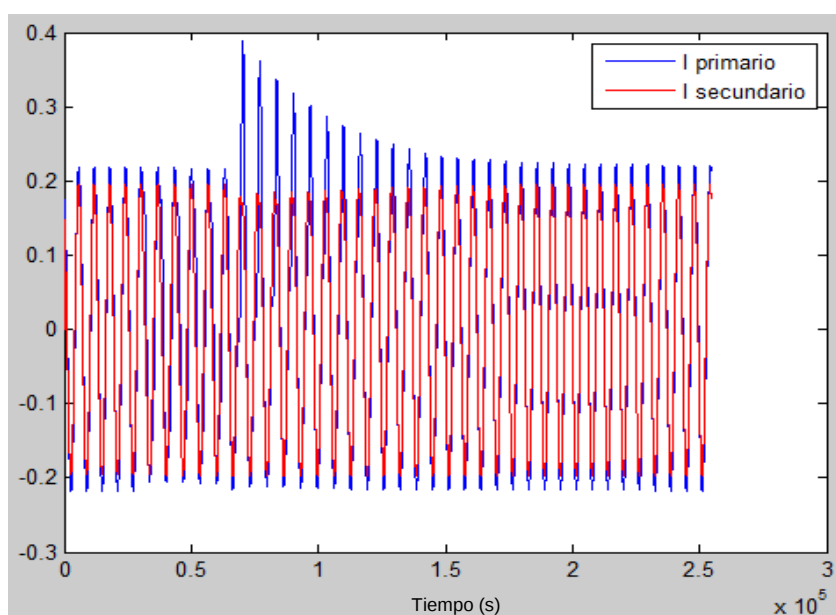


Fig. 4-32 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

Se puede observar que, durante el cortocircuito, la intensidad por el primario es mayor que por el secundario. Esto crea una intensidad diferencial, pero como se ha indicado anteriormente, la protección diferencial no debe actuar ya que es una falta externa y debe actuar la protección perteneciente a la zona de protección en la que ocurra la falta. Para más seguridad de la no actuación de la protección diferencial se utiliza una protección porcentual, por lo tanto, al ser la intensidad antagonista mucho mayor que la intensidad diferencial la protección no actúa.

4.1.4.3 Cortocircuito fase – fase – tierra

En este apartado se va a proceder a simular un cortocircuito bifásico con tierra, con un valor de resistencia a tierra de 0.001Ω y una resistencia de falta de 0.001Ω .

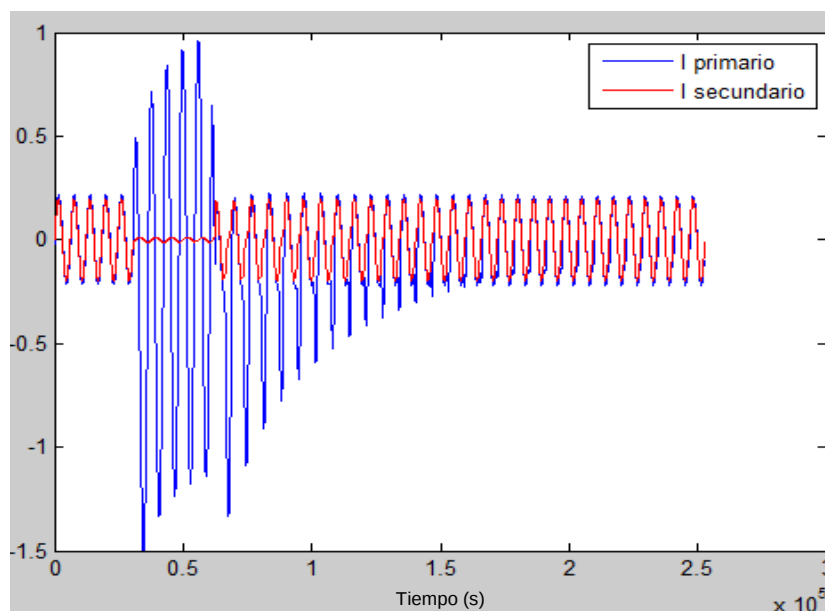


Fig. 4-33 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A

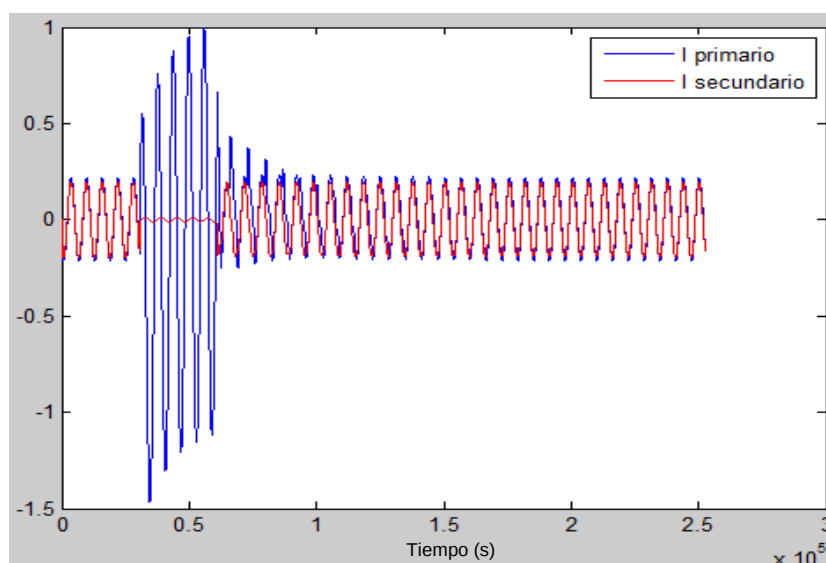


Fig. 4-34 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

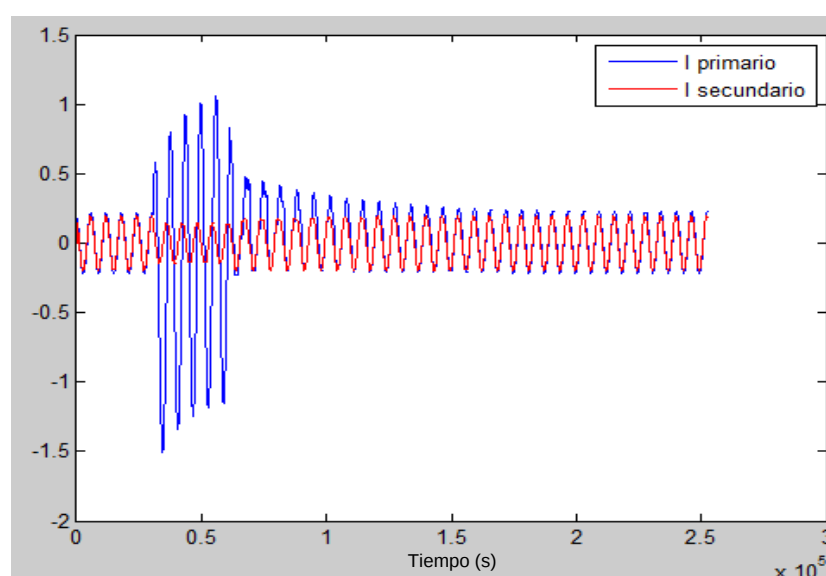


Fig. 4-35 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

Como ocurre en los dos casos anteriores, se puede ver que hay un efecto sobre la intensidad del transformador, aunque la falta se produzca fuera de la zona de protección de este, por tanto, en este caso también es necesario utilizar la protección porcentual.

4.1.5 Falta externa en el lado del secundario

Para simular una falta externa en el lado del secundario se utilizará el esquema mostrado en la figura 4.1 y se colocará un bloque Simulink, el cuál simulará el tipo de falta que se le indique y el tiempo de inicio y fin de la falta, el cual quedará como aparece en la figura 4.36.

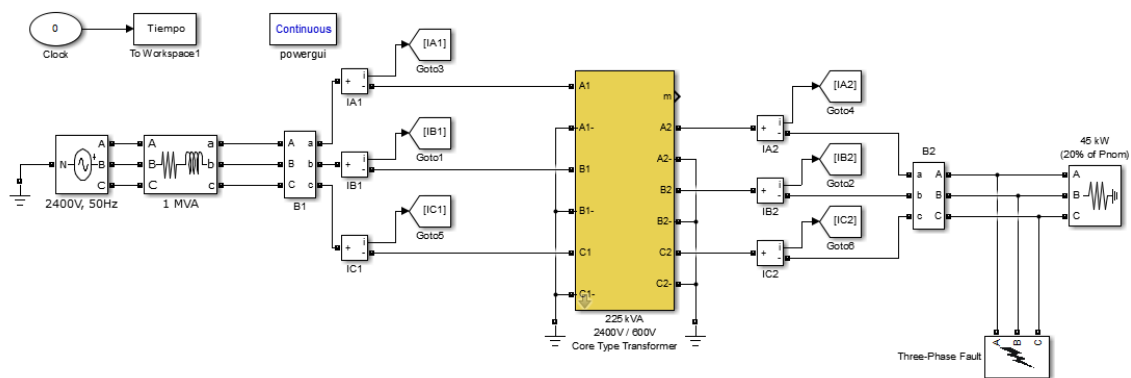


Fig. 4-36 Esquema para simular una falta externa lado secundario.

A continuación se procederá a simular todas las posibles faltas que puedan ocurrir y ver las intensidades de entrada y salida del transformador.

4.1.5.1 Cortocircuito fase – tierra

El cortocircuito se produce en la fase A, por lo que se puede observar, en las figuras que se presentan a continuación, que en la fase afectada aumenta la intensidad que pasa por el transformador de potencia, pero aproximadamente de igual magnitud en el primario que en el secundario, por lo tanto, prácticamente no existe una intensidad diferencial. En cambio, en las otras dos fases no afectadas hay una intensidad notablemente mayor en el primario que en el secundario, esto es debido a que el transformador necesita una intensidad mayor de las dos fases no afectadas para compensar el exceso de intensidad necesario en la fase afectada.

Como en los casos de falta externa en el lado del primario, hay una intensidad diferencial, con la protección porcentual se evita la actuación de la protección

diferencial, ya que no corresponde a este la protección de la zona donde se produce la falta.

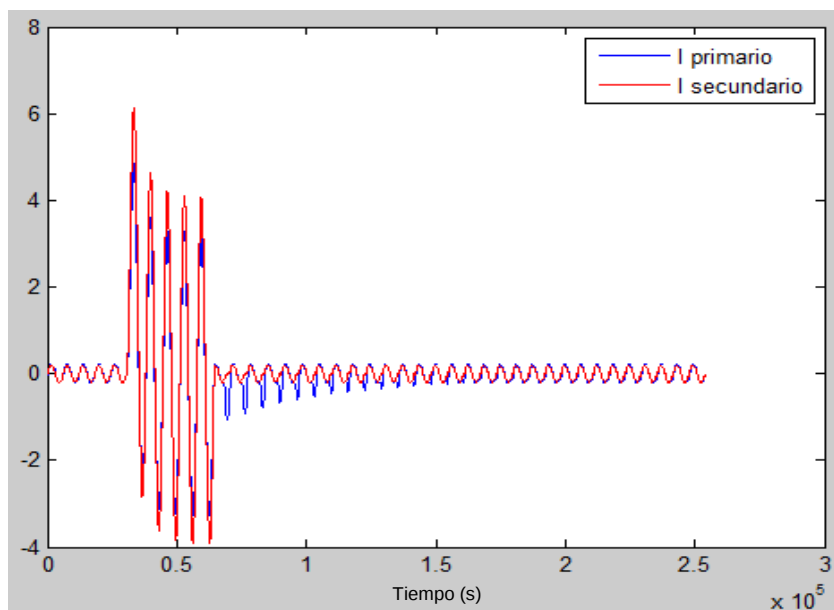


Fig. 4-37 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

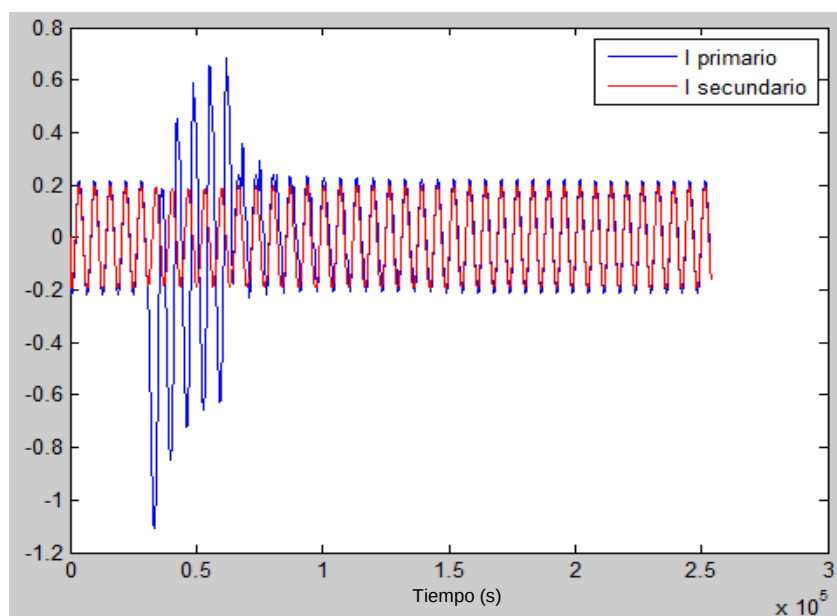


Fig. 4-38 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

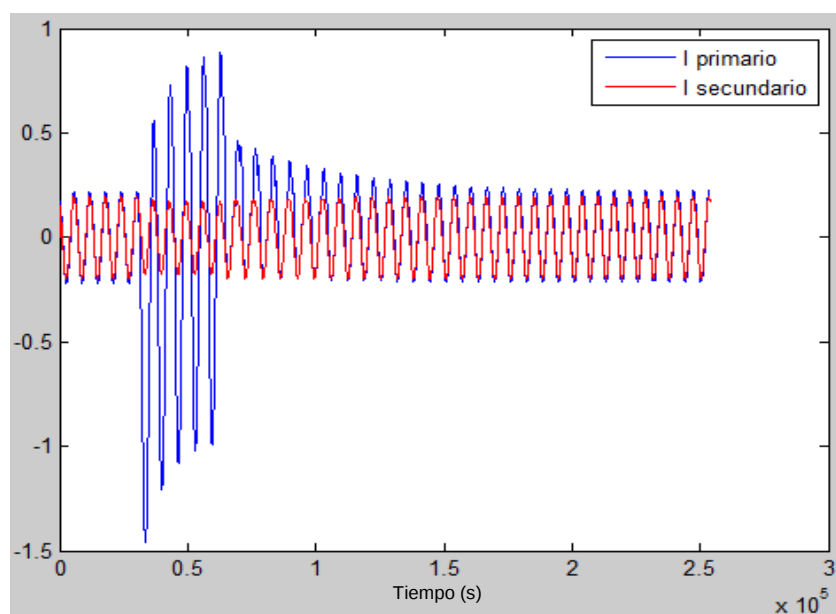


Fig. 4-39 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

4.1.5.2 Cortocircuito fase – fase

En este caso, como demuestran las figuras a continuación propuestas, no existe una intensidad diferencial, aunque exista una sobreintensidad en las dos fases afectadas, en este caso la fase A y la fase B. Por tanto, en este caso, no nos hace falta la protección porcentual, ya que la protección diferencial no detecta anomalía ninguna.

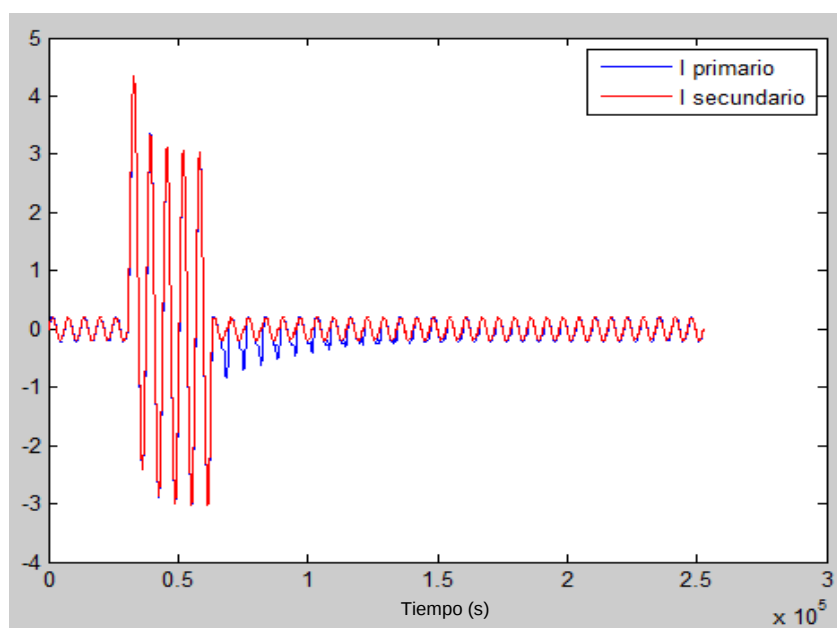


Fig. 4-40 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

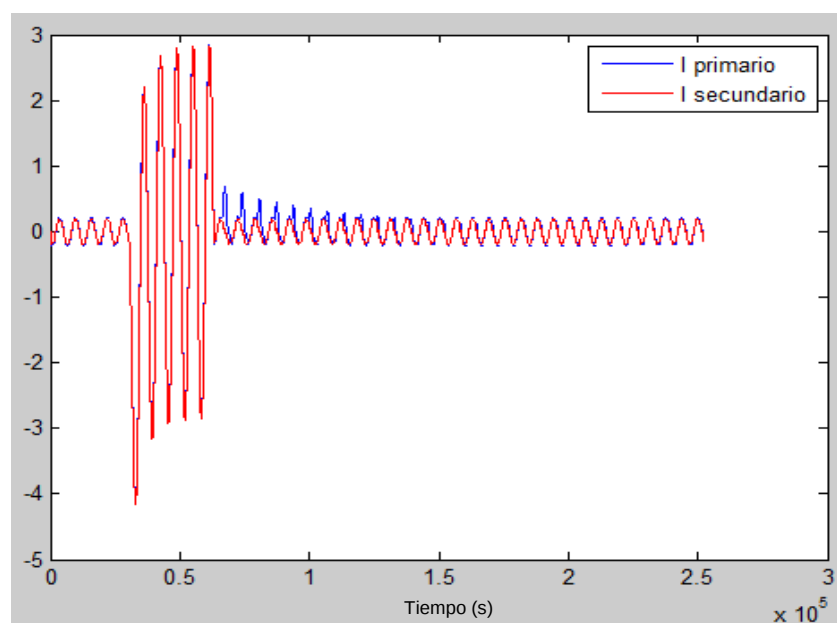


Fig. 4-41 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

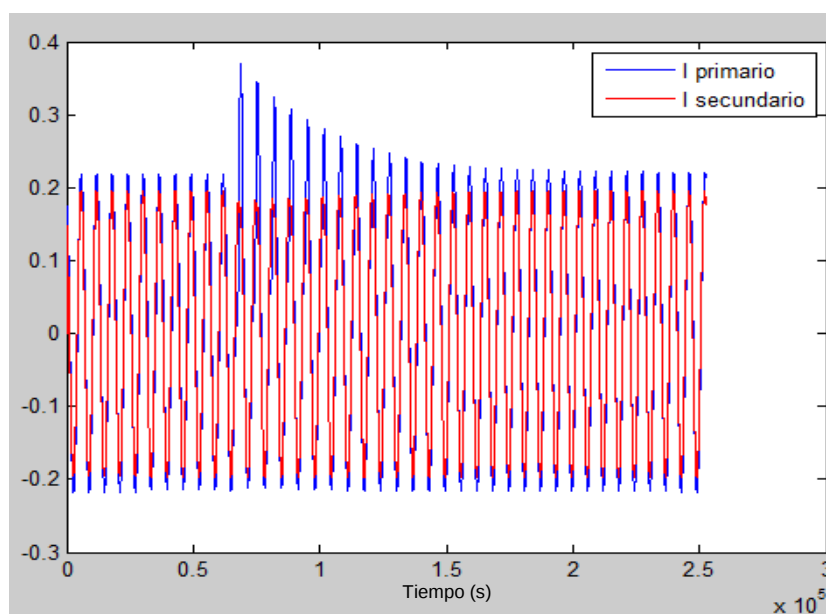


Fig. 4-42 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

4.1.5.3 Cortocircuito fase – fase – tierra

En esta simulación se puede demostrar como la detección de una intensidad diferencial se produce en la fase no afectada y en las fases afectadas, aunque existe una sobreintensidad, no existe una intensidad diferencial. Este efecto es debido la existencia de la tierra, por lo que se produce el efecto de movimiento de neutro.

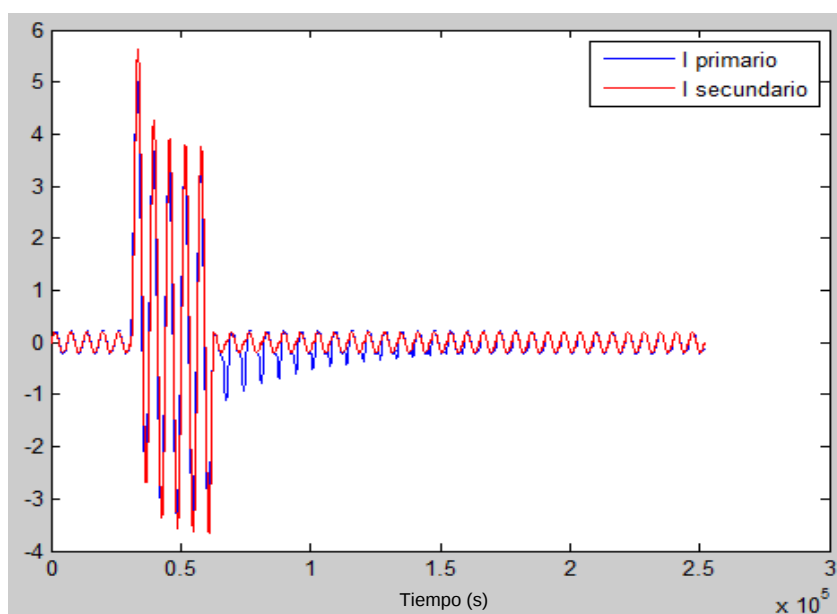


Fig. 4-43 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase A.

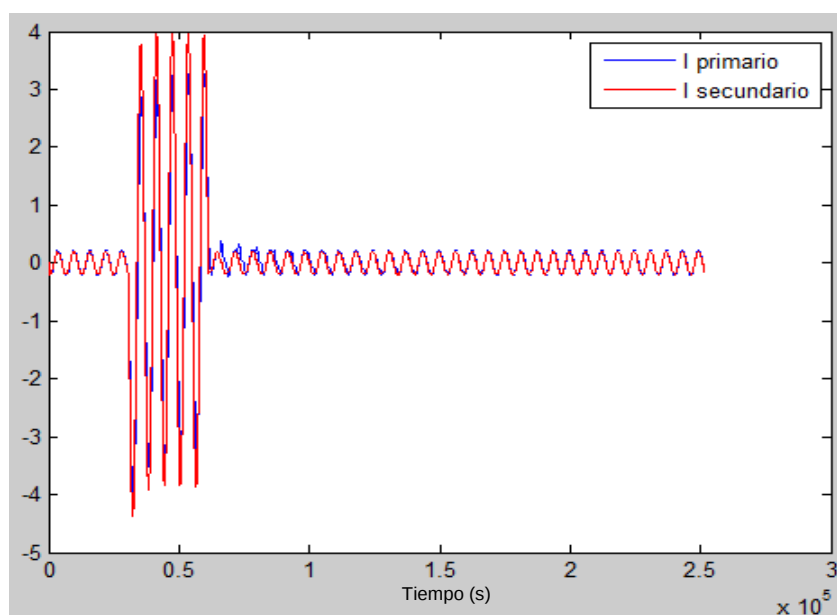


Fig. 4-44 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase B.

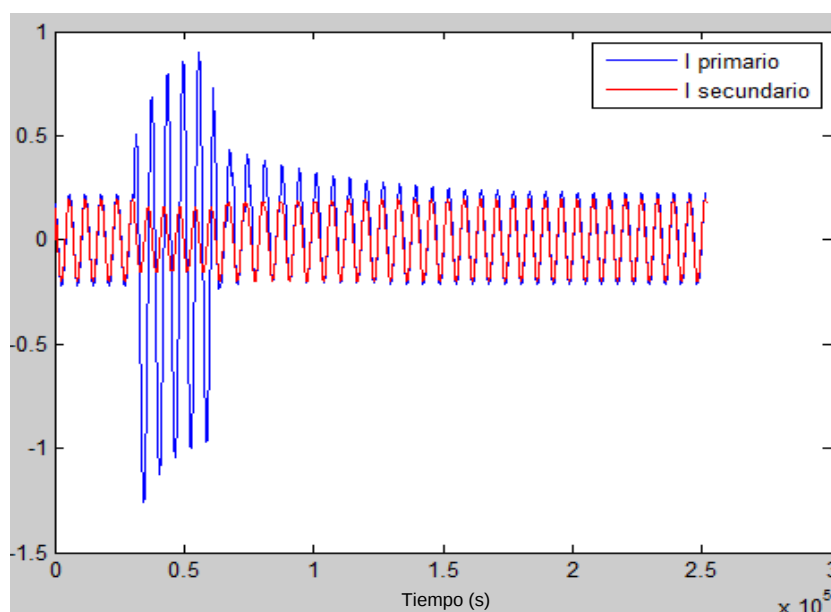


Fig. 4-45 Intensidad primario vs intensidad secundario por la fase C.

4.2 Análisis de la corriente diferencial mediante la transformada wavelet

Una vez conocido el comportamiento de las intensidades que circulan por el transformador, se puede ver cómo diferenciar con exactitud las distintas situaciones que pueden ocurrir en un transformador de potencia, por lo que se va a plantear una novedosa forma de cálculo y detección de las diferentes situaciones posibles. Para ello se observará el comportamiento de las distintas corrientes diferenciales que se pueden tener en cada caso a través de la transformada wavelet y ver si es posible detectar las diferentes situaciones. En los siguientes apartados se realizará un análisis wavelet con Daubechies (db1) hasta el cuarto detalle.

4.2.1 Falta interna en el lado del primario

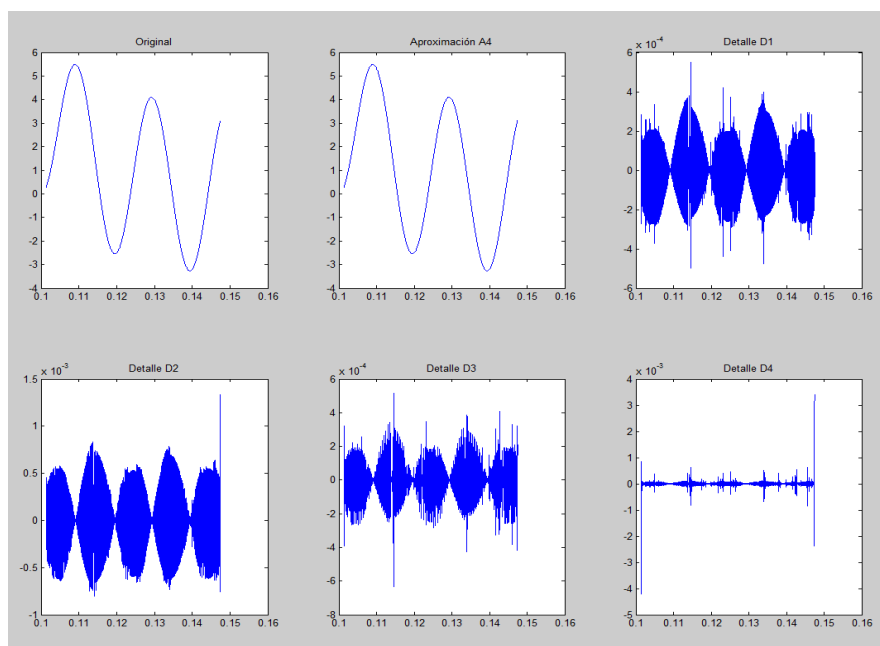


Fig. 4-46 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.

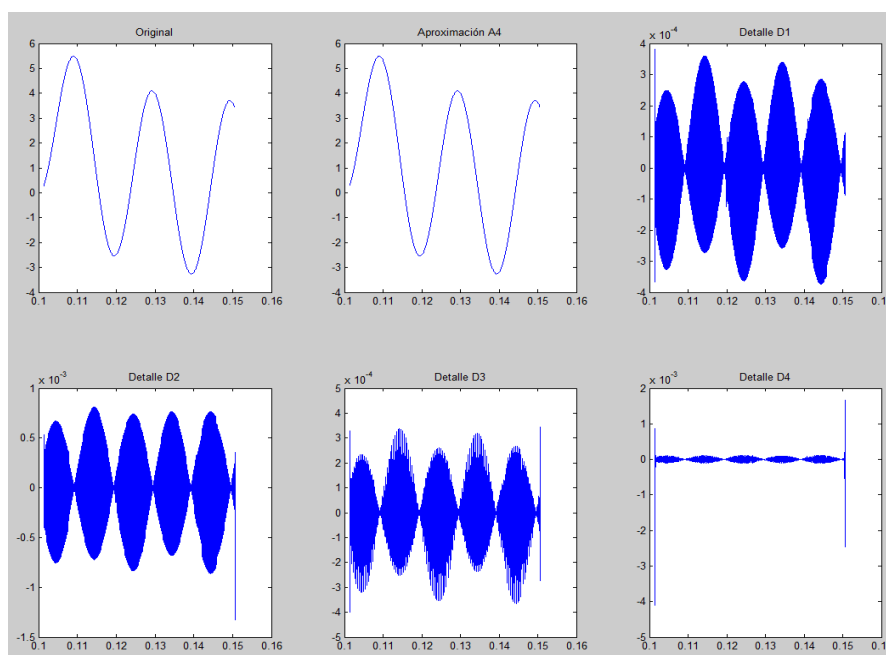


Fig. 4-47 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B.

4.2.2 Falta interna en el lado del secundario

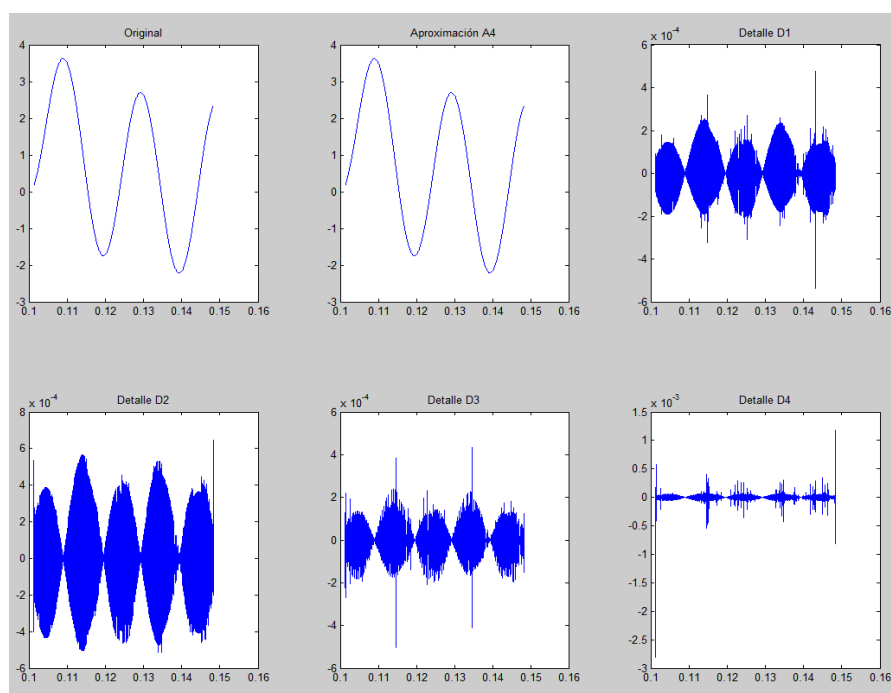


Fig. 4-48 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.

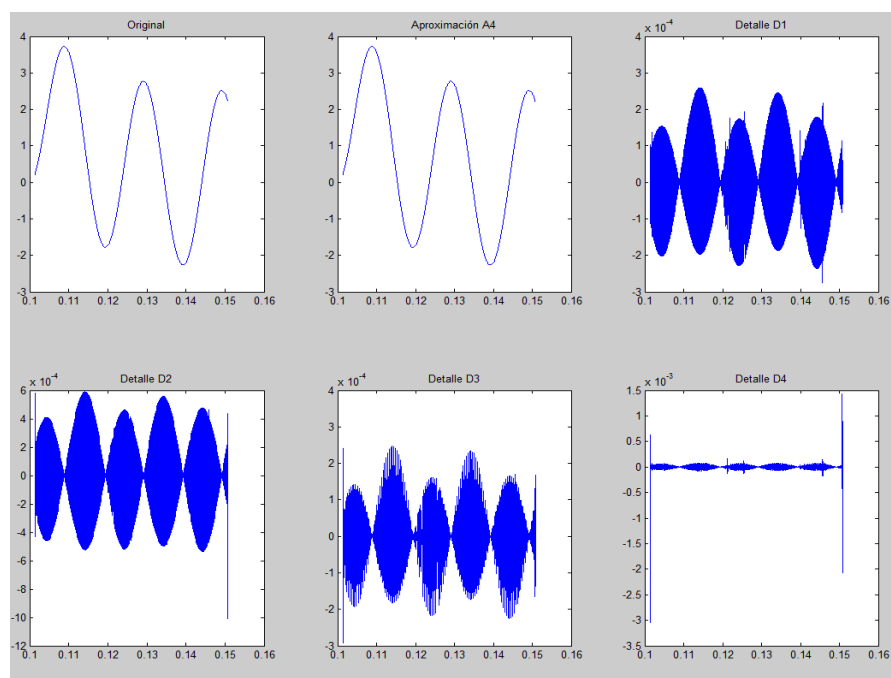


Fig. 4-49 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B.

4.2.3 Falta externa en el lado del primario

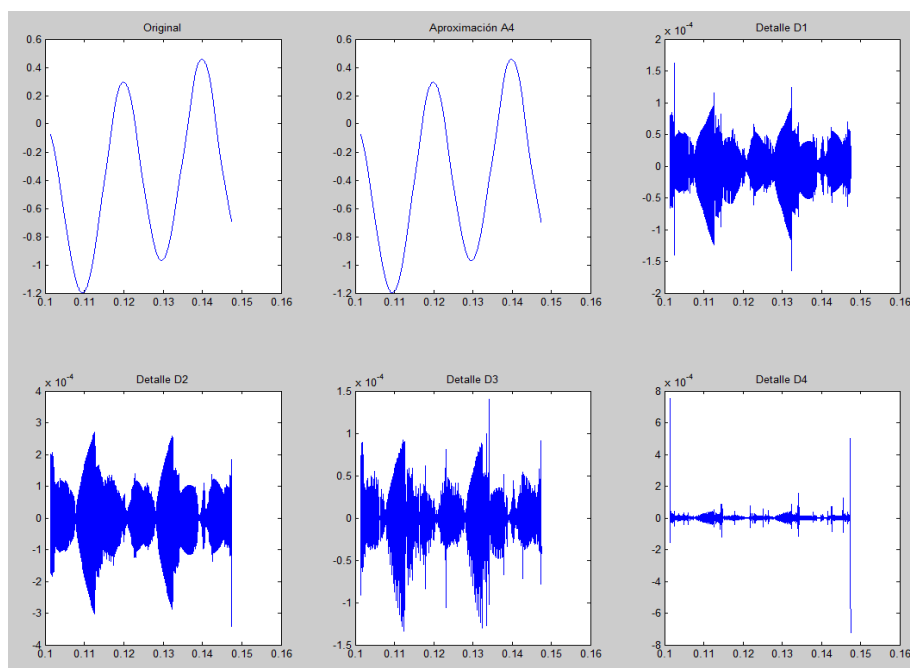


Fig. 4-50 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.

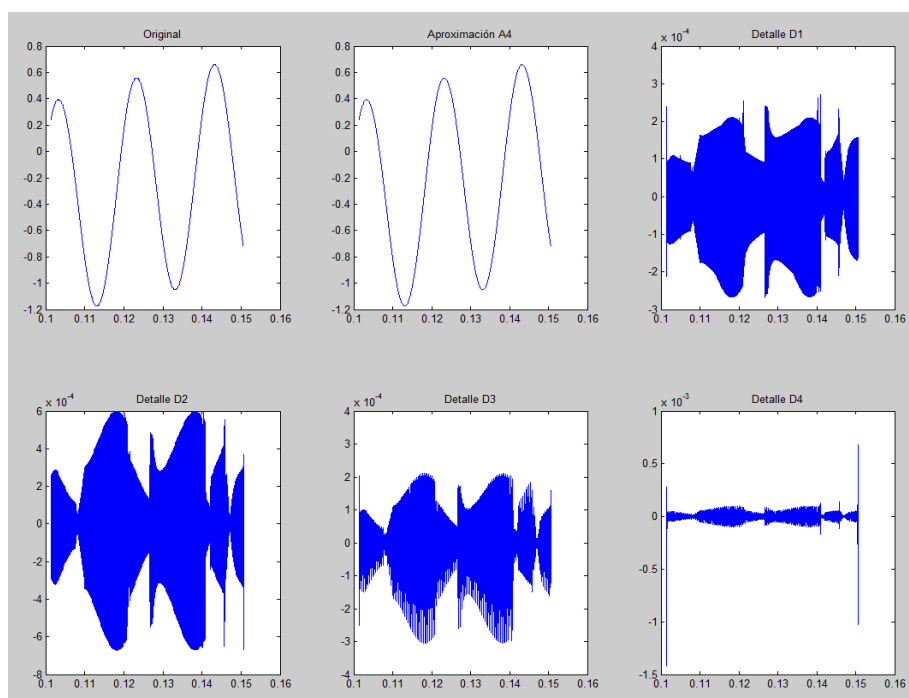


Fig. 4-51 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B.

4.2.4 Falta externa en el lado del secundario

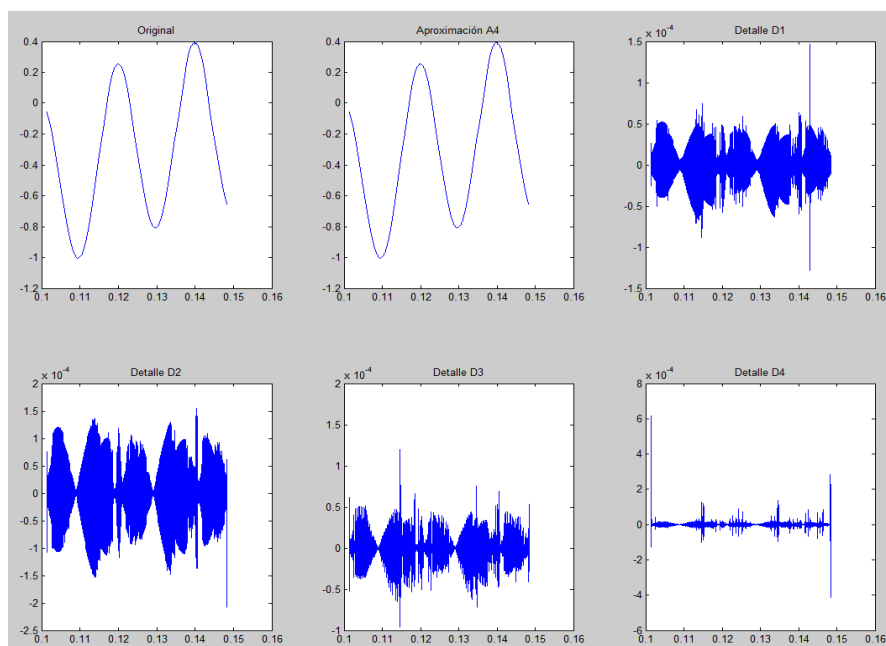


Fig. 4-52 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito en fase A - Tierra.

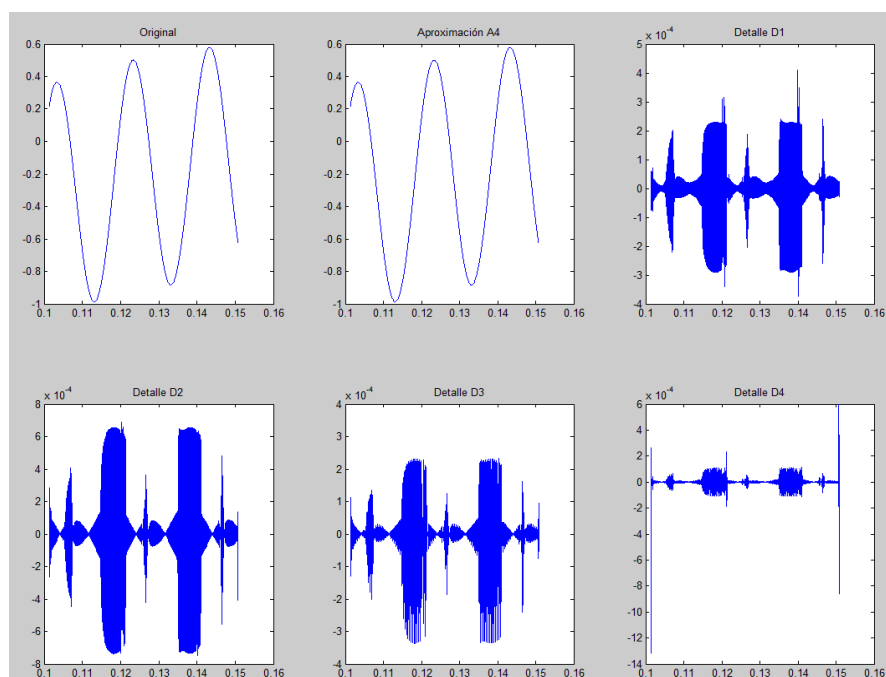


Fig. 4-53 Análisis Wavelet db1 para cortocircuito fase A - fase B

4.2.5 Corriente de conexión

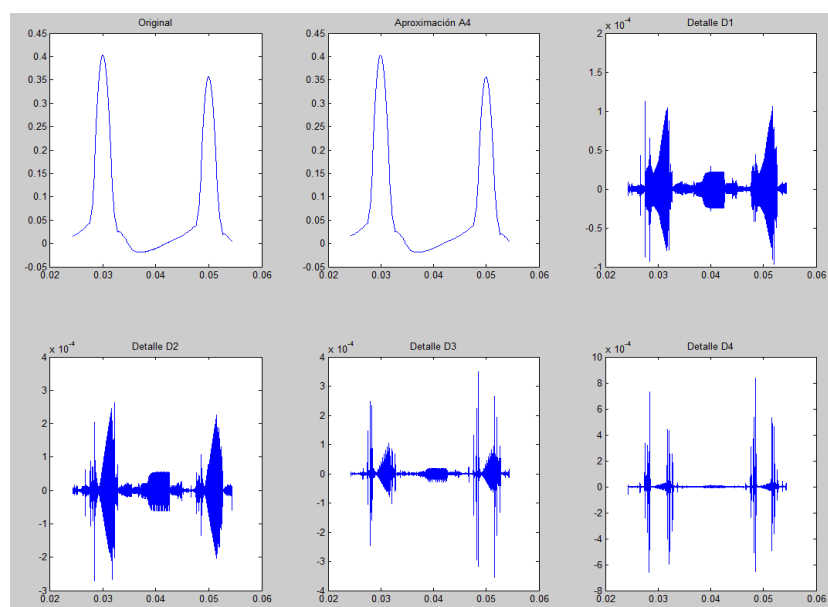


Fig. 4-54 Análisis Wavelet db1 para corriente de conexión.

4.2.6 Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos en todas las simulaciones realizadas en el actual apartado, se puede concluir que, a través del análisis Wavelet, se puede llegar a conclusiones razonablemente más claras que sin este tipo de análisis, ya que si se observan las distintas gráficas obtenidas se puede ver como las faltas internas son similares entre ellas en forma, aunque no en valor. Si se analizan los resultados de las faltas externas se puede concluir que son similares y muy diferentes de las faltas internas y algo similar a una corriente de conexión, por lo que se puede pensar la posibilidad de implementar un modelo de protección diferencial lo suficientemente rápido y preciso para detectar cualquier tipo de falta, ya sea interna o externa, siempre que se tenga la capacidad de interpretar e implementar adecuadamente los resultados obtenidos.

4.3 Elección del detalle más idóneo para el análisis

Una vez se ha corroborado visualmente que se puede utilizar la Transformada Wavelet para la implementación de una protección diferencial, se procederá a determinar qué detalle es el más idóneo para la realización del análisis, ya que se ha optado por la familia Daubechies db1 como realizan todos los artículos publicados hasta el momento sobre la aplicación de la Transformada Wavelet en protecciones diferenciales. Para ver qué detalle es más idóneo se analizan las señales anteriores y, utilizando el código que se expondrá en los modelos realizados, se comparará desde el detalle 1 (D1) hasta el detalle 5 (D5) (en la parte superior derecha se encuentra la leyenda de cada detalle), como se observa en la figuras a continuación expuestas. En las figuras se puede ver el coeficiente obtenido del código utilizado para cada 10 ms de la señal diferencial y se analizan los resultados.

4.3.1 Falta interna en el lado del primario

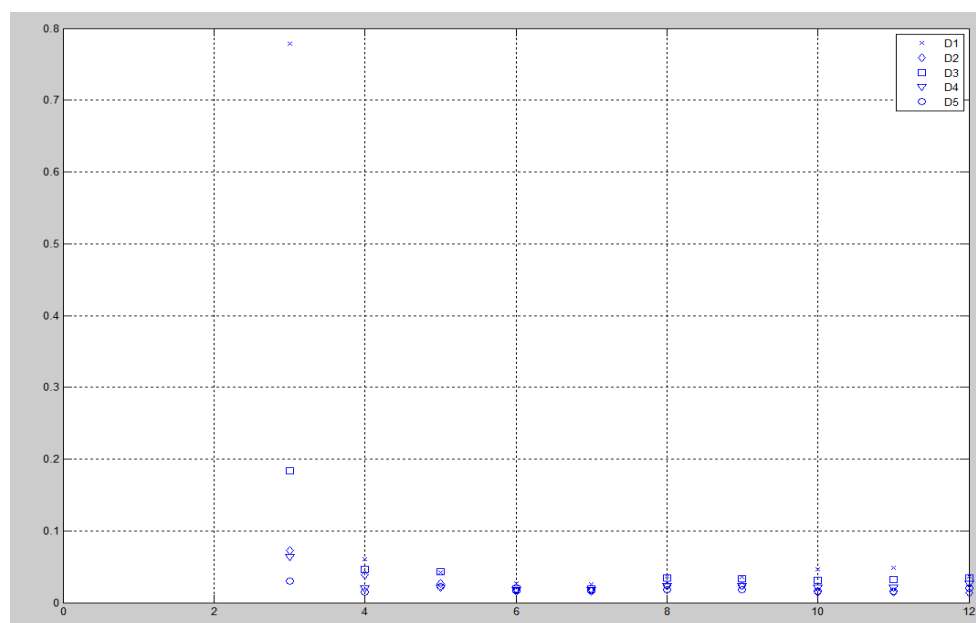


Fig. 4-55 Gráfica comparativa de diferentes detalles.

4.3.2 Falta interna en el lado del secundario

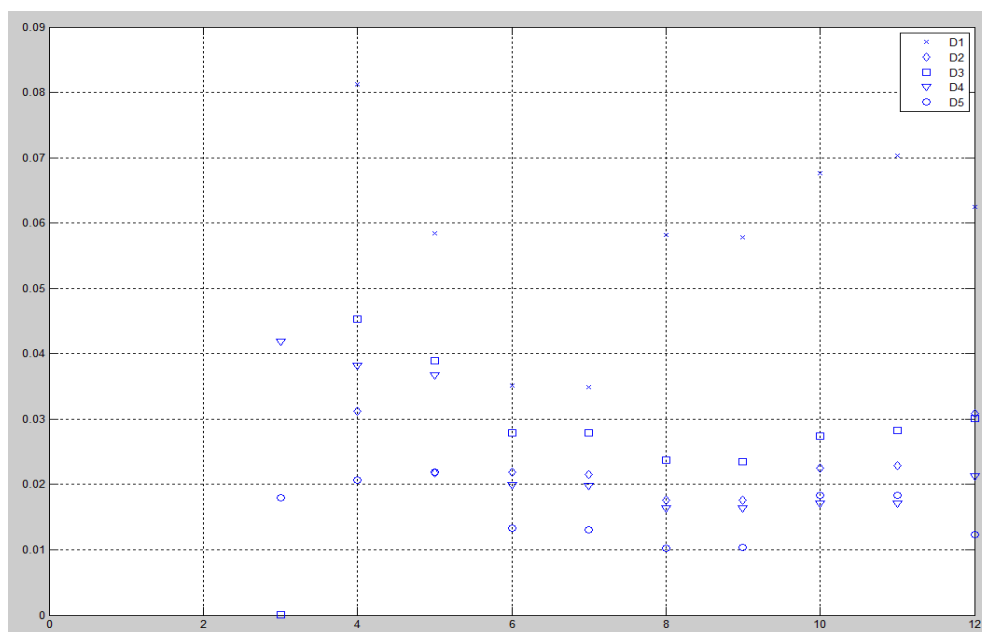


Fig. 4-56 Gráfica comparativa de diferentes detalles.

4.3.3 Falta externa en el lado del primario

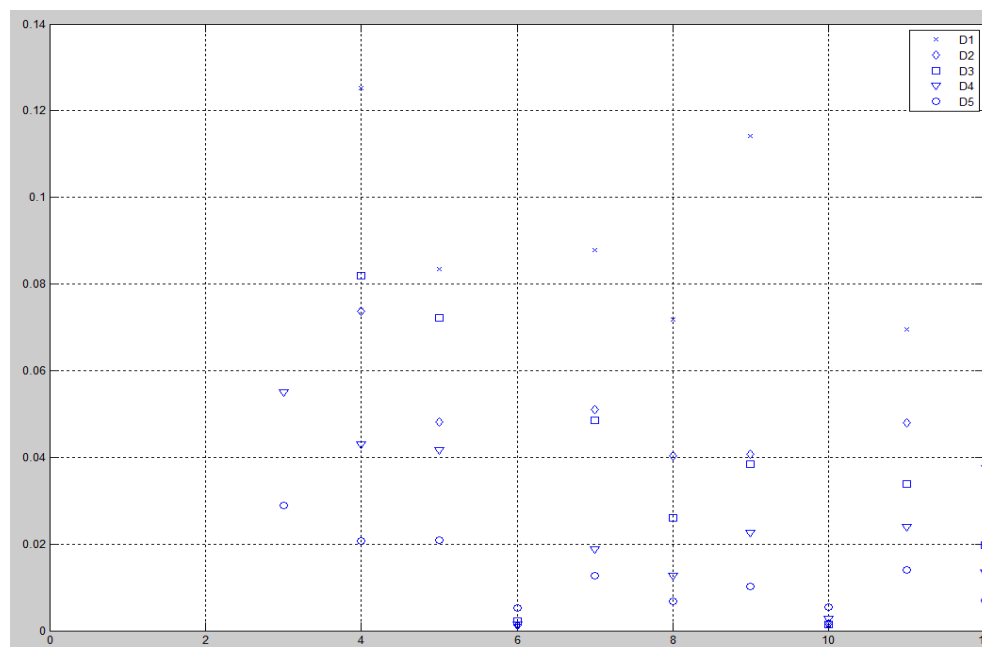


Fig. 4-57 Gráfica comparativa de diferentes detalles.

4.3.4 Falta externa en el lado del secundario

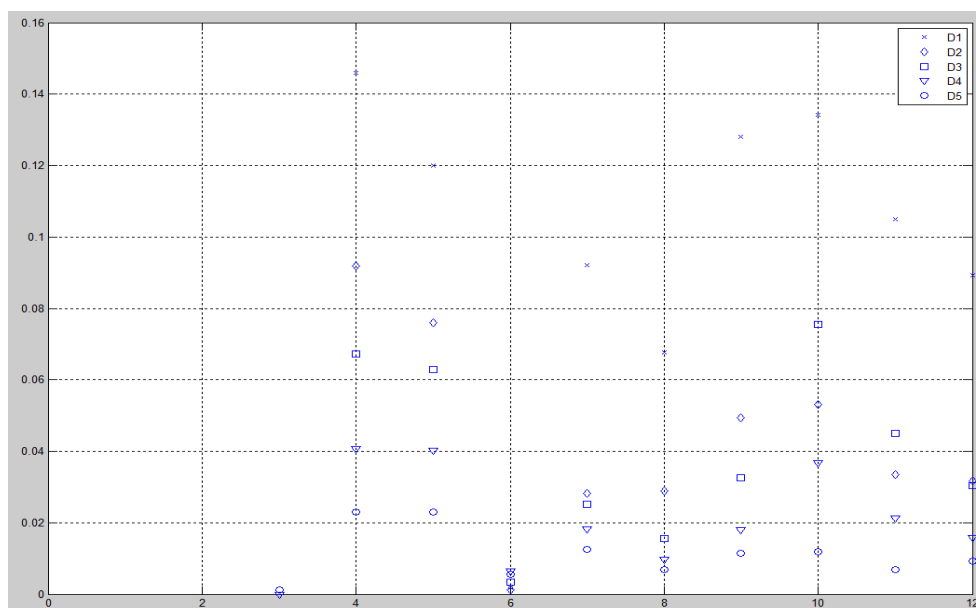


Fig. 4-58 Gráfica comparativa de diferentes detalles.

4.3.5 Corriente de conexión

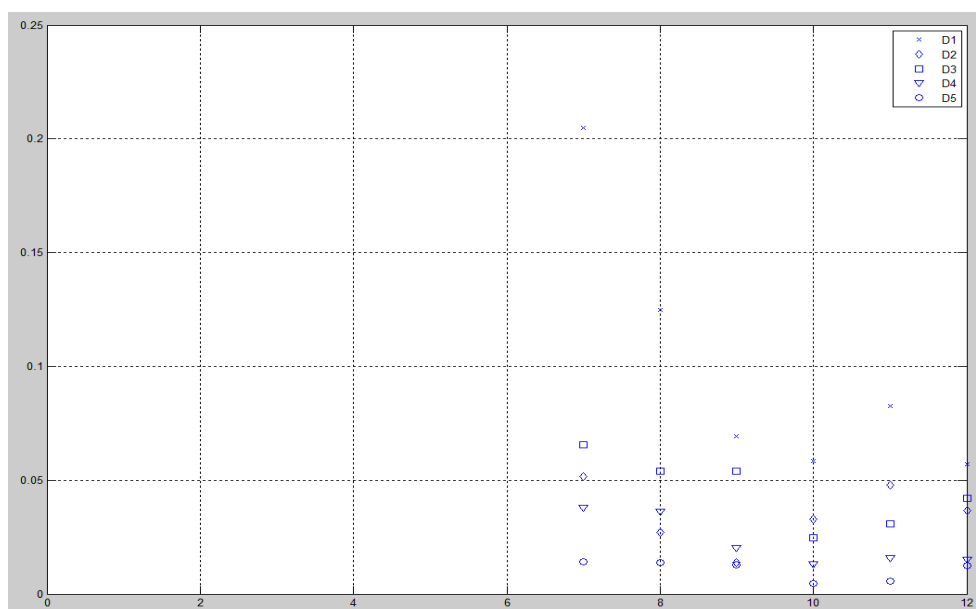


Fig. 4-59 Gráfica comparativa de diferentes detalles.

4.3.6 Conclusiones

Analizando los datos obtenidos de las gráficas anteriores se puede llegar a la conclusión y a la elección del primer detalle (D1), ya que es el más estable en todas las simulaciones y el que tiene menos errores para la detección del instante que se produce la perturbación. Como se puede observar en la falta interna en el secundario, sólo D1 detecta la perturbación en el punto cuatro, donde realmente comienza la falta, los demás detalles la detectan en el punto tres, donde por defecto no hay falta.

Uno de los beneficios añadidos a D1 además de la estabilidad y la minimización del error es que al ser el primer detalle los cálculos necesarios son mucho menores, por lo que el tiempo de actuación del sistema se reduce.

4.4 Modelos realizados

4.4.1 Primer modelo

En el primer modelo que se ha llevado a cabo se ha querido obtener la diferenciación de las distintas faltas y la corriente de conexión del transformador de potencia. Para ello se ha llevado a cabo la simulación de los distintos programas SIMULINK propuestos en el apartado 4.1 con la inclusión de nuevos bloques SIMULIK para obtener la intensidad diferencial y poder almacenar está en el espacio de trabajo de MATLAB, como se muestra en la figura.

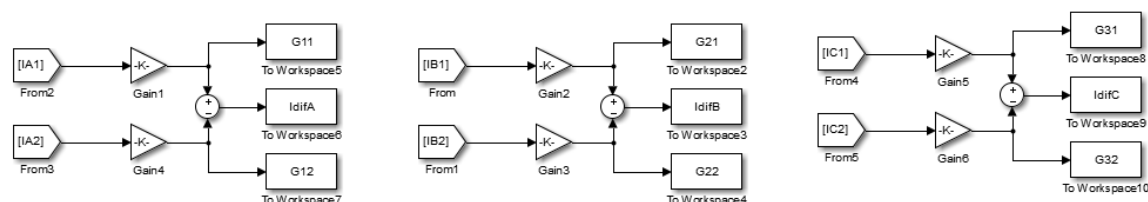


Fig. 4-60 Bloques SIMULINK para obtener I_d en p.u.

Fijándose en la figura también se puede ver un bloque de ganancia, este bloque sirve para obtener la intensidad del primario y secundario del transformador en por unidad (p.u.), para así poder comparar ambas intensidades sin necesidad de la relación de transformación.

Una vez simuladas cada una de las situaciones posibles y obtenidas las intensidades diferenciales, se procede al análisis Wavelet como se indica en el siguiente código MATLAB:

```
% Limpiamos el historial anterior del espacio de trabajo.
clear all
Clc
% Simulamos el fichero SIMULINK energización.
sim('energizacion',0.20);
t1=1;
t2= length(IdifA);
% Realizamos el análisis Wavelet.
s = IdifA(t1:t2);
l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D11 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);

Clc
% Simulamos el fichero SIMULINK para falta antes del devanado primario
del transformador de potencia.
sim('antes_primario',0.20);
t1=1;
t2= length(IdifA);
% Realizamos el análisis Wavelet.
s = IdifA(t1:t2);
l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D12 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);
```

```
Clc

% Simulamos el fichero SIMULINK para falta devanado primario del
transformador de potencia.
sim('primario',0.20);
t1=1;
t2= length(IdifA);

% Realizamos el análisis Wavelet.
s = IdifA(t1:t2);
l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D13 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);

Clc

% Simulamos el fichero SIMULINK para falta devanado secundario del
transformador de potencia.
sim('secundario',0.20);
t1=1;
t2= length(IdifA);

% Realizamos el análisis Wavelet.
s = IdifA(t1:t2);
l_s = length(s);
[C,L] = wavedec(s,5,'db1');
cA5 = appcoef(C,L,'db1',5);
[cD1,cD2,cD3,cD4,cD5] = detcoef(C,L,[1,2,3,4,5]);
A5 = wrcoef('a',C,L,'db1',4);
D14 = wrcoef('d',C,L,'db1',1);

Clc

% Simulamos el fichero SIMULINK para falta devanado después secundario
del transformador de potencia.
sim('despues_secundario',0.20);
t1=1;
t2= length(IdifA);

% Realizamos el análisis Wavelet.
```

```

s = IdifA(t1:t2);
l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D15 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);

% Visualizamos en una gráfica los resultados obtenidos
G00=figure(2);
subplot(5,1,1); plot(Tiempo(t1:t2),D12); title('Antes del primario')
subplot(5,1,2); plot(Tiempo(t1:t2),D13); title('Primario')
subplot(5,1,3); plot(Tiempo(t1:t2),D14); title('Secundario')
subplot(5,1,4); plot(Tiempo(t1:t2),D15); title('Después del secundario')
subplot(5,1,5); plot(Tiempo(t1:55500),D11); title('Energización')

```

En la siguiente figura se pueden ver las distintas intensidades diferenciales analizadas por la Transformada Wavelet, como se ha indicado anteriormente una a una, ahora se muestran en común.

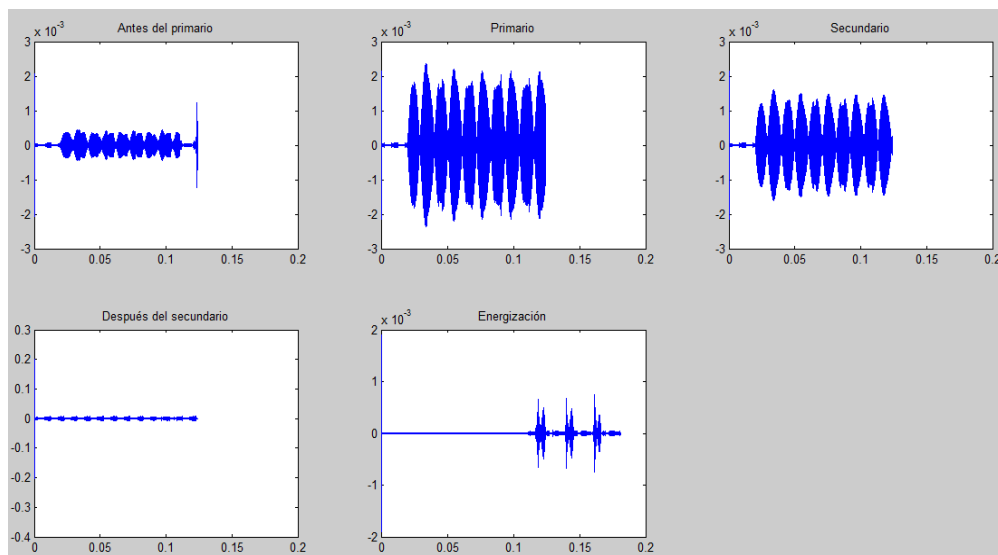


Fig. 4-61 Análisis Wavelet de cada uno de los casos posibles.

Una vez que se tiene el análisis Wavelet realizado se procede a diseñar el algoritmo necesario para interpretar de la mejor forma posible estos resultados y poder diferenciar entre las diferentes situaciones. Para ello se utilizará, en el primer cálculo, la ecuación (4.1) y, para el segundo cálculo, la ecuación (4.2). Se analizará la señal en 12 divisiones y se verá qué datos se obtienen y cuál es la mejor ecuación a utilizar.

$$I_{ret} = \frac{(db_1)_{max}}{\sum_{i=1}^n |db_1|_i} \quad (4.1)$$

$$I_{ret} = \frac{(db_1)_{max}}{\sum_{i=1}^n |db_1|_i^2} \quad (4.2)$$

donde:

I_{ret} , es el índice de retención.

$(db_1)_{max}$, es el valor máximo de la división que estamos analizando.

$\sum_{i=1}^n |db_1|_i^2$, es la sumatoria del cuadrado del valor absoluto de todos los valores de la división que estamos analizando.

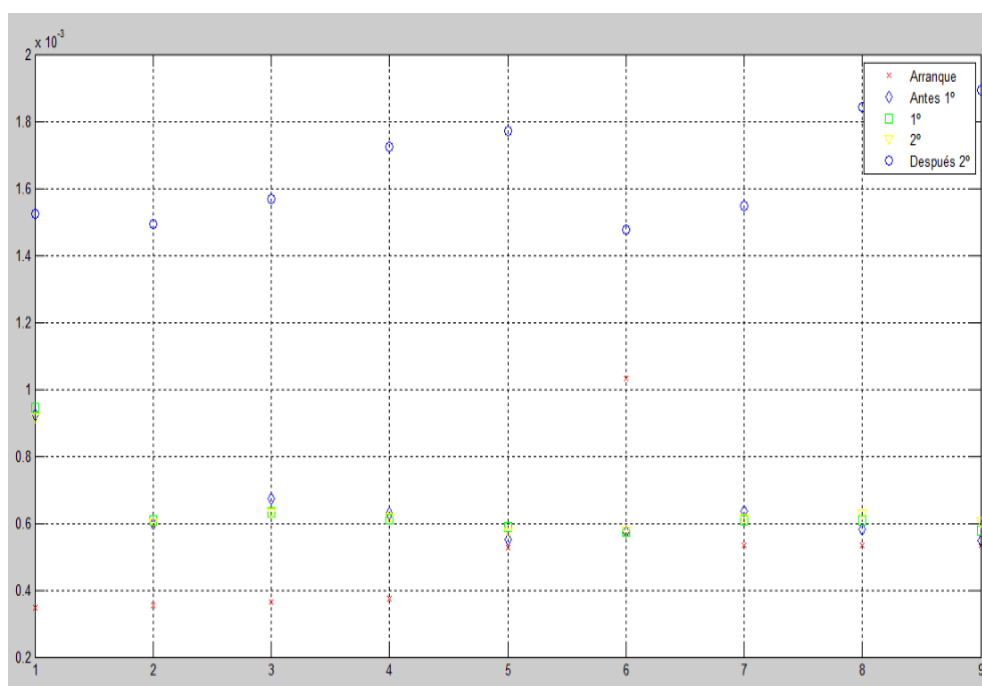


Fig. 4-62 Resultados para la ecuación 3.1.

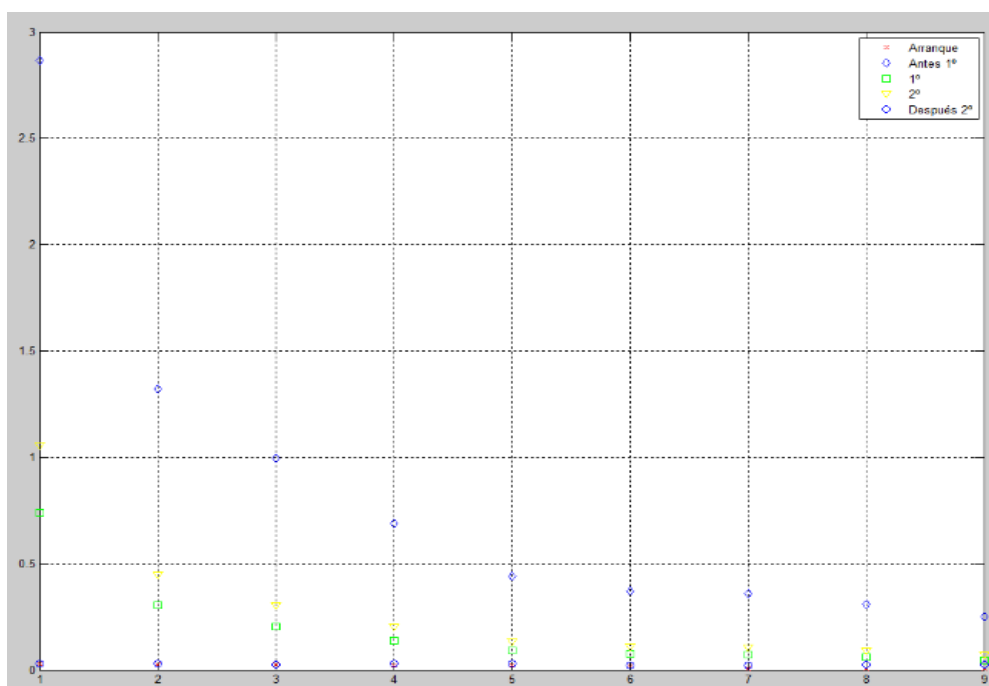


Fig. 4-63 Resultados para la ecuación 3.2.

Analizando las dos gráficas anteriores y otras simulaciones que se han realizado, pero que no se han incluido en el documento para no redundar en la información, se puede observar que los resultados obtenidos utilizando la ecuación (4.1) son más estables y son mejor interpretables por el sistema, ya que son más homogéneos y descienden en valor con el paso del tiempo.

Por otra parte, se ha llegado a la conclusión de utilizar un relé diferencial de porcentaje antes de realizar el análisis Wavelet, con el fin de reducir las variables a tener en cuenta en tal análisis, ya que, como se ha explicado en el apartado 2.4.4, esta protección nos detecta faltas internas y faltas externas, por tanto, es un filtro que se utiliza antes del análisis Wavelet, por lo que en los próximos modelos sólo vamos a ver el comportamiento de las faltas internas y de la corriente de conexión.

Por último se quiere resaltar que la posibilidad de realizar toda la protección con el análisis Wavelet es posible, siempre y cuando se investigue con más profundidad. Este sistema ayudaría, en gran parte, a reducir el tamaño de la protección y el tiempo de actuación del mismo.

4.4.2 Segundo modelo

Para este modelo se utilizarán los mismos modelos SIMULINK que en el apartado anterior, por lo que se van a cambiar las corrientes diferenciales a analizar. En este caso ya no es como en el apartado anterior, ya que en este apartado se van a analizar las faltas internas y la corriente de conexión y, por otra parte, se va a utilizar la ecuación (4.3) para la interpretación de los datos obtenidos del análisis Wavelet.

$$I_{ret} = \sum_{i=1}^n |db_1|_i^2 \quad (4.3)$$

En este caso se ha querido comparar el análisis de la señal completa eliminando los valores inferiores a 0,03 para obtener una señal más limpia y ver el comportamiento de los datos finales.

También se ha incluido un sistema de análisis propuesto en [9], que consiste en analizar primero 10 ms; después, en el siguiente tramo que se analiza no se hace entre 10 y 20 ms, sino que se vuelve la mitad hacia atrás y se analiza de 5 a 15 ms, por lo que se consigue un mayor análisis y mejores resultados. Para ver mejor este sistema se adjunta la siguiente figura.

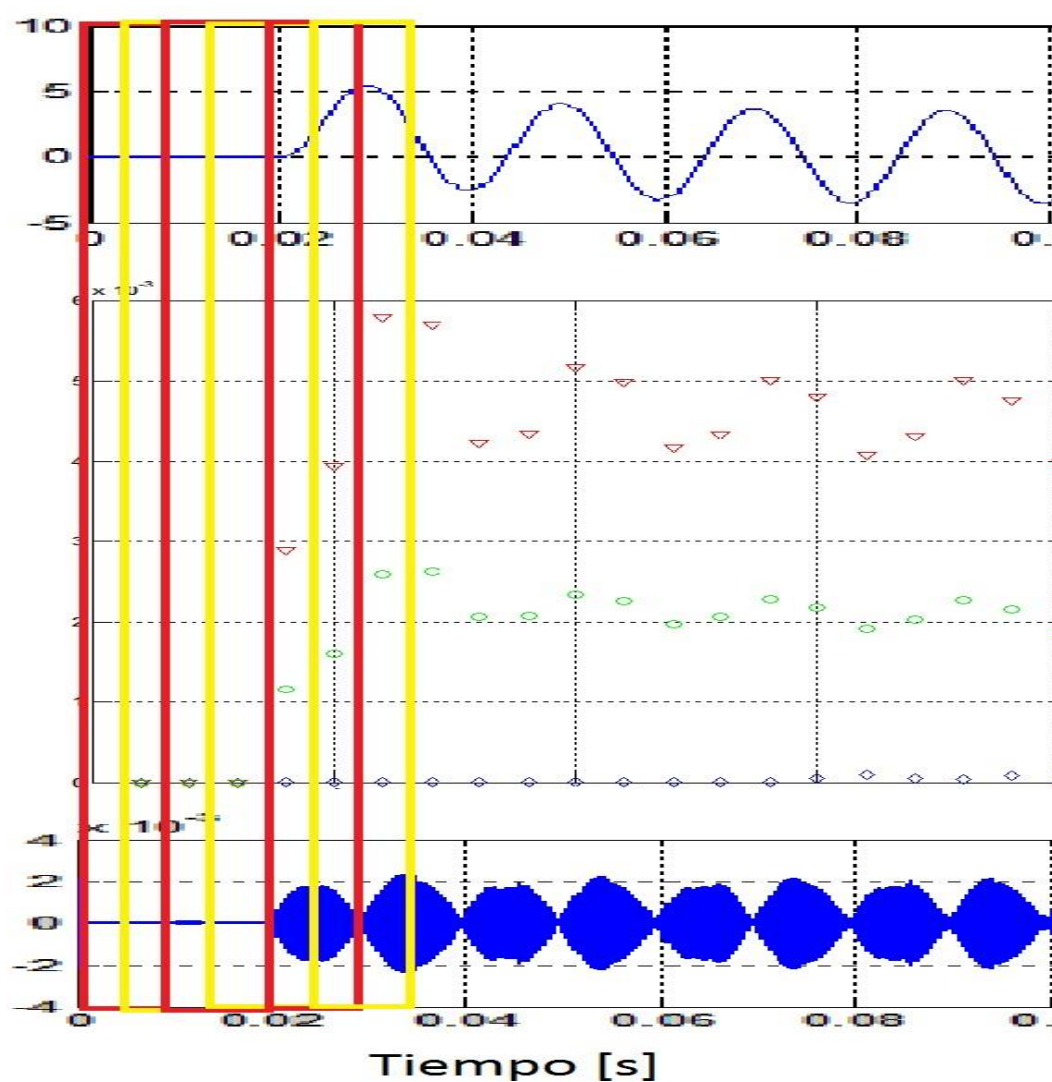


Fig. 4-64 Ejemplo de operación del relé diferencial con discriminación por Wavelet.

A continuación se presenta el código implementado en Matlab para realizar el modelo y ver el comportamiento del mismo:

```
% Limpiamos el historial anterior del espacio de trabajo.
clear all
clc
% Simulamos el fichero SIMULINK energización.
tiemposim=0.2;
sim('energización',tiemposim);
t1=1; t2=length(IdifA);
% Indicamos qué valor tiene nuestra aproximación de la señal y creamos
una señal con este valor.
appx=0.03;
n=0;
for a=t1:t2
    n=n+1;
    if IdifA(a)<appx
        if IdifA(a)>-appx
            IdifA2(n)=0;
        end
    end
    if IdifA(a)>appx
        IdifA2(n)=IdifA(n);
    end
    if IdifA(a)<-appx
        IdifA2(n)=IdifA(n);
    end
end
% Realizamos el análisis Wavelet para las dos señales.
s = IdifA2(t1:t2);
l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D11 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);

s = IdifA(t1:t2);
```

```

l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D1 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);
%-----
% Implementamos la ecuación (3.3).
k=round(t2/(tiemposim*100));
w=1;
v=round(k/2);
n=0;
I1=0;
p=38;
for b=1:p
    if b>1
        k=k+v;
        w=w+v;
    end
    x=0;
    y=0;
    for a=w:k
        x=x+(abs(D1(a)))^2; y=y+(abs(D11(a)))^2;
    end
    n=n+1;
    I1(n)=x;
    I11(n)=y;
    I1(1)=0;
    I1(2)=0;
    I1(3)=0;
end
%-----
% Visualizamos los datos mediante gráfica.
G03=figure(5);
subplot(3,2,1);
plot(Tiempo,IdifA(t1:t2))
hold on

```

```
plot(Tiempo, IdifA2, 'r')
grid on
subplot(3,2,2);
plot(Tiempo, D1);
hold on
plot(Tiempo, D11, 'r')
title('Energización')
grid on
% Repetimos estos pasos para la falta en el primario y secundario.
% Visualizamos los datos obtenidos de la ecuación (3.3).
G04=figure(4);
    plot(I1, 'd')
hold on
plot(I2, 'vr')
hold on
plot(I3, 'og')
grid on
title('Real')
legend('Original Energización', 'Original Primario', 'Original
Secundario');
%-----
G06=figure(6);
    plot(I11, 'd')
hold on
plot(I12, 'vr')
hold on
plot(I13, 'og')
grid on
title('Aproximación')
legend('Aproximación Energización', 'Aproximación Primario',
'Aproximación Secundario');
```

Una vez implementado el código indicado se obtienen las siguientes gráficas, donde se ve en la primera gráfica que, en azul está representada, la señal original y, en rojo, la señal aproximada, aunque en el análisis de Wavelet solo se aprecia el rojo, si se realiza un zoom se puede apreciar la pequeña diferencia.

Al proceder a la evaluación de los datos obtenidos de la ecuación (4.3), se ve como en los dos casos, ya sea para la señal original como para la señal aproximada, una diferencia entre los tres casos simulados, aunque en la señal original esta diferencia es notable y mucho más estables los datos de energización. Por lo que se puede afirmar que la evaluación de la señal original es más oportuna que la señal aproximada en este caso.

Este modelo no se ha llevado a cabo ya que para este tipo de transformador es razonable indicar que el modelo es válido, pero al simularlo en otro modelo de transformador (mismo modelo pero con diferentes datos), los resultados no han sido satisfactorios, por lo que no se lleva a cabo la implementación en SIMULINK de este algoritmo de protección diferencial de transformadores de potencia.

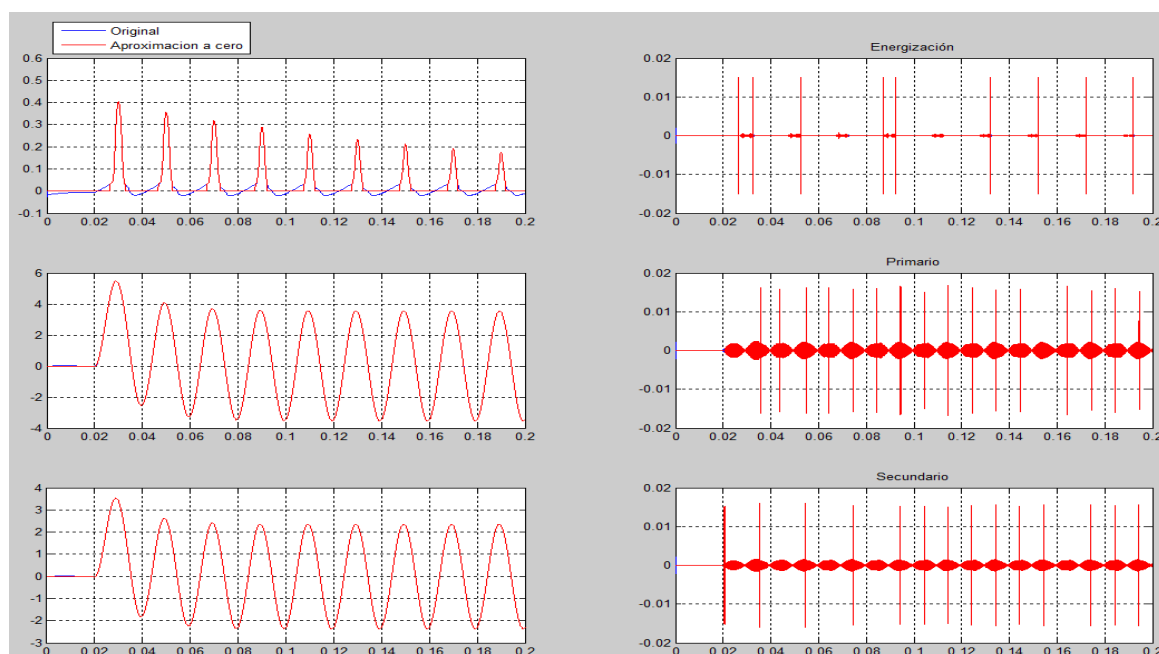


Fig. 4-65 Gráfica señal original vs señal aproximada.

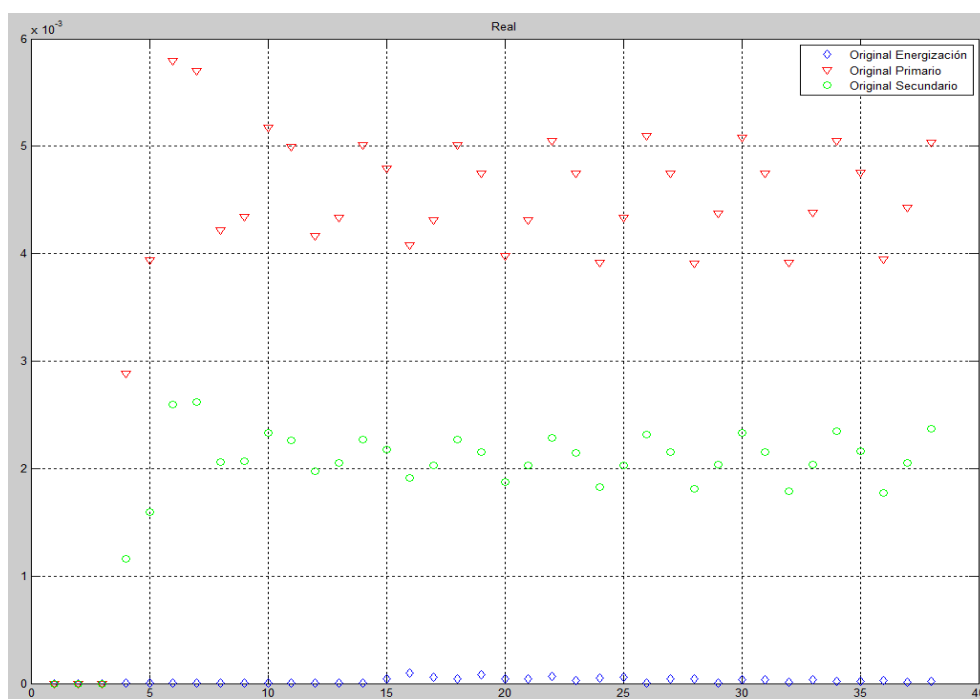


Fig. 4-66 Datos obtenidos de la ec. 4.3 para la señal original.

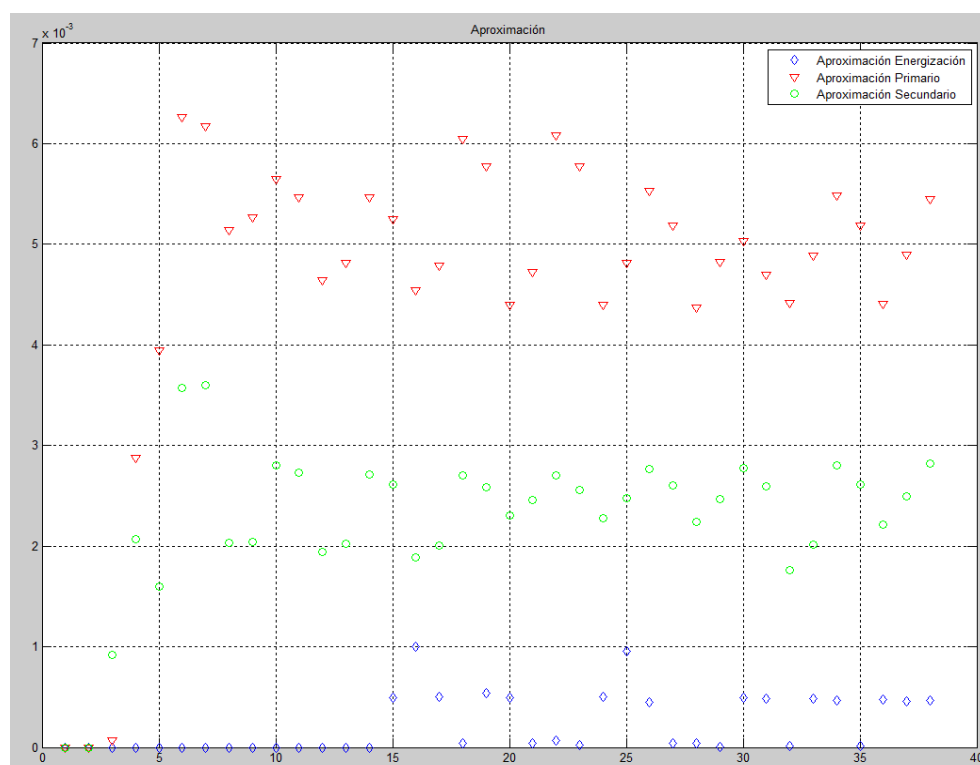


Fig. 4-67 Datos obtenidos de la ec. 4.3 para la señal aproximada.

4.4.3 Tercer modelo

Para este modelo se ha contado con todos los pequeños avances que se han obtenido durante la realización de los modelos anteriores, por lo que se propone una cuarta ecuación para llevar a cabo el análisis de los datos obtenidos de la TW, Para ello se realiza un modelo utilizando la TW db1, hasta el detalle primero, sólo se analiza la señal original y el análisis se realiza como se indica en la figura 4.64.

$$I_{Ret} = \int_{t_1}^{t_2} db1 dt \quad (4.4)$$

A continuación se presenta el código implementado en MATLAB.

```
% Limpiamos el historial anterior del espacio de trabajo.
clear all
clc
% Simulamos el fichero SIMULINK energización.
tiemposim=0.2;
sim('arranque',tiemposim);
t1=1;
t2=length(IdifA);
%-----
% Realizamos el análisis Wavelet.
s = IdifA(t1:t2);
l_s = length(s);
[cA1,cD1] = dwt(s,'db1');
A1 = upcoef('a',cA1,'db1',1,l_s);
D1 = upcoef('d',cD1,'db1',1,l_s);
%-----
% Implementamos la ecuación (3.4).
k=round(t2/(tiemposim*100));
w=1;
k1=k;
n=0;
p=19;
for b=1:p
    if b>1
```

```

    k=k+k1;
    w=w+k1;
    end
    v=0;
    z=0;
    for x=w+1:k
        v=(Tiempo(x))-(Tiempo(x-1));
        z=z+(v*D1(x));
    end
    n=n+1;
    I1(n)=z;
end
%-----
% Visualizamos los datos mediante gráfica.
figure(1)
subplot(3,2,1);
plot(Tiempo,IdifA(t1:t2));grid on
subplot(3,2,2);
plot(Tiempo,D1);
grid on
% Repetimos estos pasos para la falta en el primario y secundario.
% Visualizamos los datos obtenidos de la ecuación (3.3).
figure(2)
plot(I1,'d');
hold on
plot(I2,'vr');
hold on
plot(I3,'og');
grid on;
title('Real')
legend('Original Energización', 'Original Primario', 'Original
Secundario');

```

Una vez implementado el código se procede a su simulación y se obtienen las gráficas que aparecen a continuación, donde en la primera se puede ver la señal de la intensidad diferencial original y a su lado la Transformada Wavelet de dicha señal.

En la segunda gráfica se aprecia como los datos obtenidos de la ecuación (4.4) se comportan de una forma uniforme, pero se obtienen datos positivos y datos negativos, cuando es una falta interna, por lo que la implementación de este modelo en un bloque SIMULINK puede llegar a ser muy tediosa, por tanto, no se lleva a cabo este proceso y se detiene la implementación de este código.

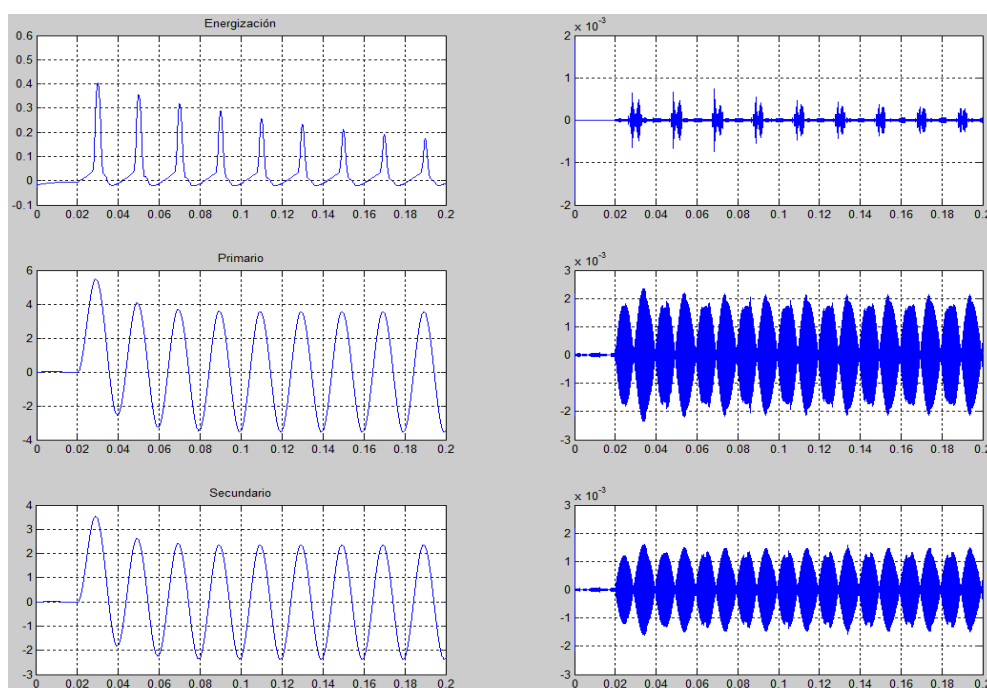


Fig. 4-68 Análisis TW para señal de falta y energización.

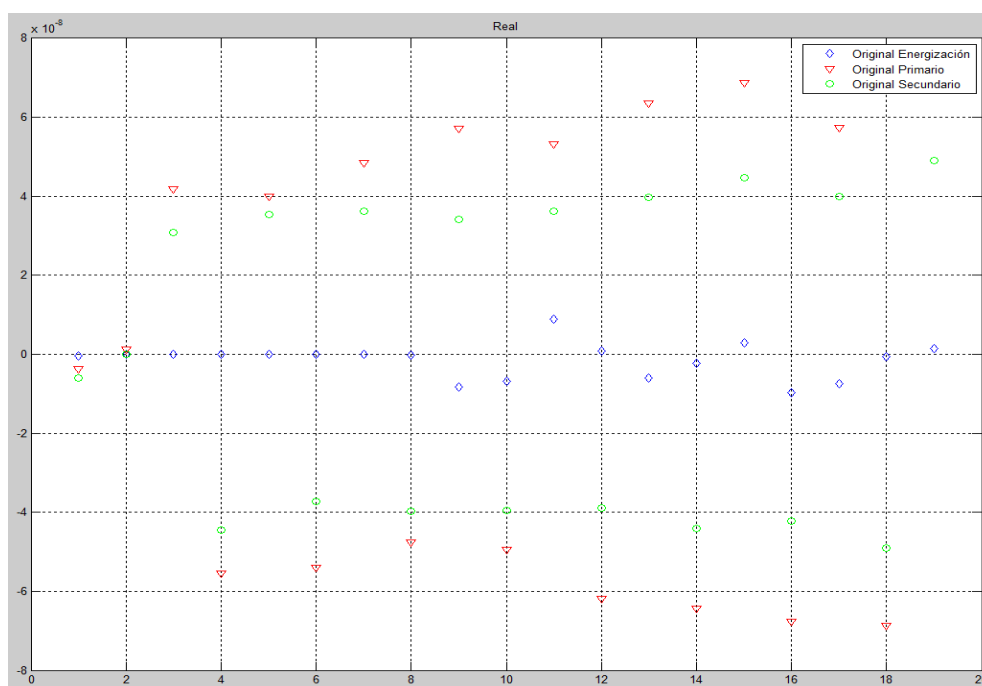


Fig. 4-69 Datos obtenidos de la ec. 3.4.

4.5 Modelo propuesto

El modelo propuesto se basa en toda la experiencia obtenida de todos los casos expuestos anteriormente y de la infinidad de simulaciones realizadas durante el actual proceso, por lo que se ha llegado a la conclusión de implementar un modelo similar al tercer modelo, con la única diferencia de aplicar la ecuación (4.4) para la mitad de la señal obtenida del análisis Wavelet, con el fin de no obtener datos positivos y negativos en las implantación del modelo.

El código implementado en MATLAB es similar al del tercer modelo con una pequeña modificación, por lo que se procede directamente a mostrar los resultados obtenidos del modelo implementado.

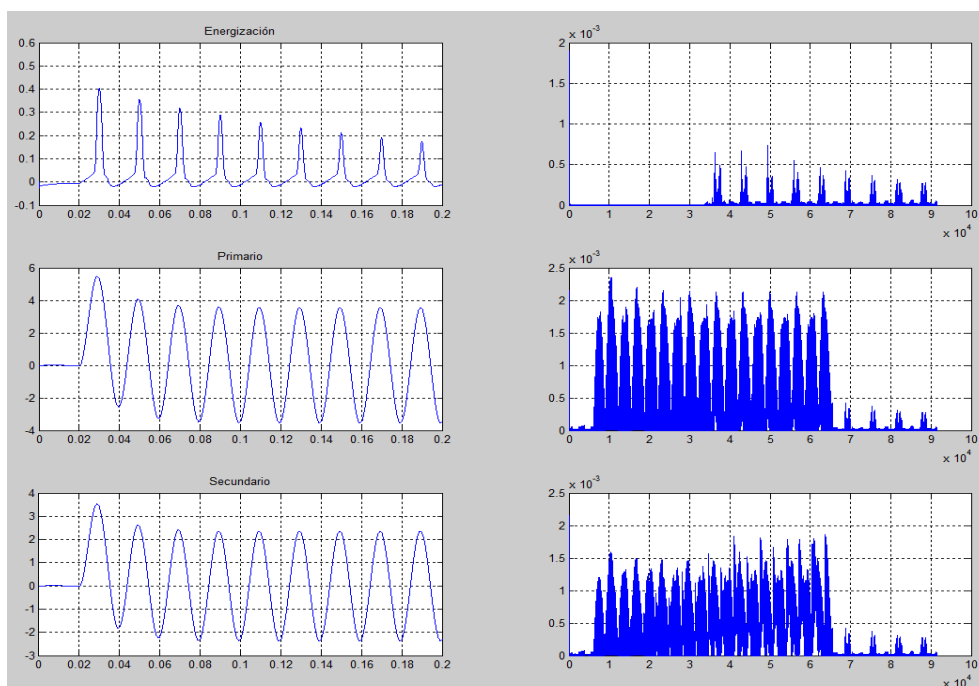
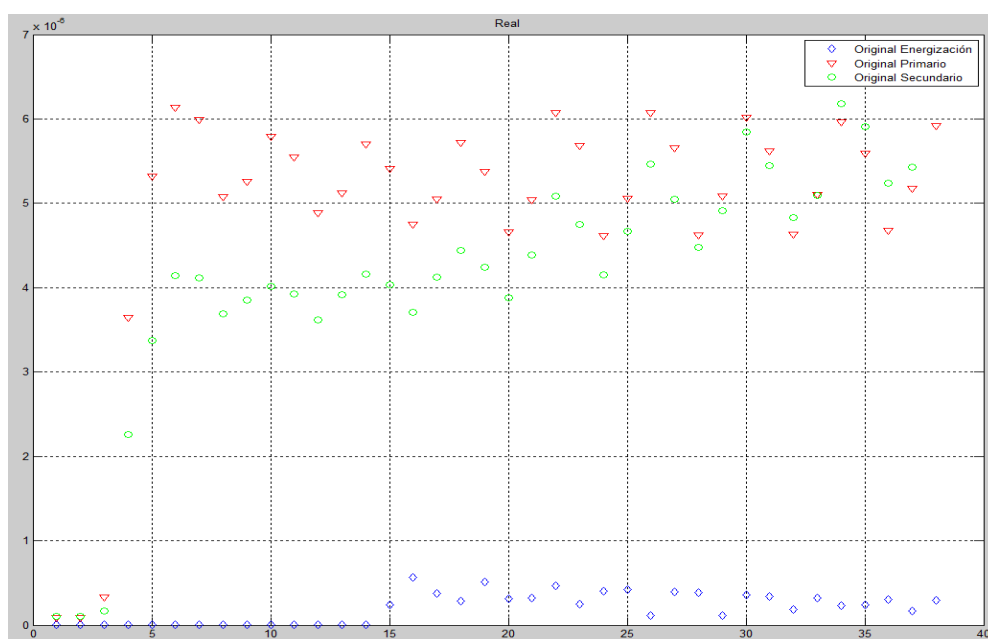
Fig. 4-70 Señal I_d y TW.

Fig. 4-71 Datos obtenidos de la ec. 4.4 para primer modelo de transformador.

Este modelo se considera definitivo ya que la respuesta ante una falta interna es rápida y hay una notable diferencia entre los datos obtenidos de las faltas internas y una corriente de energización del transformador. Este modelo se ha simulado en tres transformadores con diferentes características y los resultados han sido satisfactorios como se muestra en las figuras siguientes.

Por ello, en el siguiente apartado se procederá a implantar el modelo propuesto en un bloque SIMULINK, para poder ser utilizado en dicho programa informático.

El primer transformador utilizado posee las siguientes características:

Variable	Dato
U1 [kV]	2,40
U2 [kV]	0,60
S [kVA]	225
f [Hz]	50

El segundo transformador utilizado posee las siguientes características:

Variable	Dato
U1 [kV]	10,00
U2 [kV]	3,00
S [kVA]	225
f [Hz]	50

El segundo transformador utilizado posee las siguientes características:

Variable	Dato
U1 [kV]	6,60
U2 [kV]	0,40
S [kVA]	100
f [Hz]	50

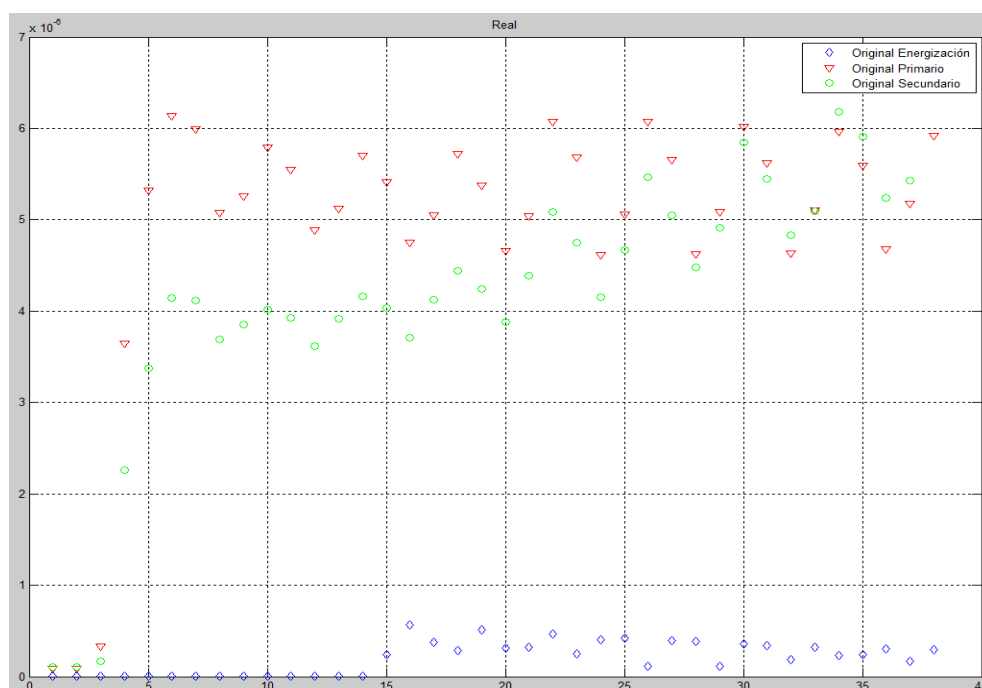


Fig. 4-72 Datos obtenidos de la ec. 4.4 para segundo modelo de transformador.

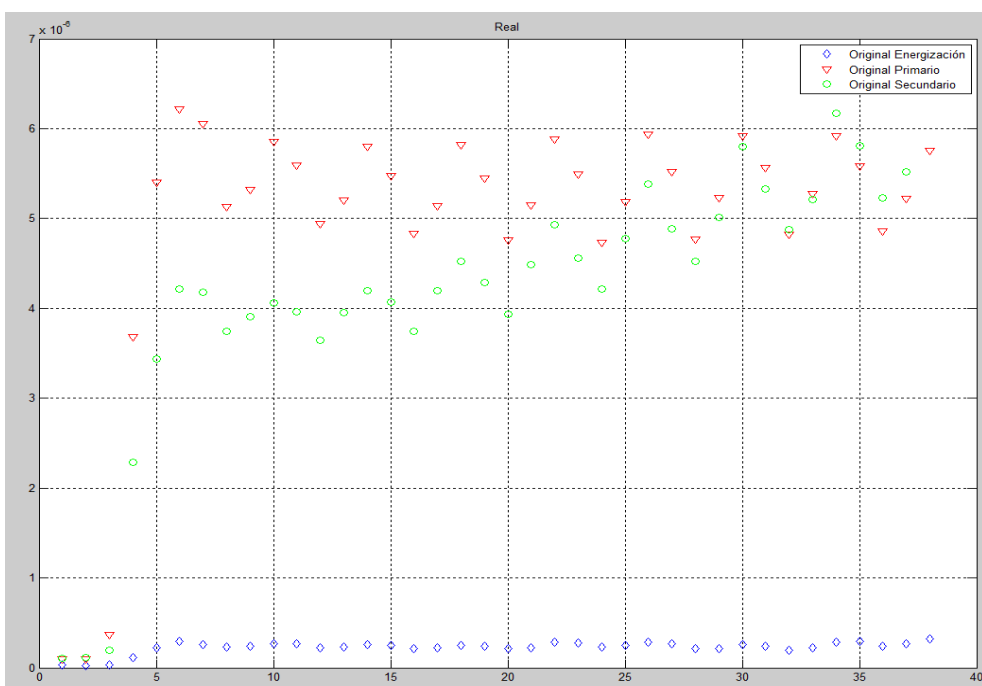


Fig. 4-73 Datos obtenidos de la ec. 4.4 para tercer modelo de transformador.

4.6 Bloque MATLAB-SIMULINK realizado

En el actual apartado se va a implementar el bloque SIMULINK del relé de protección diferencial con discriminación mediante transformada wavelet para transformadores de potencia como se puede ver en la figura 4-74. Para ello se va a empezar tomando las medidas de intensidad que circulan por el devanado primario y por el devanado secundario. Una vez obtenidas las medidas se pasan mediante el bloque “Gain”, en el que dividimos la señal obtenida por la intensidad base del sistema. Una vez se tienen las dos intensidades en por unidad (pu) ya se pueden comparar. En este caso, por un lado se restan para obtener la intensidad diferencial y, por otro, se suman para obtener la intensidad antagonista. Todo lo explicado anteriormente se muestra en la figura 4-75.

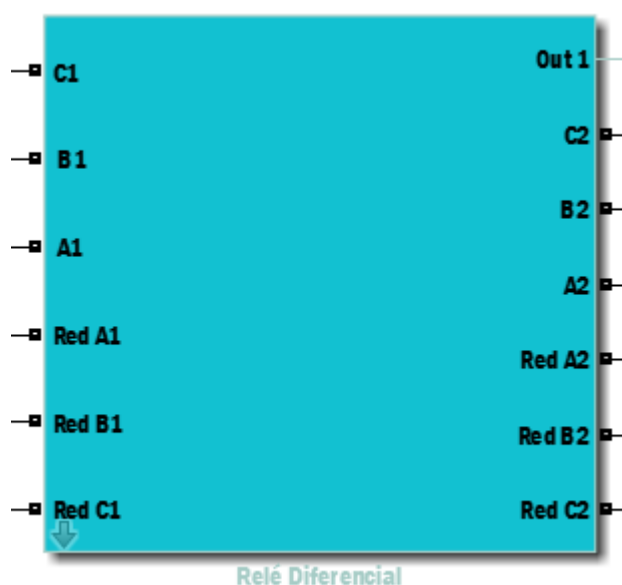


Fig. 4-74 Bloque SIMULINK del relé diferencial.

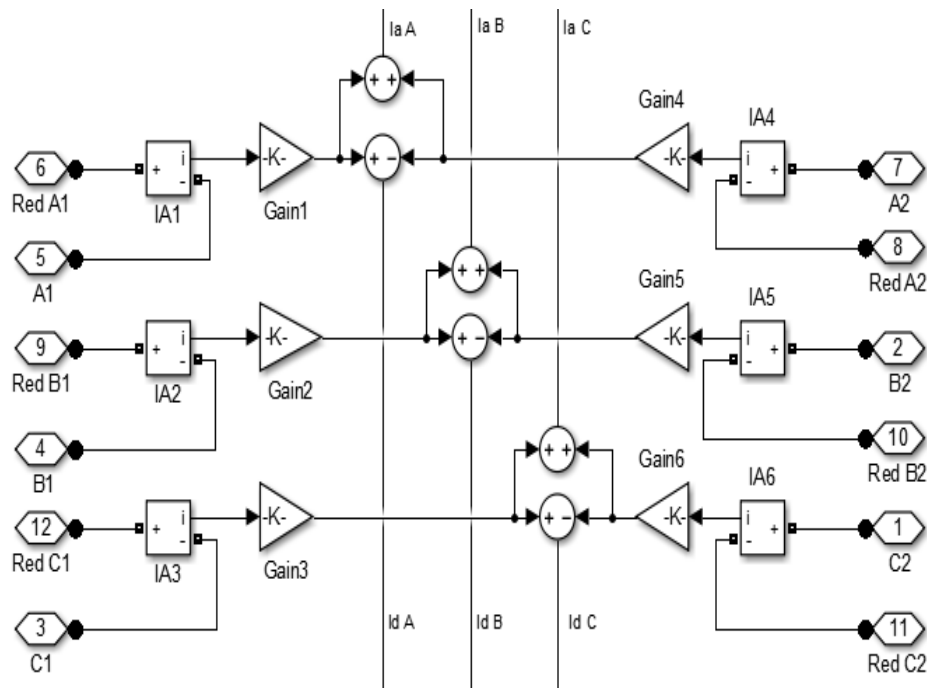


Fig. 4-75 Toma de datos, paso a pu y obtener Id e Ia.

Una vez obtenidas la intensidad diferencial y la intensidad antagonista se implementa la protección de porcentaje, como se ha explicado en el apartado 2.4.4. Se implementa este relé para diferenciar entre faltas externas y faltas internas o corriente de conexión.

La implementación de este bloque se puede ver en la figura 4-76, donde se puede observar que inicialmente se coloca un bloque “Gain” en la intensidad antagonista para implementar la pendiente de la recta y se utiliza una constante “m1” para implementar el umbral de disparo de la recta horizontal, con la combinación de estas dos constantes se obtiene la curva de disparo del relé.

En el caso en el que el valor de la intensidad no se encuentre en la zona de actuación este bloque manda una señal de “0”, y en el momento que la señal se encuentra en la zona de actuación esta manda la señal original al siguiente bloque, el cuál realizará la comprobación, mediante la transformada Wavelet, para discriminar entre falta interna o corriente de conexión.

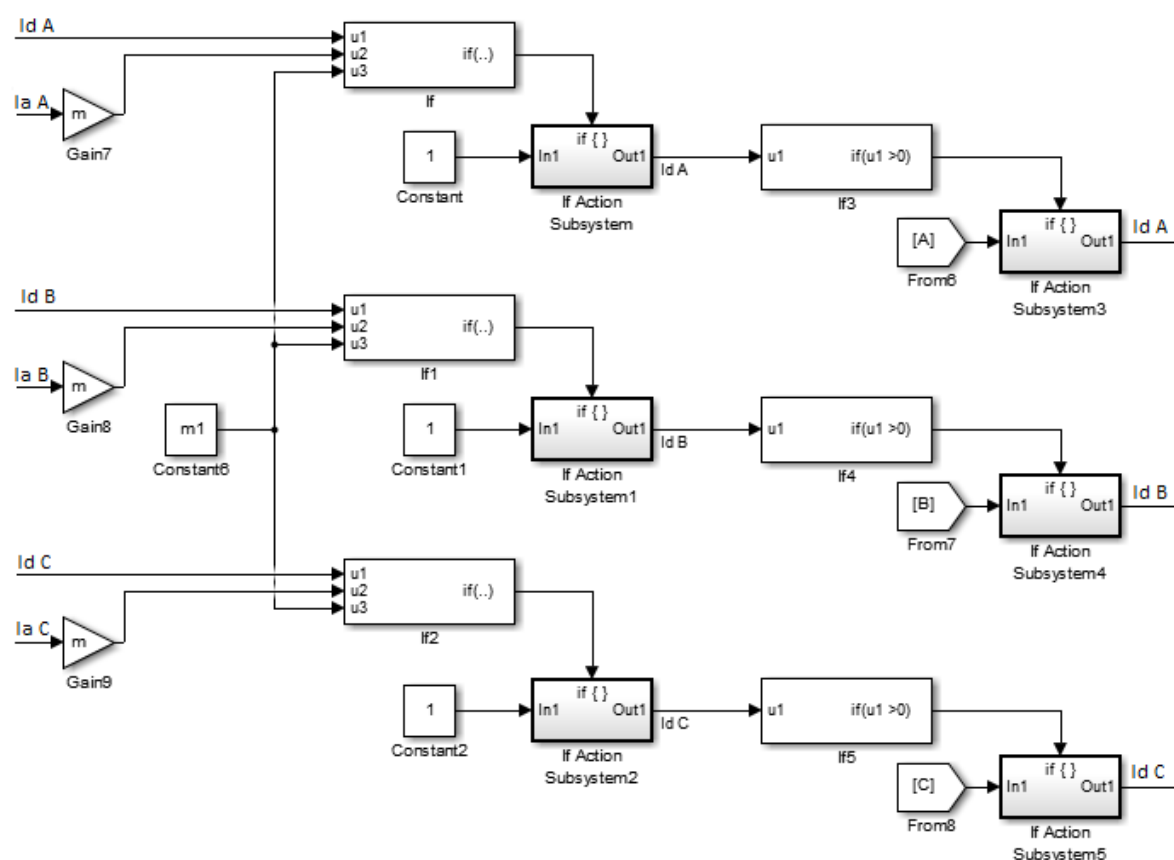


Fig. 4-76 Bloques SIMULINK para implementar relé de porcentaje.

De los pasos anteriores ya se puede conocer si la perturbación es interna o externa al transformador, así que, si las intensidades diferenciales que se obtienen al final de este bloque son distintas de cero, se procederá a evaluar esta señal mediante la transformada Wavelet para discriminar entre una falta interna o una corriente de conexión.

Para este fin se utilizará el bloque SIMULINK “S_Function” y se implementará en él el código expuesto en los modelos anteriores para discriminar entre falta interna o corriente de conexión. Se utiliza un bloque por cada fase y después de estos se coloca un bloque “If” para indicar que cualquiera de los valores que dan los tres bloques anteriores, si supera un valor umbral “m2”, mande una señal de valor uno fuera de nuestro relé diferencial, en caso contrario, manda un cero, por tanto, este no actúa sobre el sistema. Este proceso se puede ver en la siguiente figura.

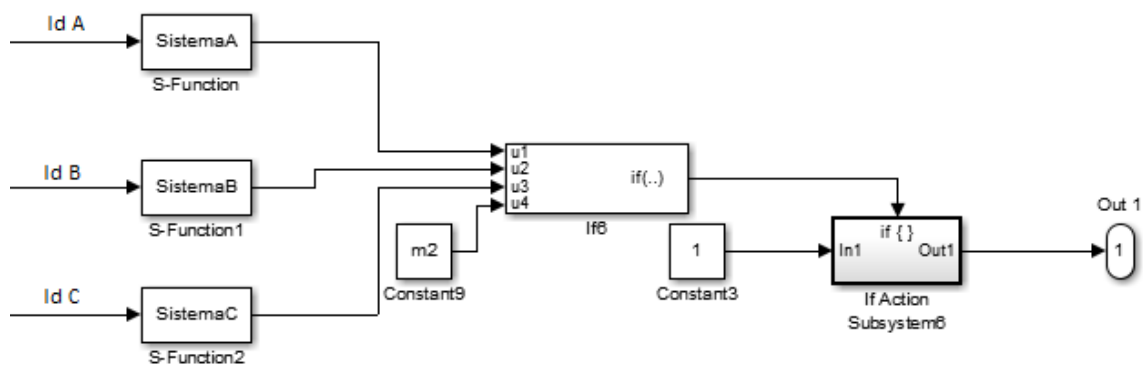


Fig. 4-77 Bloque implementación transformada wavelet.

Los parámetros que solicita el relé propuesto son:

- Potencia trifásica (VA), este parámetro es la potencia aparente trifásica del transformado que se va a proteger.
- Tensión trifásica 1 (V), este parámetro es la tensión trifásica en el devanado primario del transformador.
- Tensión trifásica 2 (V), este parámetro es la tensión trifásica en el devanado secundario del transformador.
- Pendiente unidad porcentual, este parámetro nos indica la pendiente que tiene la protección diferencial de porcentaje, el cual puede ir de 0 a 1.

- Umbral corriente porcentual, este parámetro fija el valor en [p.u.] mínimo de la intensidad diferencial por el que el relé porcentual debe de actuar y mandar la señal a la TWD.
- Umbral Wavelet, este parámetro se obtiene en laboratorio mediante simulación dependiendo del tipo de transformador.

Si se pulsa dos veces el bloque propuesto aparece la siguiente pantalla con los datos anteriormente expuestos.

Block Parameters: Relé Diferencial

Relé diferencial (mask)

El bloque es un relé diferencial para transformadores de potencia con discriminación wavelet.

NOTA: Para utilizar el actual bloque en un sistema, debemos insertar el bloque SIMULINK "POWERGUI" y selecciona la opción de tiempo discreto y $T_s = 2e-6$ s. Por otra parte debemos ir a "Model Configuration Parameters" del archivo SIMULINK y elegir la opción Type: Fixed-step y en la opción Fixed-step size = $2e-6$.

Parameters

Potencia trifásica (VA)	225000
Tensión trifásica 1 (V)	2400
Tensión trifásica 2 (V)	600
Pendiente unidad porcentual	.45
Umbral corriente disparo	.3
Umbral Wavelet	1e-6

OK Cancel Help Apply

Fig. 4-78 Máscara del relé propuesto.

4.6.1 Simulación y verificación del relé

A continuación se procederá a simular y verificar el relé diferencial propuesto en distintas situaciones y distintos transformadores indicados en el apartado 4.5.

4.6.1.1 Transformador 1

El primer transformador utilizado posee las siguientes características:

Variable	Dato
U1 [kV]	2,40
U2 [kV]	0,60
S [kVA]	225
f [Hz]	50

Los datos introducidos en la máscara del relé son:

Parámetro	Valor
Potencia trifásica (VA)	225000
Tensión trifásica 1 (V)	2400
Tensión trifásica 2 (V)	600
Pendiente unidad porcentual	0,45
Umbral corriente disparo	0,30
Umbral Wavelet	1e-6

4.6.1.1.1 Energización

En este caso se va a realizar el siguiente conexionado para ver el comportamiento del relé ante una energización del relé:

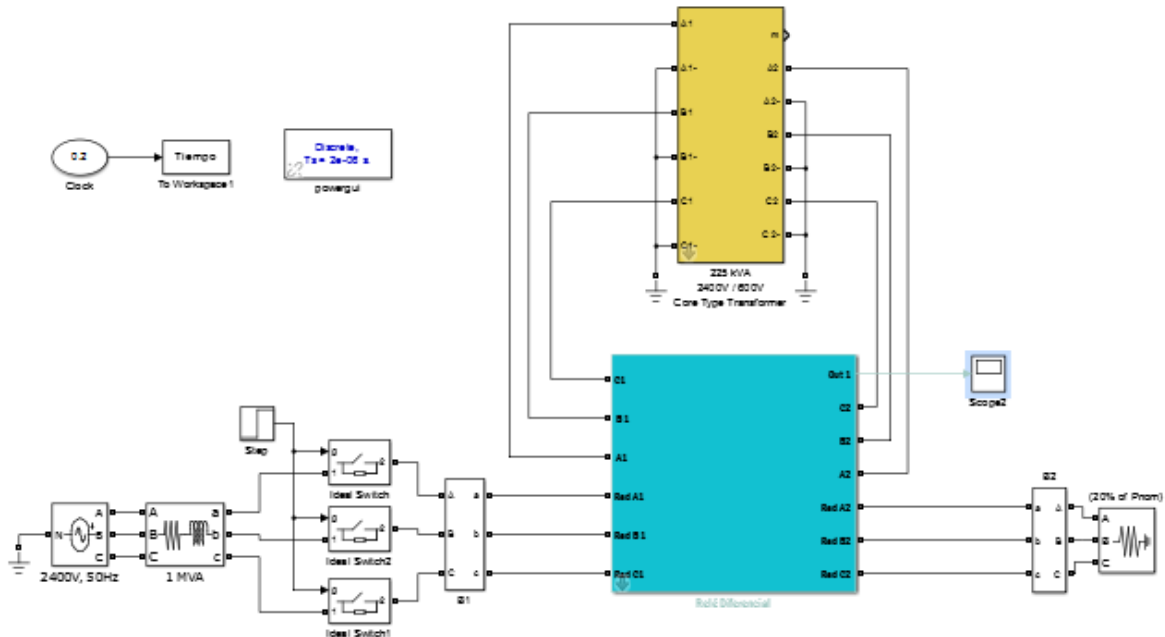


Fig. 4-79 Esquema conexión relé diferencial propuesto para simular una energización.

Una vez simulado el circuito anterior se puede observar en la figura 4-80 la intensidad diferencial obtenida del transformador para las tres fases. En la figura 4-81 se puede ver la intensidad diferencial que el relé diferencial de porcentaje manda a analizar por la transformada Wavelet y, como se puede comprobar, la fase A es la única que pasa el límite. Esta señal será procesada por el bloque que implementa la TWD y, finalmente, al ser una señal de energización, el relé diferencial no actúa como se observa en la figura 4-82, por tanto, funciona correctamente.

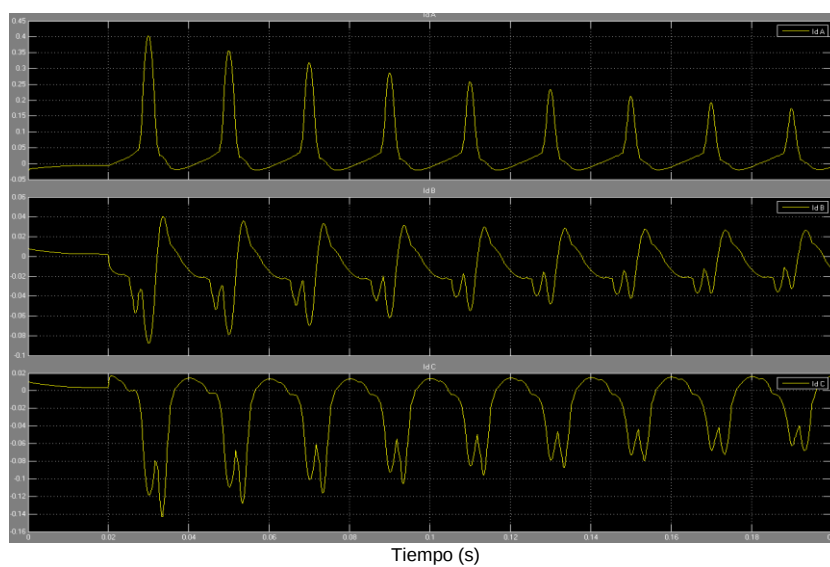


Fig. 4-80 Intensidad diferencial obtenida del transformador.

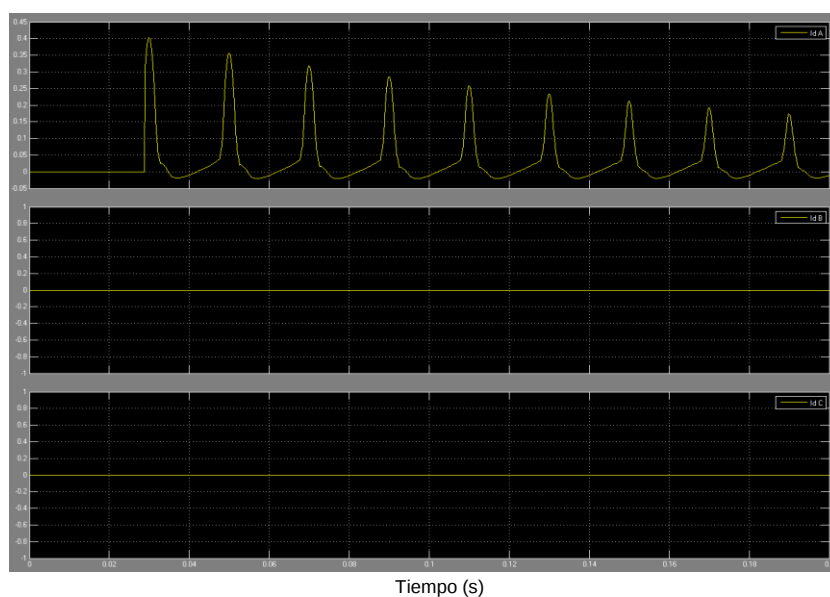


Fig. 4-81 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.

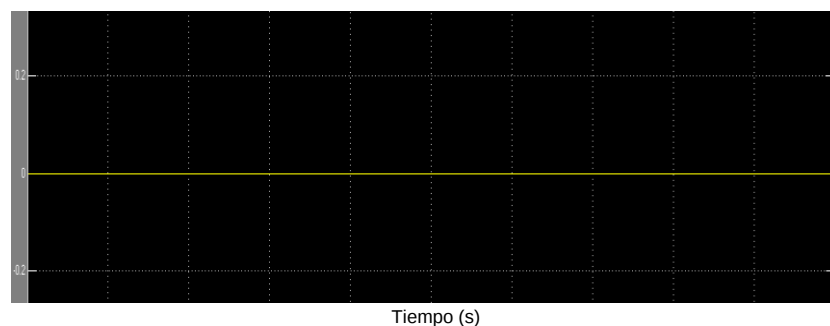


Fig. 4-82 Señal de salida del relé diferencial propuesto.

4.6.1.1.2 Falta externa

En este caso se va a simular un cortocircuito externo al transformador y se observará la respuesta del relé propuesto, ya que en este caso no debe actuar. El esquema de conexión es similar al anterior con la diferencia que ahora se va a colocar un bloque simulink para provocar la falta deseada.

Se puede observar, como en el caso anterior, las tres señales que interesan en este caso. Primero la señal diferencial obtenida del transformador (figura 4-83). Una vez procesada esta señal por el relé de porcentaje, se puede ver en la figura 4-84, que la señal que sale es cero, ya que al ser una falta externa este no debe de actuar y por tanto, el relé diferencial con discriminación Wavelet tampoco actúa sobre el sistema.

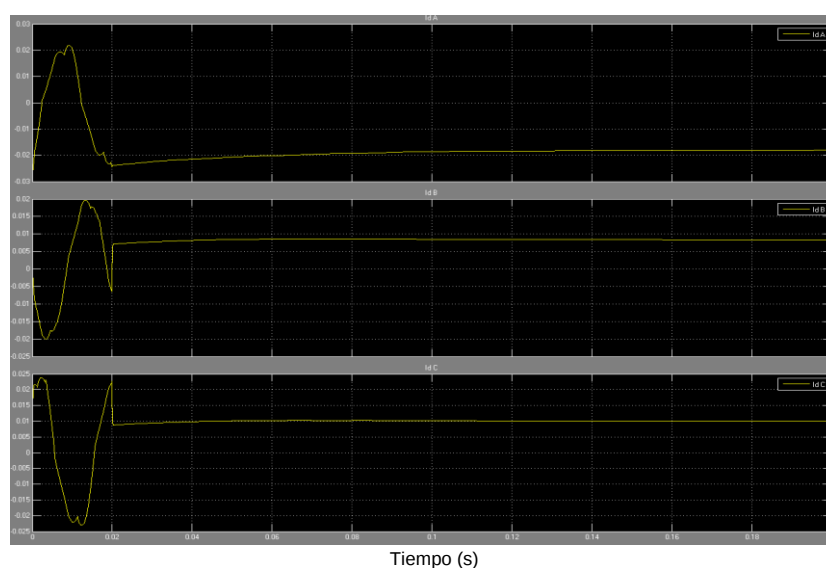


Fig. 4-83 Intensidad diferencial obtenida del transformador.

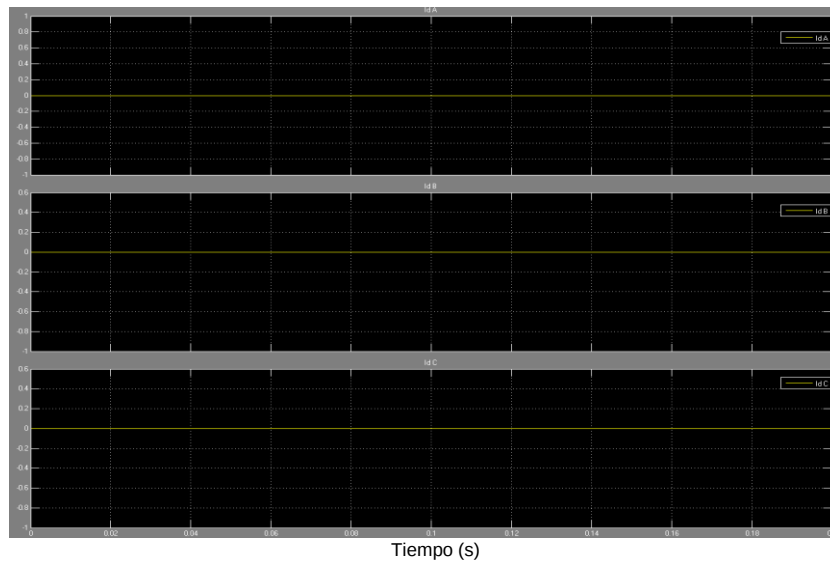


Fig. 4-84 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.

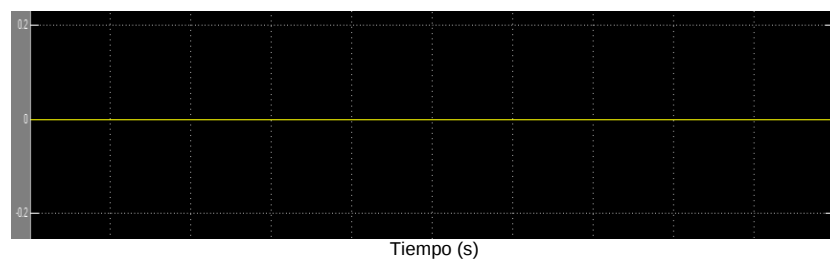


Fig. 4-85 Señal de salida del relé diferencial propuesto.

4.6.1.1.3 Falta interna

Ahora se va a simular un cortocircuito producido en el transformador, por lo que el relé diferencial propuesto debe actuar y desconectar el transformador a proteger. En la primera simulación se realizará un esquema de conexión como el mostrado en la figura 4-79, con la excepción de que se eliminan los contactos de conexión y se coloca el bloque simulink para simular faltas. Una vez simulado se ve como el relé de porcentaje manda la señal al bloque TWD y el relé propuesto manda la señal de disparo a los interruptores del transformador.

En el segundo caso se realizará el esquema de conexión de la figura 4-92 y se puede ver como la señal de entrada al relé cesa, ya que se abren los interruptores del transformador.

Por otra parte se ha añadido un bloque a los interruptores para simular el retardo de estos a la hora de actuar, por tanto, el tiempo de actuación del conjunto es mayor de los 10 ms que tarda el relé diferencial en actuar. En este caso se le ha programado 3 ms.

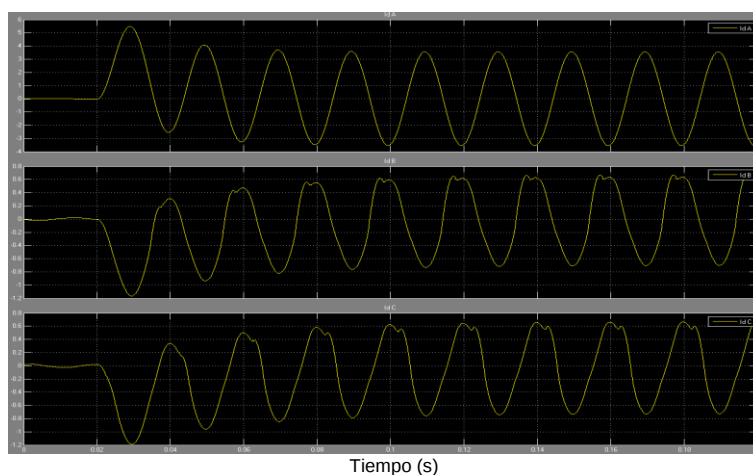


Fig. 4-86 Intensidad diferencial obtenida del transformador primer caso.

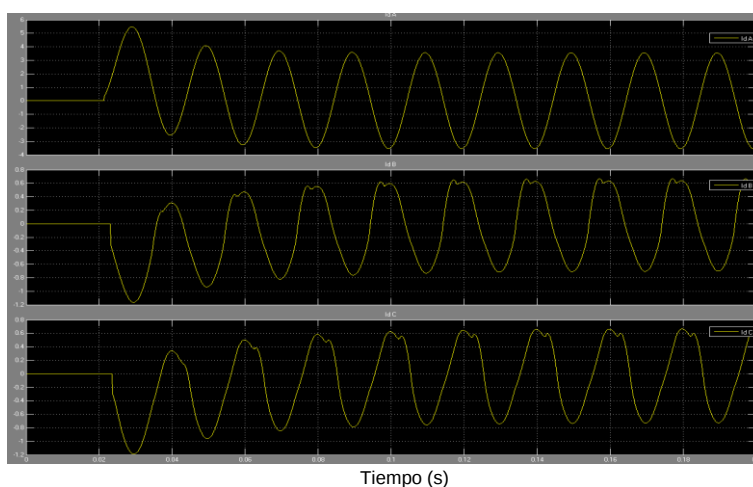


Fig. 4-87 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD primer caso.

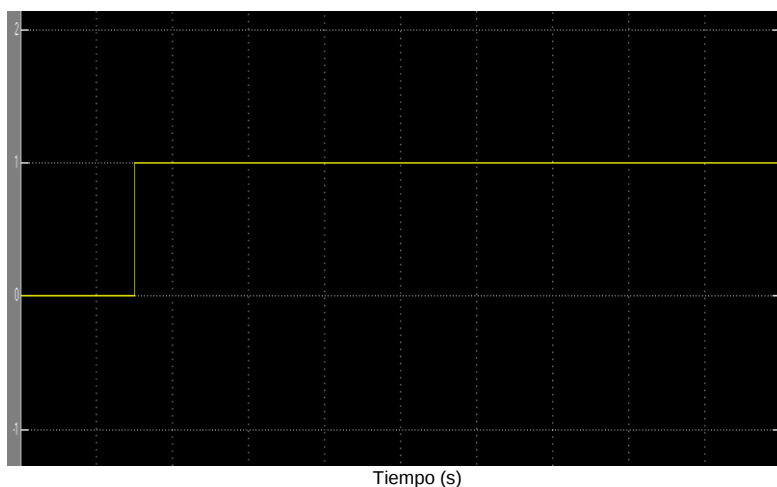


Fig. 4-88 Señal de salida del relé diferencial propuesto primer caso.

Para realizar el segundo caso se crea un bloque para implementar el interruptor trifásico controlado por el relé diferencial propuesto. En la figura 4-92 se puede ver el esquema de conexión realizado para desarrollar el caso que nos ocupa.

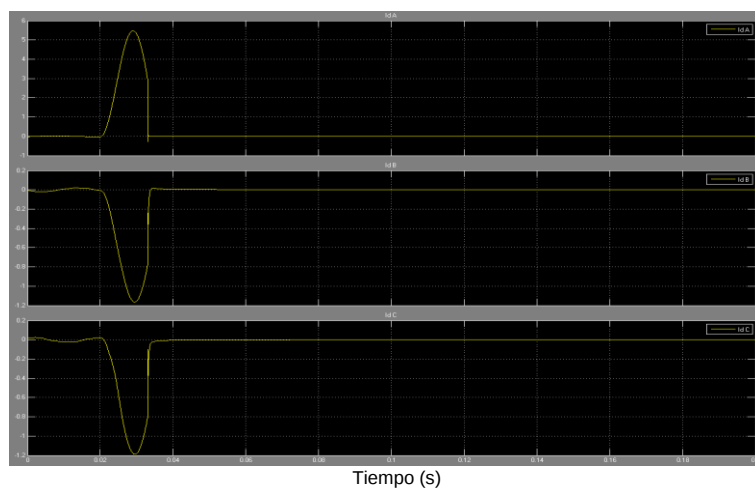


Fig. 4-89 Intensidad diferencial obtenida del transformador segundo caso.

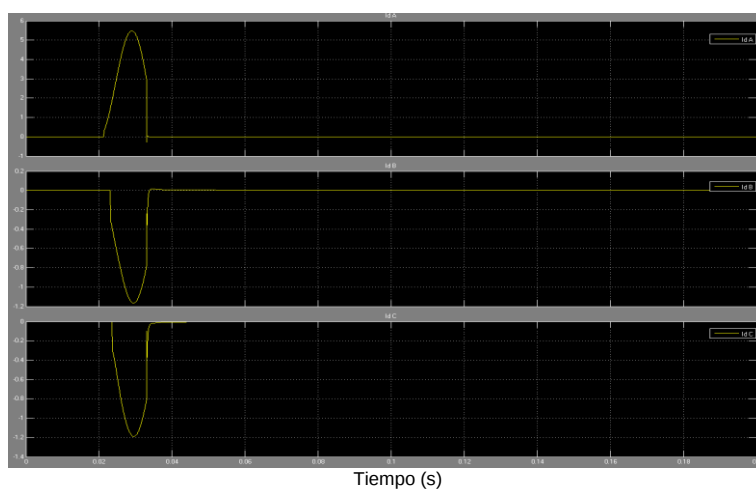


Fig. 4-90 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD segundo caso.

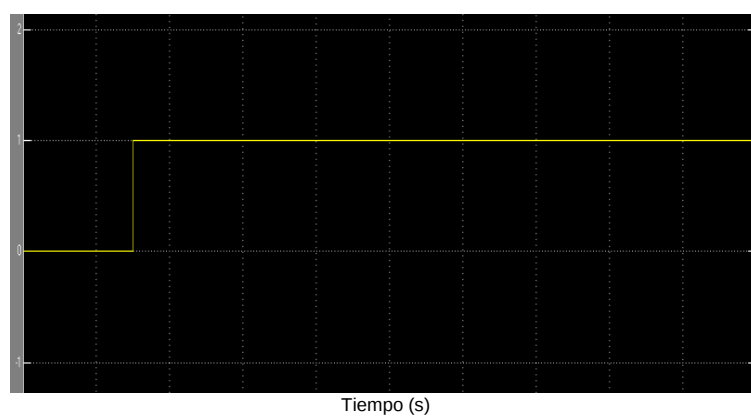


Fig. 4-91 Señal de salida del relé diferencial propuesto segundo caso.

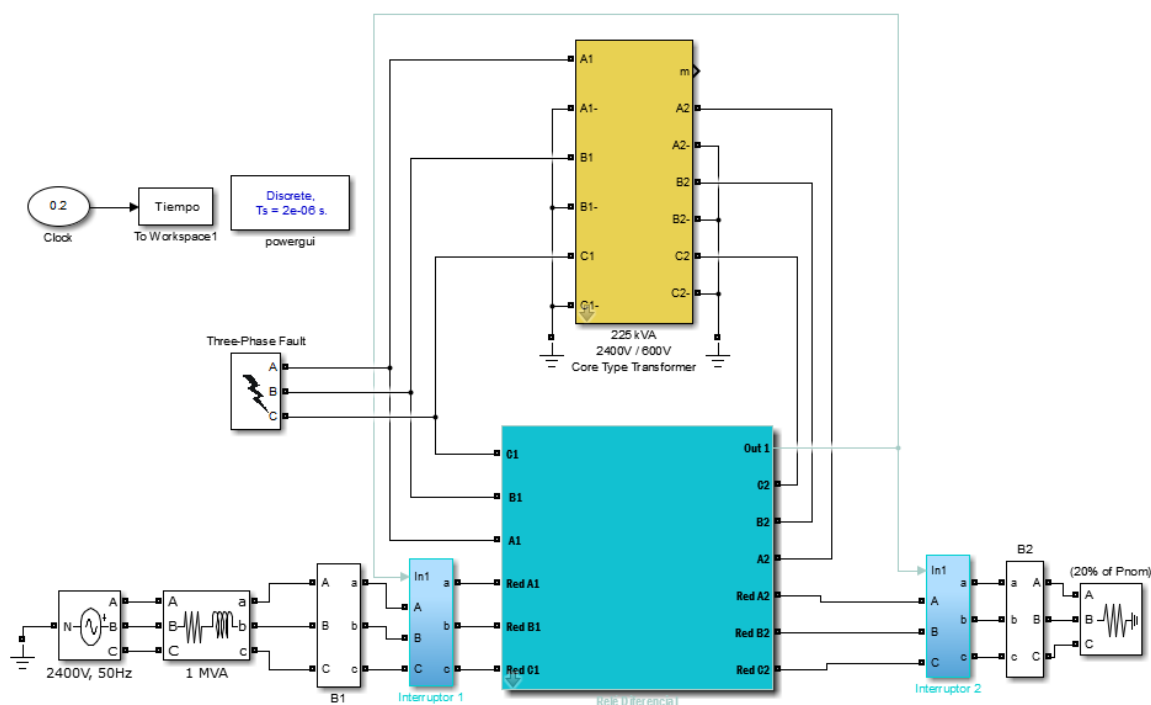


Fig. 4-92 Esquema conexión relé diferencial propuesto para simular una falta interna.

4.6.1.1.4 Verificación del relé en diferentes casos

En este caso se va a analizar la respuesta del relé diferencial para transformadores de potencia con discriminación mediante transformada Wavelet en la situación de energización a los 20 ms y una falta interna a los 80 ms.

Se puede ver como a los 20 ms el relé de porcentaje manda la señal al bloque TWD y este no manda la señal de interrupción del suministro, pero a los 90 ms (10 ms después de la falta) manda la señal para la interrupción del suministro de energía y 3 ms después se queda el transformador sin alimentar hasta su reseteo.

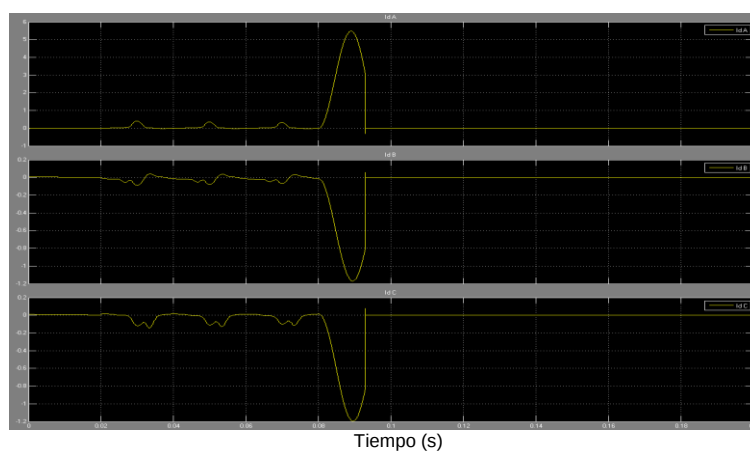


Fig. 4-93 Intensidad diferencial obtenida del transformador.

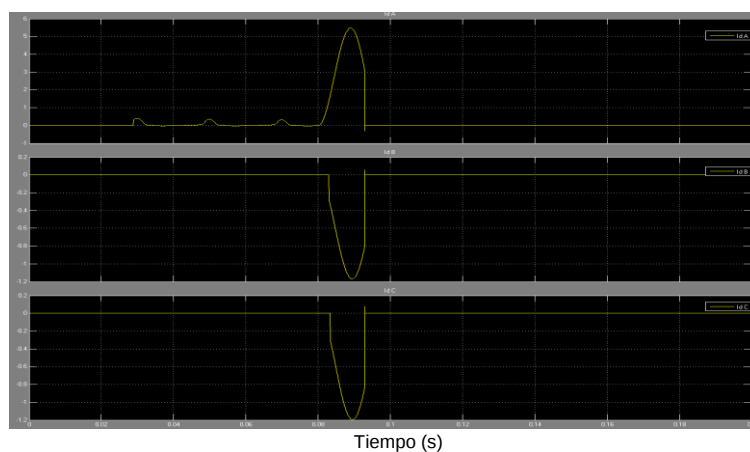


Fig. 4-94 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.

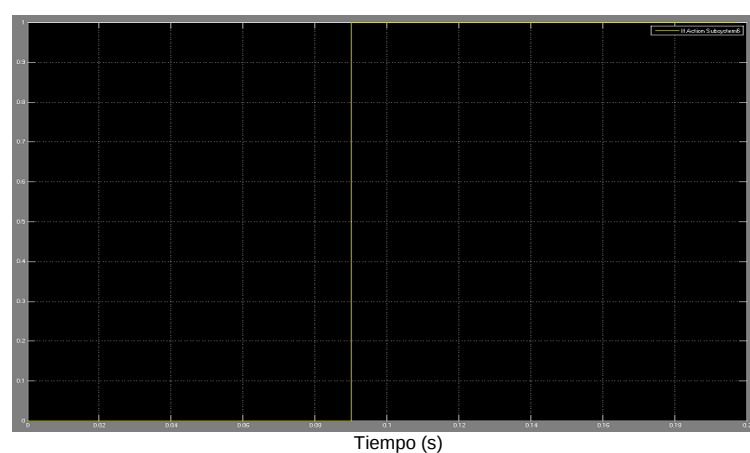


Fig. 4-95 Señal de salida del relé diferencial propuesto.

4.6.1.2 Transformador 2

El segundo transformador utilizado posee las siguientes características:

Variable	Dato
U1 [kV]	10,00
U2 [kV]	3,00
S [kVA]	225
f [Hz]	50

Los datos introducidos en la máscara del relé son:

Parámetro	Valor
Potencia trifásica (VA)	225000
Tensión trifásica 1 (V)	10000
Tensión trifásica 2 (V)	3000
Pendiente unidad porcentual	0,45
Umbral corriente disparo	0,20
Umbral Wavelet	1e-6

4.6.1.2.1 Energización

En este caso se va a realizar el mismo conexionado que en el caso anterior (figura 4-79), con la diferencia que se han cambiado los valores de los componentes.

Una vez realizada la simulación se puede observar, en la figura 4-96, la intensidad diferencial obtenida del transformador para las tres fases. En la figura 4-97 se puede ver la intensidad diferencial que el relé diferencial de porcentaje manda a analizar por la transformada Wavelet y, como se puede comprobar, la fase A es la única que pasa el límite. Esta señal será procesada por el bloque que implementa la TWD y, finalmente, al ser una señal de energización, el relé diferencial no actúa como se observa en la figura 4-98, por tanto, funciona correctamente.

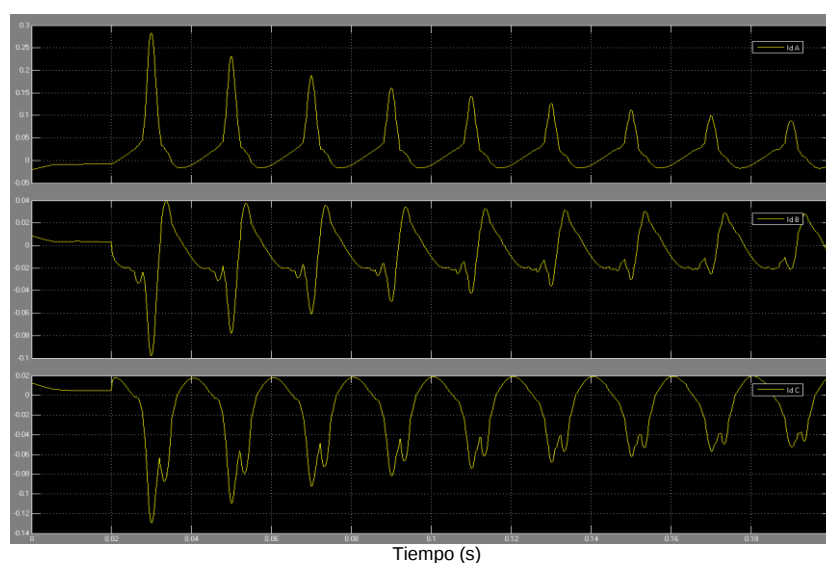


Fig. 4-96 Intensidad diferencial obtenida del transformador.

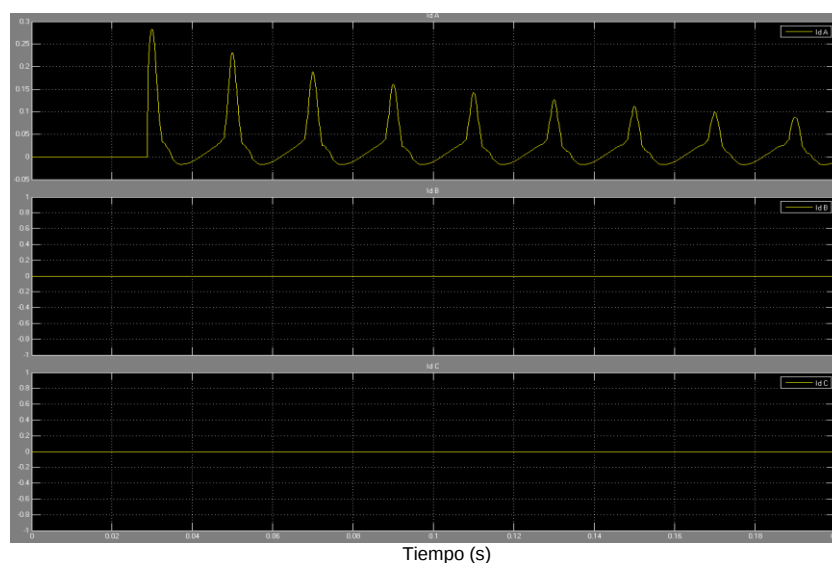


Fig. 4-97 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.

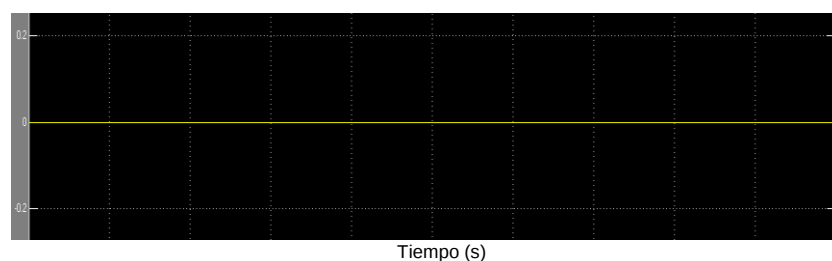


Fig. 4-98 Señal de salida del relé diferencial propuesto.

4.6.1.2.2 Falta externa

En este caso se va a simular un cortocircuito externo al transformador y se observa la respuesta del relé propuesto, ya que en este caso no debe actuar. El esquema de conexión es similar al anterior con la diferencia que ahora se va a colocar un bloque simulink para provocar la falta deseada.

Se puede observar, como en el caso anterior, las tres señales que interesan en este caso. Primero la señal diferencial obtenida del transformador (figura 4-99). Una vez procesada esta señal por el relé de porcentaje, se puede ver en la figura 4-100, que la señal que sale es cero, ya que al ser una falta externa éste no debe actuar y

por tanto, el relé diferencial con discriminación Wavelet tampoco actúa sobre el sistema.

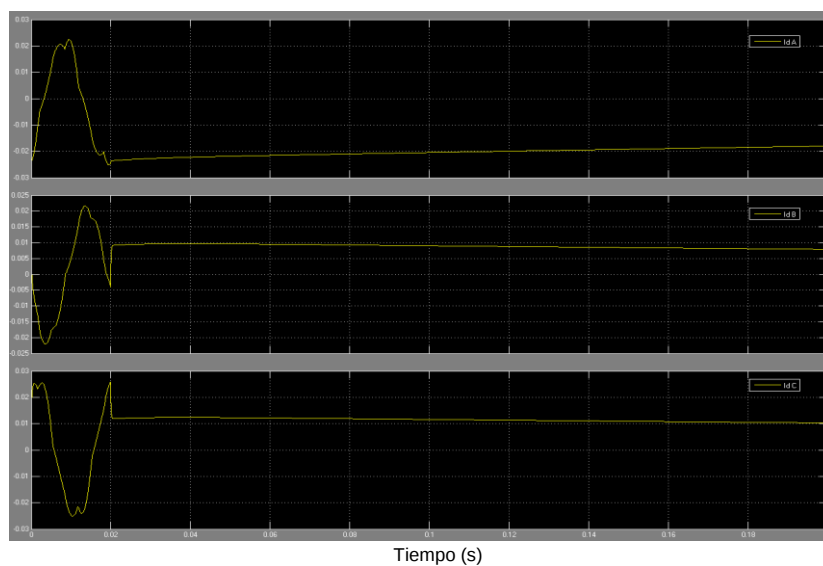


Fig. 4-99 Intensidad diferencial obtenida del transformador.

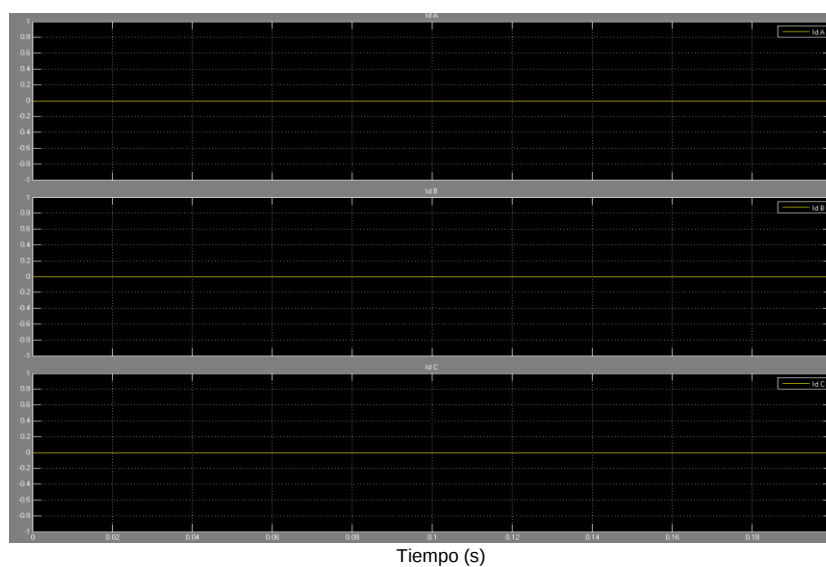


Fig. 4-100 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.

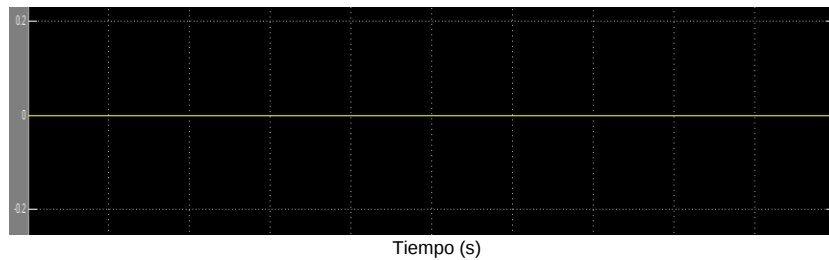


Fig. 4-101 Señal de salida del relé diferencial propuesto.

4.6.1.2.3 Falta interna

Ahora se va a simular un cortocircuito producido en el transformador, por lo que el relé diferencial propuesto debe actuar y desconectar el transformador a proteger. En la primera simulación se realizará un esquema de conexión como el mostrado en la figura 4-79, con la excepción de que se eliminan los contactos de conexión y se coloca el bloque simulink para simular faltas “Three-Phase Fault”. Una vez simulado se puede ver cómo el relé de porcentaje manda la señal al bloque TWD y el relé propuesto manda la señal de disparo a los interruptores del transformador.

En el segundo caso se realizará el esquema de conexión de la figura 4-89 y se ve cómo la señal de entrada al relé cesa, ya que se abren los interruptores del transformador.

Por otra parte se ha añadido un bloque a los interruptores para simular el retardo de éstos a la hora de actuar, por tanto, el tiempo de actuación del conjunto es mayor de los 10 ms que tarda el relé diferencial en actuar, en este caso se ha programado a 3 ms.

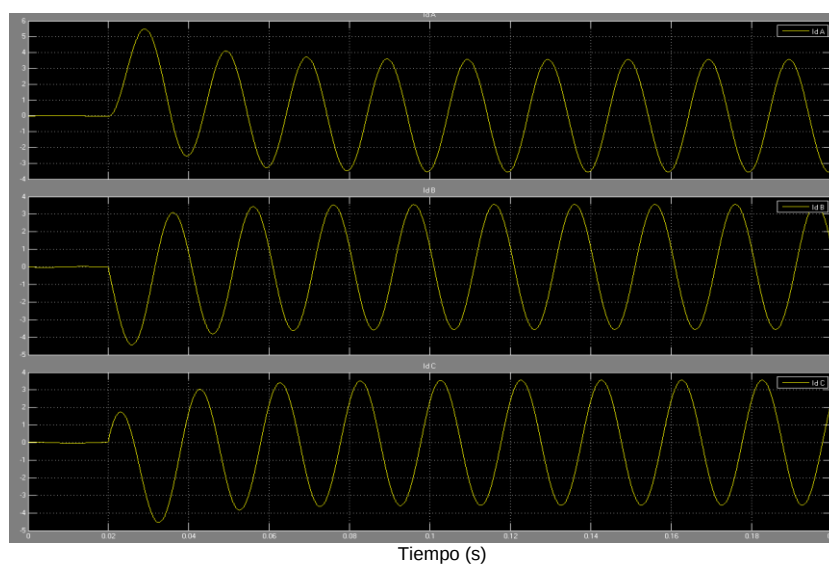


Fig. 4-102 Intensidad diferencial obtenida del transformador primer caso.

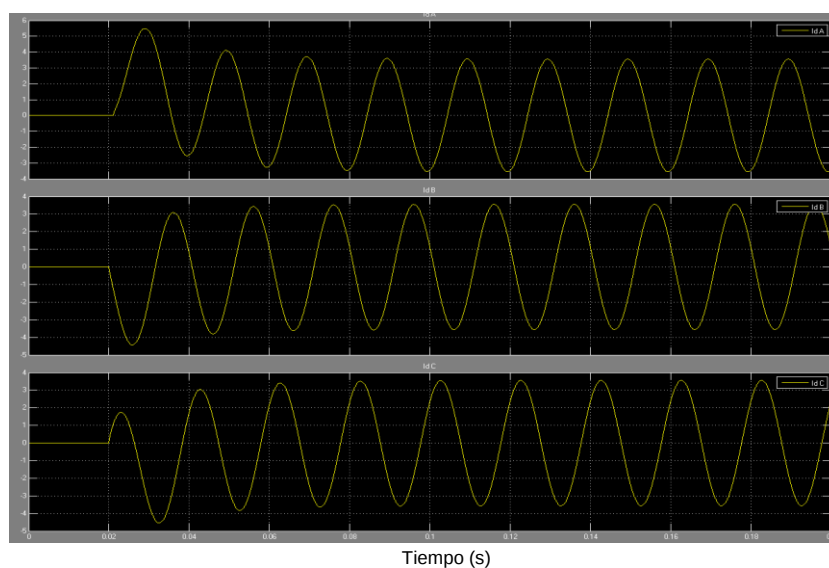


Fig. 4-103 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD primer caso.

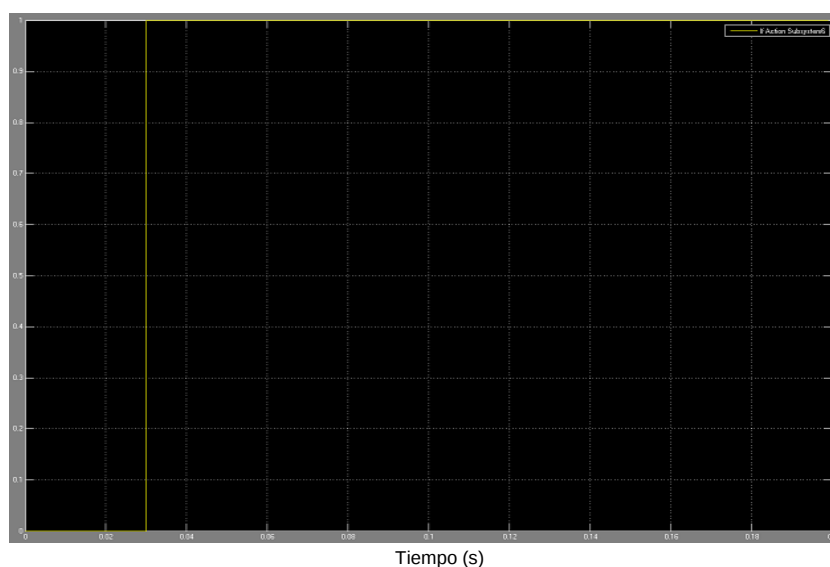


Fig. 4-104 Señal de salida del relé diferencial propuesto primer caso.

Para realizar el segundo caso se crea un bloque para implementar el interruptor trifásico controlado por el relé diferencial propuesto. En la figura 4-92 se ve el esquema de conexión realizado para desarrollar el caso que nos ocupa.

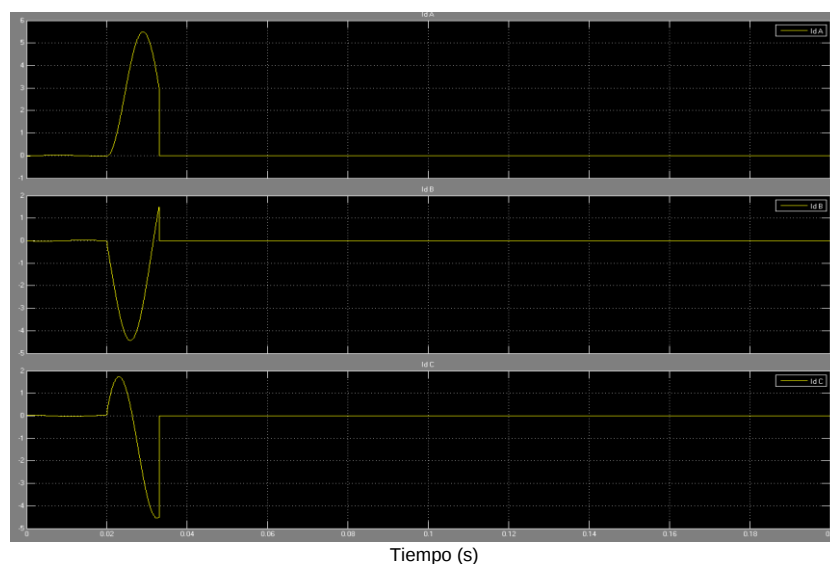


Fig. 4-105 Intensidad diferencial obtenida del transformador segundo caso.

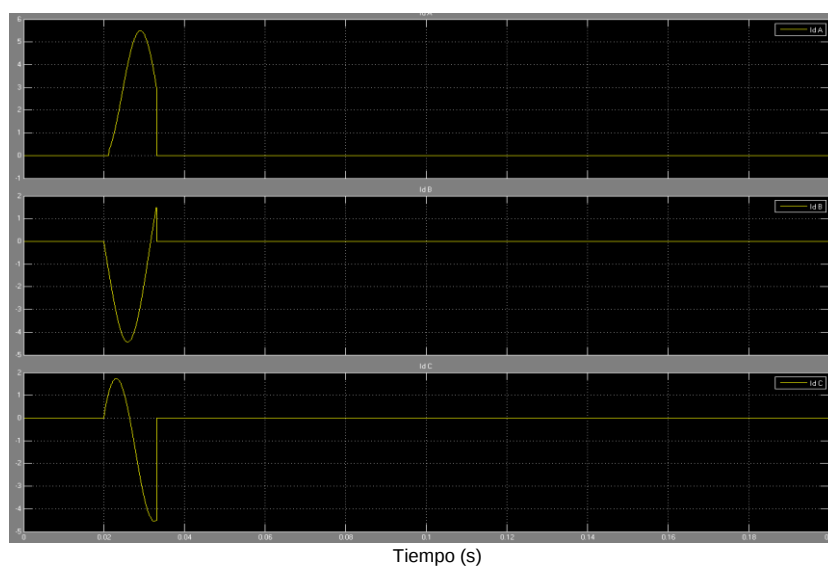


Fig. 4-106 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD segundo caso.

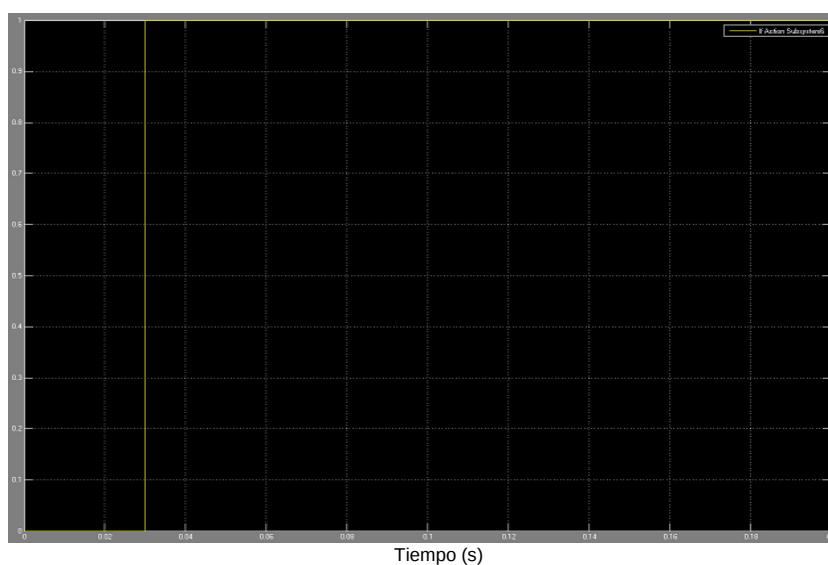


Fig. 4-107 Señal de salida del relé diferencial propuesto segundo caso.

4.6.1.2.4 Verificación del relé en diferentes casos

En este caso se va a analizar la respuesta del relé diferencial para transformadores de potencia con discriminación mediante transformada Wavelet en la situación de energización a 20 ms y una falta interna a 80 ms.

Se puede ver cómo a los 20 ms el relé de porcentaje manda la señal al bloque TWD y éste no manda la señal de interrupción del suministro, pero a los 90 ms (10 ms después de la falta) manda la señal para la interrupción del suministro de energía y 3 ms después se queda el transformador sin alimentar hasta su reseteo.

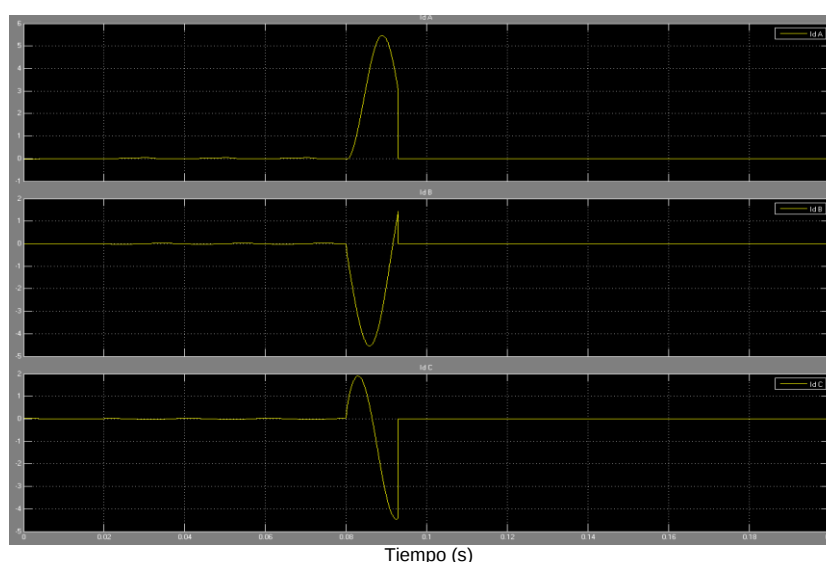


Fig. 4-108 Intensidad diferencial obtenida del transformador.

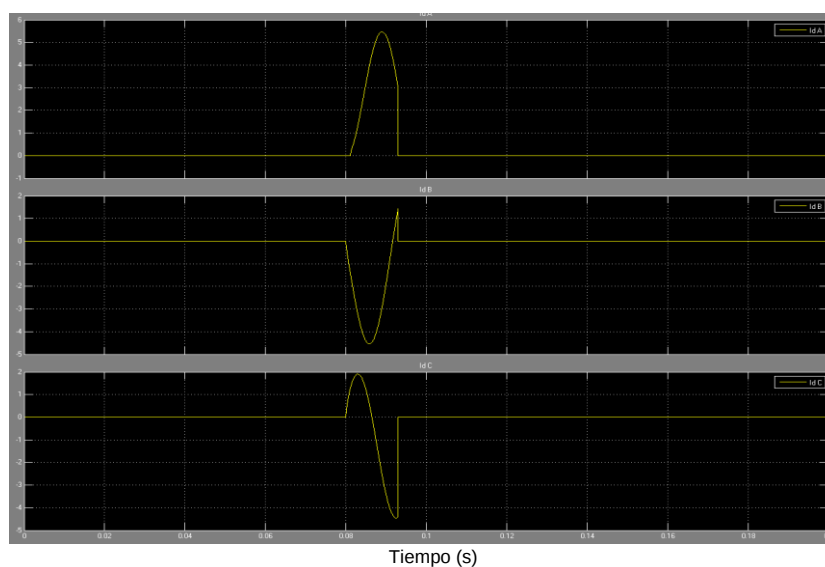


Fig. 4-109 Intensidad diferencial a analizar mediante TWD.

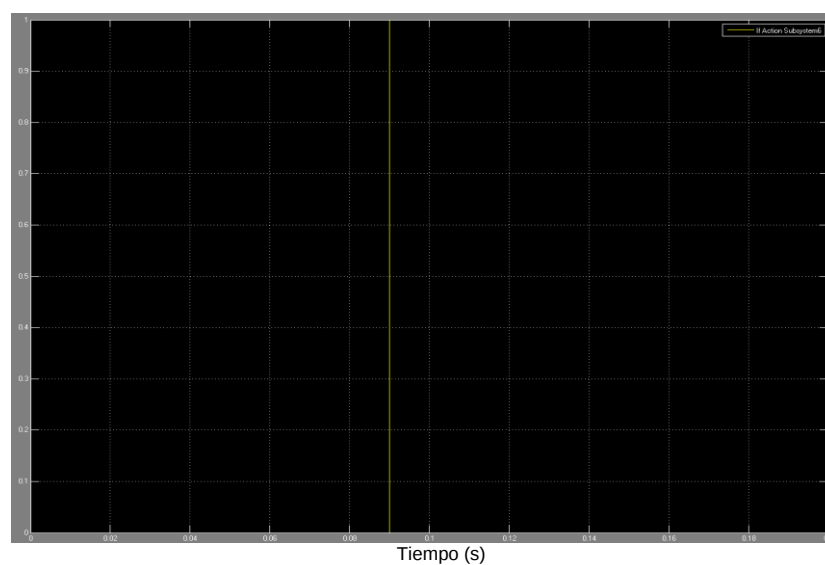


Fig. 4-110 Señal de salida del relé diferencial propuesto.

4.6.1.2.5 Transformador 3

Para no ser redundante en la información facilitada, no se han incorporado los datos obtenidos del transformador tres, ya que los resultados son muy similares a los dos anteriores.

El tercer transformador utilizado posee las siguientes características:

Variable	Dato
U1 [kV]	6,60
U2 [kV]	0,40
S [kVA]	100
f [Hz]	50

Los datos introducidos en la máscara del relé son:

Parámetro	Valor
Potencia trifásica (VA)	100000
Tensión trifásica 1 (V)	6600
Tensión trifásica 2 (V)	400
Pendiente unidad porcentual	0,45
Umbral corriente disparo	0,20
Umbral Wavelet	1e-6

4.7 Conclusiones

En este último apartado y después de meses de dedicación, mucho esfuerzo y un sin fin de problemas resueltos, se puede llegar a la conclusión de que el método de protección diferencial con discriminación Wavelet para transformadores de potencia, es factible para su desarrollo e implementación en los sistemas eléctricos de potencia, ya que es una herramienta muy útil y versátil para las nuevas tecnologías que van apareciendo.

Una vez desarrollado y validado el modelo, se llega a la conclusión de que la técnica de transformada Wavelet es una herramienta muy poderosa, y que sabiendo desarrollarla y trabajar con ella se pueden llegar a conseguir unos resultados de efectividad, rapidez de respuesta y hardware necesario para su implantación difícilmente mejorables por otros sistemas actualmente implementados o que están en estudio como la inteligencia artificial que algunos científicos están proponiendo. Este método consiste en implantar un algoritmo de última generación y hacer que la protección aprenda en el laboratorio y de los diversos fallos que puedan surgir durante su vida útil. La desventaja de los mismos es el hardware necesario y el laboratorio de entrenamiento de éstos.

Otra ventaja de este método es la facilidad de implementación en cualquier procesador actualmente disponible en el mercado. En un futuro, si existe la posibilidad de reducir los costes de los transformadores de medida, ya sea reduciendo su precio u obteniendo una novedosa disposición para obtener la lectura de las intensidades de entrada y salida a los transformadores con menos de seis transformadores de medida, tendríamos la posibilidad de implantar esta protección a cualquier nivel de potencia y no como en la actualidad, que sólo se utiliza este sistema de protección en transformadores de potencia como los que se instalan en subestaciones de alta potencia.



BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 5. Bibliografía

- [1] Nikhil Kumar, Student Member, IEEE, Himanshu Gupta, Student Member, IEEE and S. P. Singh, Senior Member, IEEE, "Prototype Scheme for Differential Protection of Power Transformer using ANN".
- [2] P.L. Mao¹, R.K. Aggarwal, "A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power Transformers", *Electrical Power and Energy Systems* 22 (2000) 389–395.
- [3] A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam, "Detection of inrush current in distribution transformer using wavelet transform", *Electrical Power and Energy Systems* 27 (2005) 361–370.
- [4] Sharp, R. L. y Glassburn, W. E., "A transformer differential relay with second harmonic restraint". *AIEE Transactions*, vol. 77, parte III, pp. 913-918, diciembre 1958.
- [5] H. Monsef , S. Lotfifard, "Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformers", *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 1637–1645.
- [6] A. Rahmati and M. Sanaye-Pasand, "A fast WT-based algorithm to distinguish between transformer internal faults and inrush currents", *EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER* Euro. Trans. Electr. Power 2012;

22:471–490 Published online 18 March 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.576.

[7] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, “Wavelet Toolbox for use with MATLAB”,

[8] Rahman, M. A., Jeyasurya, B., “A State of the Art Review of Transformer Protection Algorithms”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, nº 2, abril de 1988.

[9] Sykes, J. A: y Morrison, I. F., “A Proposed Method of Harmonic Restraint Differential Protection of Transformers by Digital Computer”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, nº 3, mayo/junio 1972.

[9] Dr. Julio Martínez Malo y Horacio Nelson Díaz, “Análisis de la teoría de ondículas orientada a las operaciones en ingeniería eléctrica”, Madrid Julio 2002.

[10] S. A. Saleh, Student Member, IEEE, and M. A. Rahman, Fellow, IEEE, “Modeling and Protection of a Three-Phase Power Transformer Using Wavelet Packet Transform”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005.

[11] Larson, R. R., Flechsig, A. J. y Schweitzer, E. O., “The Design and Test of a Digital Relay for Transformer Protection”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, nº 3, mayo/junio 1979.

[12] Degens, A. J., "Algorithm for a Digital Transformer Differential Protection Based on a Least-Squares Curve Fitting". Proceedings IEE (Londres), vol. 128, parte C, nº 3 pp. 155-161, mayo de 1981.

[13] Paulino Montane, "Protecciones en las instalaciones eléctricas, evolución y perspectivas", Editorial MARCOMBO, 1993.

[14] Prof. Alfred Holzt, Hans Teuchert y Francisco Planell, "La Escuela Del Técnico Electricista, Teoría. Cálculo y construcción de transformadores", Tercera edición 1954, Tomo VII, Editorial Labor, S.A. Barcelona – Madrid.

[15] Víctor Marines Castillo, Gina Idárraga Ospina y Enrique Esteban Mombello, "Análisis de los modelos de transformadores para la simulación de la protección diferencial", Ingenierías, Enero-Marzo 2010, Vol XIII, No. 46.

[16] Rahman, M. A., Jeyasurya, B. y Gangopadhyay, A., "Digital Differential Protection of Power Transformers Based on Walsh Functions". Transactions on CEA Engineering & Operating Division, vol 24, parte 3, document 85-SP-149. 1985.

[17] T. Zheng, J. Gu, S. F., F. Guo, and V. Terzija,, "A New Algorithm to Avoid Maloperation of Transformer Differential Protection in Substations With an Inner Bridge Connection", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 27, NO. 3, JULY 2012.

[18] Ali Hooshyar, Majid Sanaye-Pasand, Saeed Afsharnia, Mahdi Davarpanah, and Bashir Mahdi Ebrahimi, "Time-Domain Analysis of Differential Power Signal to Detect Magnetizing Inrush in Power Transformers", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 27, NO. 3, JULY 2012.

[19] Stephane G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol II, No 7, July 1989.

[20] Wiszniewski, A. y Kasztenny, B., "A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic". IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, nº. 2, pp.1786-1792, octubre 1995.

[21] Zaman, M.R. y Rahman, M.A., "Experimental testing of the artificial neural network based protection of power transformers". IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, nº 2, pp.510-517, abril 1998.