

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN EN ESTADO TRANSITORIO**

**DIEGO ANTONIO SARAY RICARDO
FANOR DÍAZ ROMERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga, Noviembre de 2006**

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN EN ESTADO TRANSITORIO**

**DIEGO ANTONIO SARAY RICARDO
FANOR DÍAZ ROMERO**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar por el título de Ingeniero Electricista

**DIRECTOR DEL PROYECTO
Dr. GILBERTO CARRILLO CAICEDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga, Noviembre de 2006**

TITLE: FAILURES LOCALIZATION: TRANSITORY STATE DISTRIBUTION SYSTEMS ANALYSIS*

AUTHORS**

Diego Antonio Saray Ricardo
Fanor Díaz Romero

KEY WORDS

Interruptions, Distribution Systems, Failures Localization, Time Series, Characterization.

DESCRIPTION

A frequent problem in distribution systems are failures, witch cause the service interruption in the zone where it happens. Its localization depends many times on the users call witch can take much time and represent lost of money because of the diminution in the sold energy and the compensation payments.

To contribute to the solution of this problem, current and tension signals monitored by the measurers existing in the circuit head were used to get information that, through a computational treatment, leads to quick failure localization.

In this work the transitory state of the failure through the time series was analyzed, relating the components of a transitory, with the components of a time series. Box – Cox and Wavelet transformed were used to obtain descriptors that trace a line in the relationship between the components of a transitory, the distance and the failure resistance. These descriptors were integrated in an algorithm that allows estimating the type, distance, resistance and zone where the failure happened, so we can obtain the localization of it.

The proposed methodology was proved in a system with various ramifications, were 100% efficiency of the failure type and definition of the zone and less than 1% errors in the distance estimation and failure resistance were obtained. The calculation time of the used tool is approximately 1 minute. With the use of this methodology it is possible to improve the localization time of the failure and reduce the lost related with it.

**Grade Project*

***Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Ingeniería Eléctrica.*

Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo

TITULO: LOCALIZACIÓN DE FALLAS: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN EN ESTADO TRANSITORIO*

AUTORES**

Diego Antonio Saray Ricardo
Fanor Díaz Romero

PALABRAS CLAVES

Interrupciones, Sistemas de Distribución, Localización de fallas, Series de tiempo, Caracterización.

DESCRIPCIÓN

Un problema frecuente en los sistemas de distribución son las fallas, que causan la interrupción del servicio en la zona donde esta ocurre. Su localización depende, muchas veces de la llamada de un usuario que puede demorar y representar pérdidas de dinero por disminución de la energía vendida y por pago de compensaciones.

Para contribuir a la solución de este problema, se utilizaron señales de corriente y tensión monitorizadas por los medidores existentes en la cabecera del circuito con el fin de obtener información que permitiera, mediante un tratamiento computacional, una pronta localización de la falla.

En este trabajo se analizó el estado transitorio de la falla a través de las series de tiempo, relacionando las componentes de un transitorio, con las componentes de una serie de tiempo. Se utilizaron las transformadas de Box - Cox y Wavelet para obtener descriptores que linealizan la relación entre los componentes de un transitorio, la distancia y la resistencia de falla. Estos descriptores se integraron en un algoritmo que permite estimar el tipo, la distancia, la resistencia y la zona donde ocurrió la falla, obteniendo así la localización de esta.

La metodología propuesta fue probada en un sistema con varias ramificaciones, donde se obtuvo una eficiencia del 100% del tipo de falla y la zonificación, y errores inferiores del 1% en la estimación de la distancia y resistencia de falla. El tiempo de cálculo de la herramienta utilizada es de aproximadamente 1 minuto. Con la utilización de esta metodología es posible mejorar el tiempo de localización de la falla y disminuir las pérdidas relacionadas a esta.

**Proyecto de Grado.*

***Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Ingeniería Eléctrica.
Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo*

A mi Señor Jesucristo, quien transformó mi vida, me bendijo y me ha respaldado en todo lo que he emprendido.

A mis padres Bernardo Saray y Maria Ricardo por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Luifran, Mary y Bernard, por su apoyo y compañía.

Diego Antonio Saray Ricardo

*A Jesucristo mi Señor y salvador,
que con su amor ha transformado
mi vida.*

*A mis padres Fanor Díaz Maciá y
Nery Romero quienes han sido la
bendición mas grande que Dios me
ha dado.*

*A mls hermanos Edgar, Aurita y la
niña, por su compañía.*

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud y agradecimientos al Dr. Gilberto Carrillo Caicedo, por su dirección, asesoría y colaboración en la elaboración de nuestro proyecto de grado.

Al MSc. Juan Carlos Rodríguez por su apoyo y orientación en la etapa inicial de este proyecto.

A nuestros compañeros y profesores por su apoyo en nuestra formación profesional.

A nuestra familia en Cristo, por sus oraciones, guía y palabras de aliento, especialmente a nuestros líderes Wilson y Enith Jaimes por sus consejos y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS ANTE CONDICIONES DE FALLA	3
1.1 CONCEPTOS GENERALES DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS	3
1.1.1 Componentes de un transitorio electromagnético	3
1.1.2 Transitorio oscilatorio	4
1.1.3 Transitorio tipo impulso	5
1.2 CARACTERIZACIÓN DE UN TRANSITORIO PRODUCIDO POR UNA FALLA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	6
1.2.1 Ecuaciones fundamentales para transitorios electromagnéticos	6
1.2.2 Transitorio producido por una falla en un sistema de distribución	9
1.2.3 Relación entre los componentes de un transitorio y la localización de la falla	10
1.3 SIMULACIÓN DEL TIPO DE FALLA	16
2 APLICACIÓN DE SERIES DE TIEMPO PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS	19
2.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE SERIES DE TIEMPO	19
2.1.1 Componentes de una serie de tiempo	19
2.1.2 Transformadas para las series de tiempo	22
2.1.3 Componentes de la serie de tiempo asociada a un transitorio	22
2.2 TRANSFORMADA BOX-COX (TBC)	26
2.2.1 Aplicación de la TBC a una señal de falla en estado transitorio	28

2.3	TRANSFORMADA WAVELET	30
2.3.1	Transformada Wavelet Discreta (TWD)	33
2.3.2	Aplicación de la TWD a una señal de falla en estado transitorio	38
3	DESCRIPTORES USADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA	41
3.1	CONSIDERACIONES INICIALES	41
3.2	DESCRIPTOR LAMBDA	42
3.2.1	Estimación del tipo de falla	42
3.2.2	Estimación de la distancia y resistencia de falla	45
3.2.3	Estimación de la zona	51
3.3	DESCRIPTOR TENDENCIA (MXT)	51
3.3.1	Estimación del tipo de falla	52
3.3.2	Estimación de la distancia y resistencia de falla	54
3.3.3	Estimación de la zona	57
3.4	DESCRIPTOR SSE	58
3.4.1	Estimación del tipo de falla	60
3.4.2	Estimación de la distancia y resistencia de falla	61
3.4.3	Estimación de la zona	64
3.5	DESCRIPTOR CD7(4)	65
3.5.1	Estimación del tipo de falla	66
3.5.2	Estimación de la distancia y resistencia de falla	68
3.5.3	Estimación de la zona	74
4	MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA	74
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL CIRCUITO	74
4.2	INTEGRACIÓN DE LOS DESCRIPTORES	76
4.2.1	Algoritmo Lambda - MXT	77
4.2.2	Algoritmo Lambda - SSE	78
4.2.3	Algoritmo Lambda – CD7	78
4.2.4	Algoritmo MXT – SSE	78

4.2.5 Algoritmo MXT – CD7	79
4.2.6 Algoritmo SSE – CD7	80
4.3 INTEGRACIÓN DE LOS ALGORITMOS EN UN MÉTODO GENERAL	82
4.4 VARIACIÓN DEL INSTANTE DE FALLA	86
4.5 PRUEBAS REALIZADAS AL MÉTODO	88
CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRFÍA	93
APÉNDICE	94

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la energización de bancos de condensadores	4
Figura 1.2 Transitorio oscilatorio causado por el fenómeno “Back to Back” en la conmutación de condensadores	5
Figura 1.3 Transitorio de impulso de corriente originada por un rayo.	
Figura 1.4 Circuito RL y Circuito RC	7
Figura 1.5 Circuitos RLC serie y paralelo	8
Figura 1.6 Equivalente monofásico de una línea de distribución	9
Figura 1.7 Equivalente eléctrico durante la falla	9
Figura 1.8 Circuito de distribución de un solo alimentador	10
Figura 1.9 Señales de corriente y tensión para una falla monofásica	10
Figura 1.10 Picos de corriente para las diferentes distancia de falla	11
Figura 1.11 Cálculo de la constante de tiempo para I_{rms} en los puntos 1 y 11	12
Figura 1.12 Cálculo de la constante de tiempo para I_{rms} con R1 y R2	12
Figura 1.13 Relación entre la corriente de falla y la respuesta natural	13
Figura 1.14 Relación entre el amortiguamiento de $I(t)$ y las oscilaciones de I_{rms}	14
Figura 1.15 Cálculo de la frecuencia para I_{rms} de falla en puntos 1 y 11	15
Figura 1.16 Cálculo de la frecuencia para I_{rms} de falla con R1 y R2	16
Figura 1.17 Sistema de Prueba	17
Figura 2.1 Ejemplo de una serie de tiempo	19
Figura 2.2 Tendencia de la Serie de Tiempo	20

Figura 2.3 Estacionalidad de la Serie de Tiempo	21
Figura 2.4 Variabilidad de la Serie de Tiempo	21
Figura 2.5 Error Aleatorio de la Serie de Tiempo	22
Figura 2.6 Señales Irms e It para una falla monofásica	23
Figura 2.7 Estacionalidad de la señal Irms de falla	23
Figura 2.8 Tendencia de la señal Irms de falla	24
Figura 2.9 Error aleatorio de la señal Irms de falla	26
Figura 2.10 Variabilidad de la corriente de falla	26
Figura 2.11 Transformada Box-Cox para Irms	27
Figura 2.12 Relación entre λ y la variabilidad en una serie de tiempo	28
Figura 2.13 Parámetro λ para las señales de falla	29
Figura 2.14 Comparación entre los picos de Irms y TBC de Irms	29
Figura 2.15 Comparación entre una wavelet y una senoidal	31
Figura 2.16 Funcionamiento de la Transformada Wavelet	32
Figura 2.17 Coeficientes de la Transformada Wavelet	33
Figura 2.18 Señal con múltiples frecuencias	34
Figura 2.19 Componentes de alta y baja frecuencia	34
Figura 2.20 Proceso de filtrado de la TWD	35
Figura 2.21 Árbol de descomposición de wavelet	36
Figura 2.22 Wavelet Haar	37
Figura 2.23 Algunas funciones wavelets con su función escalada	37
Figura 2.24 Wavelet madre daubechies 4 (db4)	38
Figura 2.25 Coeficientes de aproximación y detalle para Irms	39
Figura 2.26 Coeficientes de detalle 6, 7 y 8 para I(t)	40
Figura 3.1 Valores de Vrms y Irms de falla en pu	42
Figura 3.2 Rangos de lambda para los diferentes tipos de Irms	44

Figura 3.3 Rangos de lambda para diferentes tipos de Vrms	45
Figura 3.4 Relación entre lambda, la distancia y la resistencia para Vrms	46
Figura 3.5 Relación entre lambda, la distancia y la resistencia para Irms	47
Figura 3.6 Relación entre lambda, la distancia y la resistencia con Irms para todos tipos de falla	48
Figura 3.7 Intersección de lambda con las curvas de distancia para cada resistencia	50
Figura 3.8 Relación Distancia vs. Resistencia para la falla del ejemplo usando el descriptor lambda	50
Figura 3.9 Parámetro lambda para las diferentes zonas	51
Figura 3.10 TBC para Irms y Vrms en pu	53
Figura 3.11 Vrms por fase en fallas 2Φ y $2\Phi T$	53
Figura 3.12 Relación entre la tendencia de Vrms, la distancia y la resistencia	54
Figura 3.13 Relación entre la tendencia de Irms, la distancia y la resistencia	54
Figura 3.14 MXT para las diferentes tipos de fallas	56
Figura 3.15 Relación entre la distancia y la resistencia, con MXT	57
Figura 3.16 MXT para las diferentes zonas	58
Figura 3.17 Regresión lineal para TBC de Irms	59
Figura 3.18 Relación entre la regresión lineal y la tendencia y variabilidad	59
Figura 3.19 Relación entre SSE, la distancia y la resistencia para Vrms	61
Figura 3.20 Relación entre SSE, la distancia y la resistencia para Irms	62
Figura 3.21 Relación entre SSE, la distancia y la resistencia con Irms para todos tipos de falla	63
Figura 3.22 Relación entre la distancia y la resistencia, con SSE	64
Figura 3.23 SSE para las diferentes zonas	65
Figura 3.24 Detalle 7 y 8 de la Irms de falla	66
Figura 3.25 Irms por fase en falla monofásica	67

Figura 3.26 Relación entre CD7(4) de V_{rms} , la distancia y la resistencia	68
Figura 3.27 Relación entre CD7(4) de I_{rms} , la distancia y la resistencia	69
Figura 3.28 Relación entre CD8(4) de I_{rms} , la distancia y la resistencia	70
Figura 3.29 CD7(4) para las diferentes tipos de fallas	71
Figura 3.30 Relación entre la distancia y la resistencia, con CD7(4)	72
Figura 3.31 CD7(4) para las diferentes zonas	72
Figura 4.1 Diagrama de flujo del proceso de caracterización del circuito	75
Figura 4.2 Obtención de la curva Distancia vs. Resistencia para una falla	76
Figura 4.3 Diagrama de flujo para la integración de los descriptores	77
Figura 4.4 Obtención de distancia y resistencia de falla usando Lambda - MXT	77
Figura 4.5 Obtención de distancia y resistencia de falla usando Lambda - SSE	78
Figura 4.6 Obtención de distancia y resistencia de falla con Lambda - CD7(4)	79
Figura 4.7 Obtención de distancia y resistencia de falla usando MXT - SSE	79
Figura 4.8 Obtención de distancia y resistencia de falla usando MXT - CD7(4)	80
Figura 4.9 Obtención de distancia y resistencia de falla usando SSE - CD7(4)	80
Figura 4.10 Curvas de lambda para las diferentes zonas	84
Figura 4.11 Comparación entre zonas 1 y 4	84
Figura 4.12 (t) para diferentes instantes de falla	86
Figura 4.13 I_{rms} para diferentes instantes de falla	86
Figura 4.14 Valores del descriptor lambda para diferentes instantes de falla	87
Figura 4.15 Curvas de lambda vs distancia para diferentes instantes de falla	88
Figura 4.16 Relación Lambda vs. Distancia para valores de resistencia adicionales	90

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1 Códigos Empleados en la Simulación en ATP	17
Tabla 1.2 Distancias entre las barras y la cabecera del circuito	17
Tabla 1.3 Resistencias de Falla	17
Tabla 3.1 Zonas del sistema de prueba	40
Tabla 3.2 Parámetro λ para los diferentes tipos de falla	41
Tabla 3.3 Tendencia para los diferentes tipos de falla	50
Tabla 3.4 SSE para los diferentes tipos de falla	58
Tabla 3.5 CD7(4) para los diferentes tipos de falla	64
Tabla 4.1 Relación entre los descriptores y los componentes del transitorio	79
Tabla 4.2 Cuantificación de errores para los diferentes algoritmos	82
Tabla 4.3 Resultados zona 1	85
Tabla 4.4 Resultados zona 2	85
Tabla 4.5 Resultados de las pruebas realizadas al método	86
Tabla 4.6 Errores de distancia y resistencia	87

INTRODUCCIÓN

La calidad y la eficiencia de la energía son factores que han influido en el mejoramiento del suministro y en la disminución de pérdidas, tanto en la distribución como en la transmisión de la energía eléctrica.

Un problema frecuente son las fallas en los sistemas de distribución, que causan la interrupción del servicio en la zona donde ocurre la falla. Con esto se perjudican las personas que reciben el servicio y la empresa que deja de vender energía. Por esta razón, se han tomado medidas para cuantificar las interrupciones mediante índices de calidad que se calculan con base en datos tomados por medidores colocados en las cabeceras de los principales circuitos. Sin embargo, la localización de las fallas depende, muchas veces de la llamada de un usuario que puede demorar y representar pérdidas de dinero por disminución de la energía vendida y por pago de compensaciones.

Con la idea de contribuir a la solución del problema, se realizaron estudios para localizar la falla rápidamente, y de paso disminuir el tiempo que el sistema está fuera de servicio. Para esto se utilizaron las señales de corriente y tensión monitorizadas por los medidores existentes con el fin de obtener información que permitiera, mediante un tratamiento computacional, una pronta localización de la falla.

Debido a la gran dificultad para conseguir información real de fallas, se complementaron los datos con la ayuda del software ATP. En el circuito de distribución se simularon los diferentes tipos de falla, en diferentes partes y con diferentes resistencias de falla.

Estas señales fueron analizadas en su parte transitoria, utilizando la transformada Wavelet y Series de Tiempo. Se encontró que con cada uno de estos análisis, es posible determinar el tipo de falla y su probable localización, obteniendo así cuatro descriptores con ellos.

Los cuatro descriptores se integraron en un algoritmo que permite determinar el tipo, la distancia y la resistencia de la falla. Este algoritmo fue probado para diferentes fallas obteniéndose resultados satisfactorios.

El texto del proyecto está estructurado en cuatro capítulos cuyo contenido se presenta a continuación.

En el capítulo 1 se explican los conceptos básicos de los transitorios electromagnéticos, como son sus componentes y los tipos de transitorios mas comunes; también se muestran las características del transitorio producido por una falla y la influencia de sus componentes en la localización, finalmente se describe el circuito usado para el análisis y se explica la simulación realizada en el software ATP.

En el capítulo 2 se presenta la aplicación de Series de Tiempo en el análisis de transitorios, se muestra su definición, sus componentes y la relación de estos con los componentes de un transitorio. También se describen los tipos de transformadas para las series de tiempo y se proponen las transformadas de Box-Cox y Wavelet como herramientas para la caracterización de un transitorio. Adicionalmente se explican algunos conceptos básicos y su utilidad en la localización de la falla.

En el capítulo 3 se muestran los descriptores obtenidos con estas herramientas, y su aplicación para obtener información de la falla tal como, el tipo, la resistencia, la distancia y la zona del circuito donde se presenta la falla.

En el capítulo 4 se integran los descriptores en un método para de estimar la localización de la falla, se prueba este método para diferentes tipos de fallas y se analizan los resultados.

Finalmente se presentan las observaciones y conclusiones de este trabajo.

1. TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS DURANTE CONDICIONES DE FALLA

En este capítulo se explican los conceptos generales de los transitorios electromagnéticos y las características de un transitorio producido por una falla en un sistema de distribución. Además se describe el circuito usado para este trabajo y se explica la simulación realizada en el software ATP.

1.1 CONCEPTOS GENERALES DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

Los transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia son eventos de corta duración que se caracterizan por un contenido elevado de componentes de alta frecuencia. A continuación se muestran los componentes fundamentales de un transitorio electromagnético y su clasificación de acuerdo con la [IEEE 1159, 95].

1.1.1 Componentes de un transitorio electromagnético

Existen tres componentes fundamentales que definen un transitorio electromagnético, estas son: la magnitud, la frecuencia y la constante de tiempo. Dichas componentes dependen de las características del circuito, las condiciones de operación del sistema y la naturaleza del evento que ocasiona el transitorio. A continuación se muestra una breve definición de cada una de ellas.

➤ **Magnitud de un transitorio**

Es el tamaño del transitorio y está asociado al máximo valor que puede alcanzar; depende de las condiciones iniciales y finales del sistema. En la figura 1.1 se muestra un ejemplo de un transitorio donde se aprecia el máximo valor o pico del transitorio.

➤ **Frecuencia de un transitorio**

Se conoce como frecuencia de resonancia y es producida por la liberación de la energía almacenada en forma de campos eléctricos y magnéticos al ocurrir un evento, depende de la inductancia y capacitancia del circuito en el que se produce el transitorio. En la figura 1.1 se aprecia la frecuencia de resonancia de un transitorio, como las oscilaciones sufridas dentro de un periodo de la señal original.

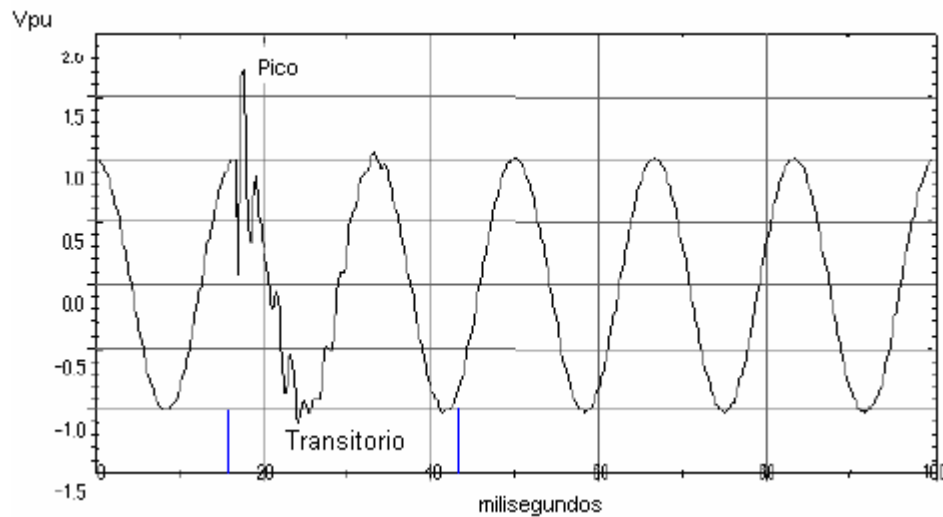


Figura 1.1 Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la energización de bancos de condensadores [NTC 5000, 02].

➤ **Constante de tiempo de un transitorio**

Es la rapidez a la que se disipa la energía liberada como producto de un evento, depende en gran parte de la resistencia del circuito. En la figura 1.1 se observa el efecto de la constante de tiempo en la disminución de la magnitud de las oscilaciones a través del tiempo.

De acuerdo con el comportamiento de los componentes mostrados, los transitorios electromagnéticos pueden clasificarse de la siguiente manera:

1.1.2 Transitorio oscilatorio

Es el cambio repentino en la condición de estado estacionario de la tensión, la corriente, o ambas, cuando se tiene elementos almacenadores de energía (L y C) y el valor de la resistencia (R) es bajo. En este caso los valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente. Se caracterizan por su frecuencia, duración y magnitud. Los transitorios oscilatorios son causados principalmente por conexión de condensadores, por re-encendidos durante la desconexión de transformadores y por la conexión de líneas de transmisión. Existen transitorios oscilatorios de alta, media y baja frecuencia, los cuales se describen a continuación. [IEEE 1159, 95].

➤ **Transitorio de baja frecuencia**

Es un transitorio con una componente de frecuencia característica menor que 5 kHz y una duración de 0,3 a 50 ms. Estos transitorios ocurren frecuentemente en los sistemas de distribución y son causados principalmente

por la energización de bancos de condensadores con frecuencias características entre 300 Hz y 900 Hz, una magnitud pico entre 1,3 pu a 1,5 pu; y una duración entre 0,5 ciclos y 3 ciclos. Un ejemplo de este tipo de evento se muestra en la Figura 1.1.

➤ **Transitorio de media frecuencia**

Es un transitorio con una componente de frecuencia característica entre 5 kHz y 500 kHz, con una duración del orden de microsegundos. Se presentan por la energización de condensadores como muestra la Figura 1.2. También pueden presentarse como respuesta del sistema a un transitorio tipo impulso.

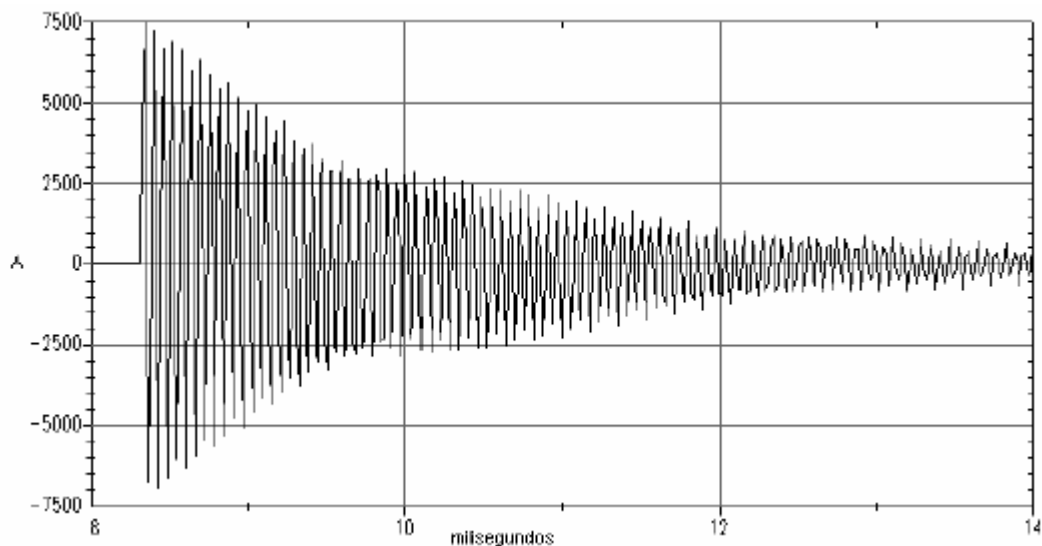


Figura 1.2 Transitorio oscilatorio causado por el fenómeno “Back to Back” en la conmutación de condensadores [NTC 5000, 02].

➤ **Transitorio oscilatorio de alta frecuencia**

Este transitorio posee una componente de frecuencia característica mayor que 500 kHz y una duración típica, por tanto del orden de microsegundos. Se presentan por maniobras en el sistema como conexión o desconexión de inductancias, y también como respuesta del sistema a un transitorio tipo impulso.

1.1.3 Transitorio tipo impulso

El transitorio tipo impulso o impulsivo ocurre cuando hay un cambio súbito de la señal posiblemente debido a la liberación de una distribución de carga. Se caracterizan, normalmente, por los tiempos de subida y caída, que pueden ser unidireccionales en polaridad.

Estos transitorios son causados principalmente por descargas atmosféricas y pueden provocar transitorios oscilatorios por inducción electromagnética. En la figura 1.3 se muestra un transitorio de impulso de corriente producido por una descarga atmosférica.

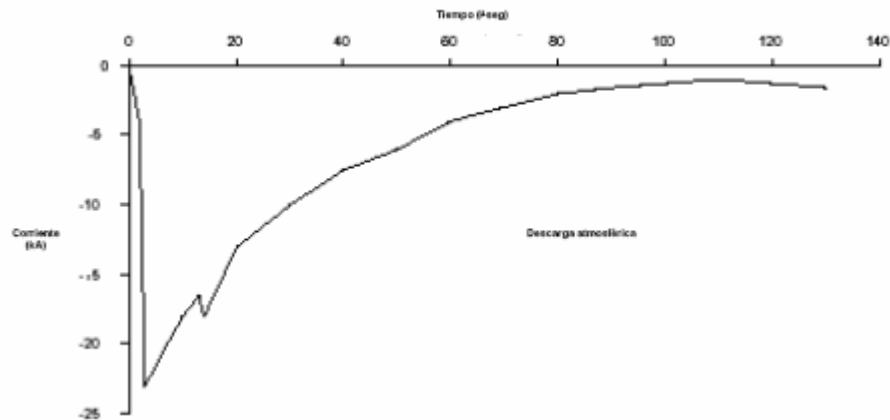


Figura 1.3 Transitorio de impulso de corriente originada por un rayo.
[NTC 5000, 02].

1.2 CARACTERIZACIÓN DE UN TRANSITORIO PRODUCIDO POR UNA FALLA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Es importante entender que un transitorio es el resultado de una variación brusca en el sistema, por eso para su análisis, es necesario conocer cómo es su comportamiento en el tiempo, su duración, la frecuencia a la que ocurre y las variables que influyen en cada una de esas características.

Para este análisis se requiere conocer los elementos que influyen en la acción de un transitorio. Por eso, es necesario remontarse a la teoría de circuitos donde se pueden ver diferentes casos dependiendo de la impedancia que existe. A continuación se muestran algunos ejemplos orientados al tema del proyecto.

1.2.1 Ecuaciones fundamentales para transitorios electromagnéticos

Para cada circuito, la tensión y la corriente se definen mediante ecuaciones características que expresan su comportamiento en cualquier instante de tiempo. Este comportamiento está afectado por una respuesta natural y una forzada. La respuesta forzada representa el estado estable del circuito y la respuesta natural es el efecto del transitorio. [Greenwood].

En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de un circuito RL y un circuito RC, y a continuación se expresan las ecuaciones que definen el comportamiento de la corriente y la tensión para cada uno de ellos.

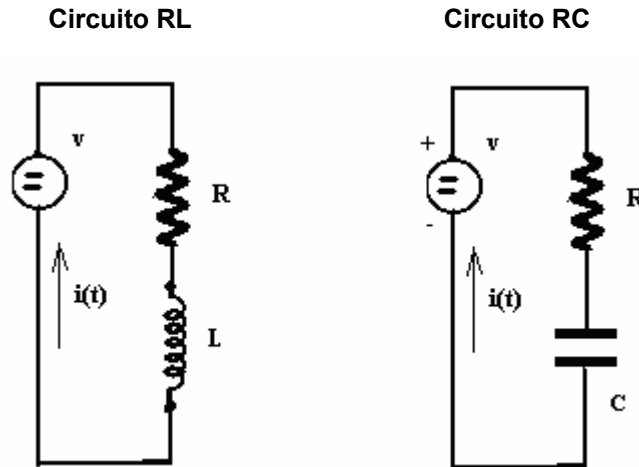


Figura 1.4 Circuito RL y Circuito RC

Para el circuito RL la corriente en la bobina es

$$i(t) = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Y la constante de tiempo τ es

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Para el circuito RC la corriente en el condensador es

$$i(t) = \frac{V}{R} * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Y la constante de tiempo τ es

$$\tau = RC$$

Una red de distribución se puede modelar con circuitos de tipo RLC. Para entender el comportamiento de este tipo de circuito se presentan a continuación los circuitos RLC más sencillos, el RLC serie y el RLC paralelo. En la figura 1.5 se muestran estos casos.

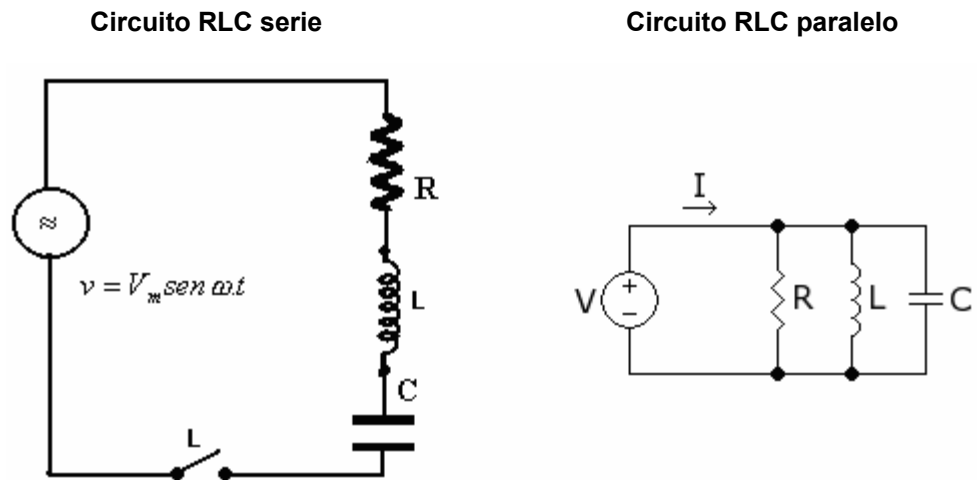


Figura 1.5 Circuitos RLC serie y paralelo.

Para este tipo de circuitos la respuesta natural de la corriente se representa matemáticamente de la siguiente manera:

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

Donde α es el coeficiente de amortiguamiento y es igual a:

$$\alpha = \frac{1}{2RC}$$

(En paralelo)

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

(En serie)

Y ω_0 es la frecuencia del transitorio

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Pueden presentarse tres tipos de respuesta dependiendo de los valores de α y ω_0

Respuesta sobre amortiguada $\alpha > \omega_0$

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

Respuesta críticamente amortiguada $\alpha = \omega_0$

$$i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 t + A_2)$$

Respuesta subamortiguada u oscilatoria $\alpha > \omega_0$

$$i(t) = e^{-\alpha t} (B_1 \cos(\omega_d t) + B_2 \text{sen}(\omega_d t))$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

1.2.2 Transitorio producido por una falla en un sistema de distribución

Un sistema de distribución está compuesto por una componente resistiva, una componente inductiva y una componente capacitiva. En la figura 1.6 se muestra un equivalente monofásico de una línea de distribución.

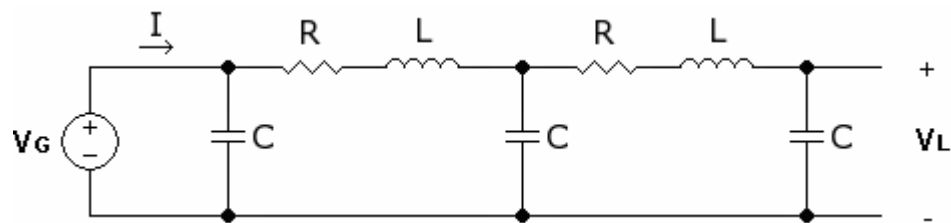


Figura 1.6 Equivalente monofásico de una línea de distribución.

Al ocurrir una falla se experimenta un cambio brusco en la impedancia equivalente del sistema, este cambio puede modelarse sustituyendo la impedancia de la línea mas allá de la falla, por la resistencia de falla. En la figura 1.7 se muestra un esquema del cambio que sufre el circuito durante la falla.

El circuito equivalente de falla es diferente de los circuitos RLC serie y paralelo convencionales, aunque su comportamiento podría ser similar a uno de estos. Para tener una idea de su comportamiento se toma como ejemplo el circuito de una línea trifásica mostrado en la figura 1.8.

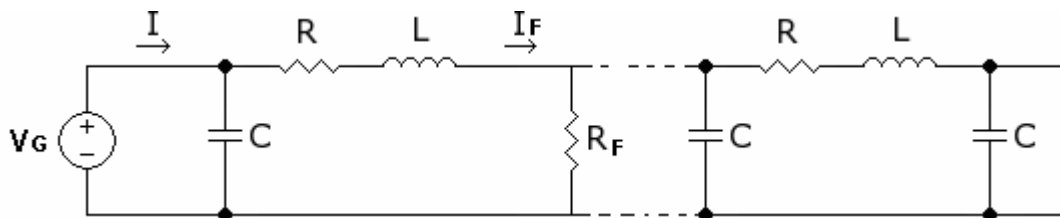


Figura 1.7 Equivalente eléctrico durante la falla.

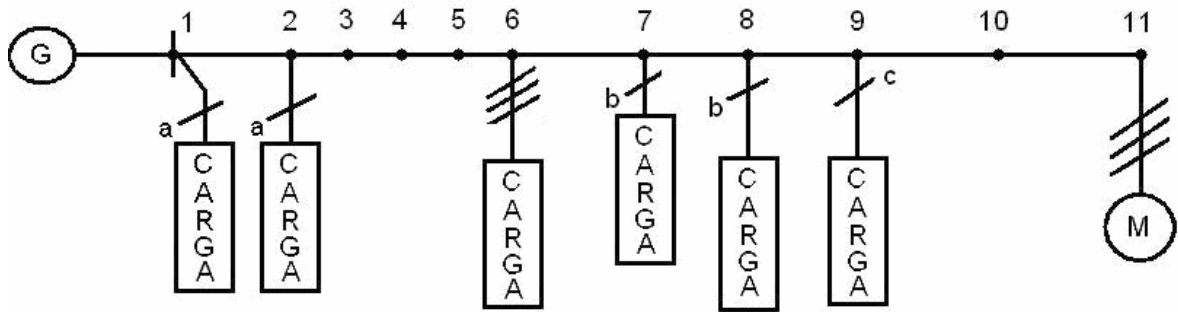


Figura 1.8 Circuito de distribución de un solo alimentador.

Con la ayuda del software ATP se simuló en este circuito una falla monofásica. En la figura 1.9 se muestran las señales de corriente y tensión para esta falla.

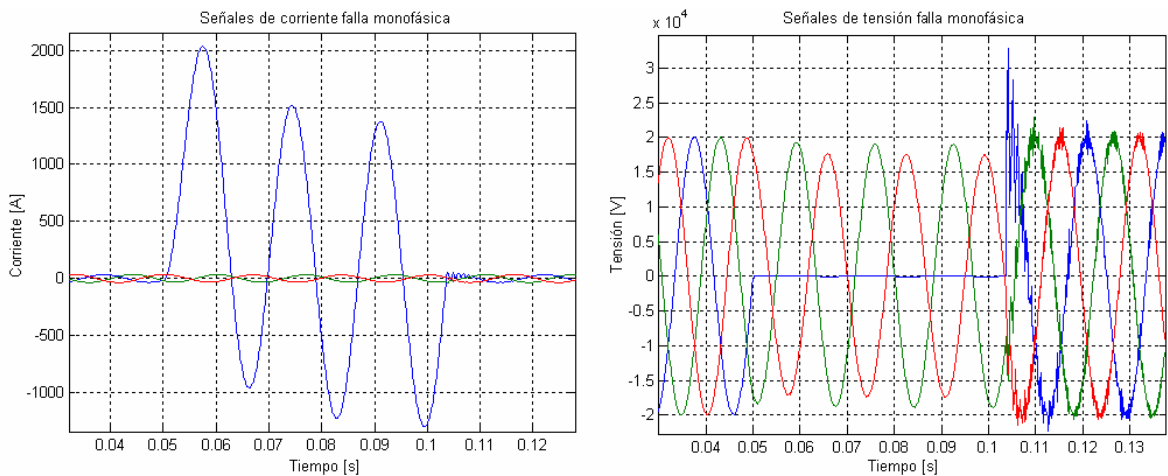


Figura 1.9 Señales de corriente y tensión para una falla monofásica.

En esta figura se observan características como el pico y el amortiguamiento en la señal de corriente, y la frecuencia en la señal de tensión. Aunque este ejemplo permite tener una idea del comportamiento del transitorio, es necesario un estudio más profundo si se desea relacionar los componentes de un transitorio con su probable localización. A continuación se hace un análisis de la variación de los componentes de un transitorio con respecto a la distancia y a la resistencia de falla.

1.2.3 Relación entre los componentes de un transitorio y la localización de la falla

Continuando con el ejemplo de la figura 1.8, se busca relacionar el efecto que tienen la distancia y resistencia de falla, sobre la magnitud, la frecuencia y la constante de tiempo de un transitorio. Para este análisis se simularon fallas

monofásicas a diferentes distancias y con diferentes resistencias de fallas. Los resultados de estas simulaciones se analizaron con la ayuda del software Matlab arrojando los resultados que se presentan a continuación.

➤ Efecto sobre la magnitud

En la figura 1.10 se muestran los picos de corriente en función de la distancia de falla donde cada curva equivale a un valor de resistencia de falla.

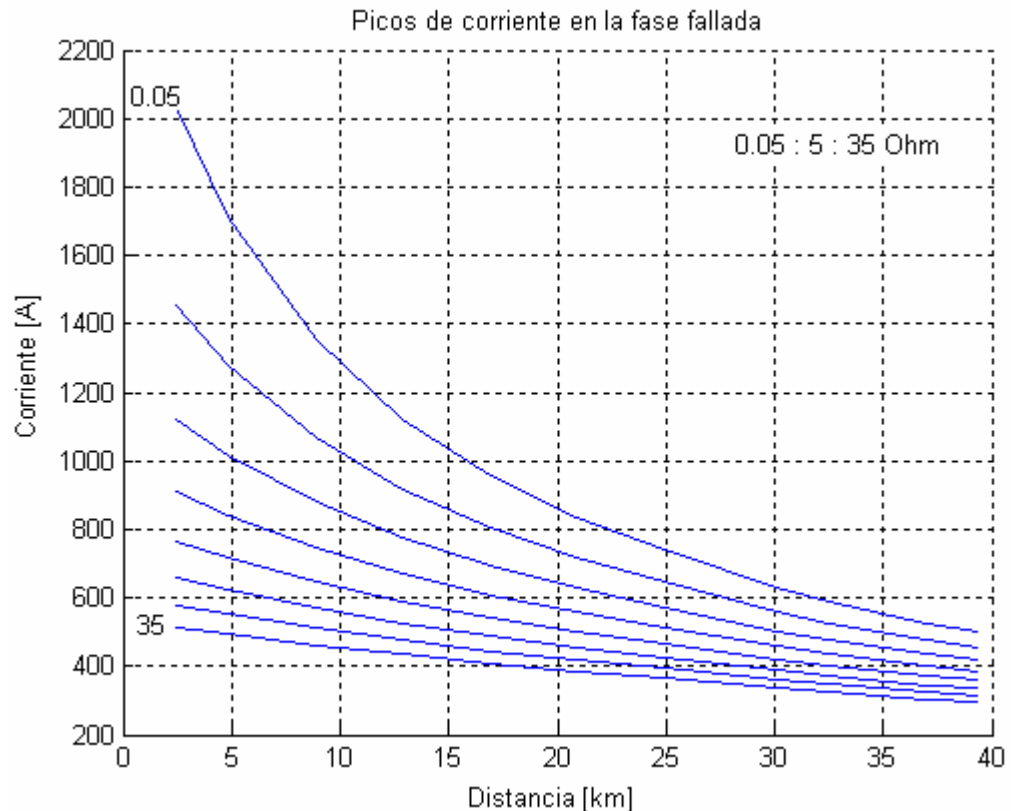


Figura 1.10 Picos de corriente para las diferentes distancia de falla.

Al analizar las curvas se aprecia como el pico de la corriente disminuye a medida que la falla se separa de la fuente, y aumenta conforme disminuye la resistencia de falla. De acuerdo con estos resultados se puede concluir que existe una estrecha relación entre el pico de corriente y la impedancia equivalente del circuito en falla. Cabe resaltar que la magnitud de la corriente también depende de las condiciones iniciales del sistema que se este analizando.

➤ Efecto de la constante de tiempo

En la figura 1.11 se observa que la constante de tiempo disminuye conforme la falla se aleja de la fuente, para un mismo valor de resistencia de falla. Este

fenómeno se explica al revisar la ecuación de la constante de amortiguamiento α , que es el inverso de la constante de tiempo:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{2L}{R}$$

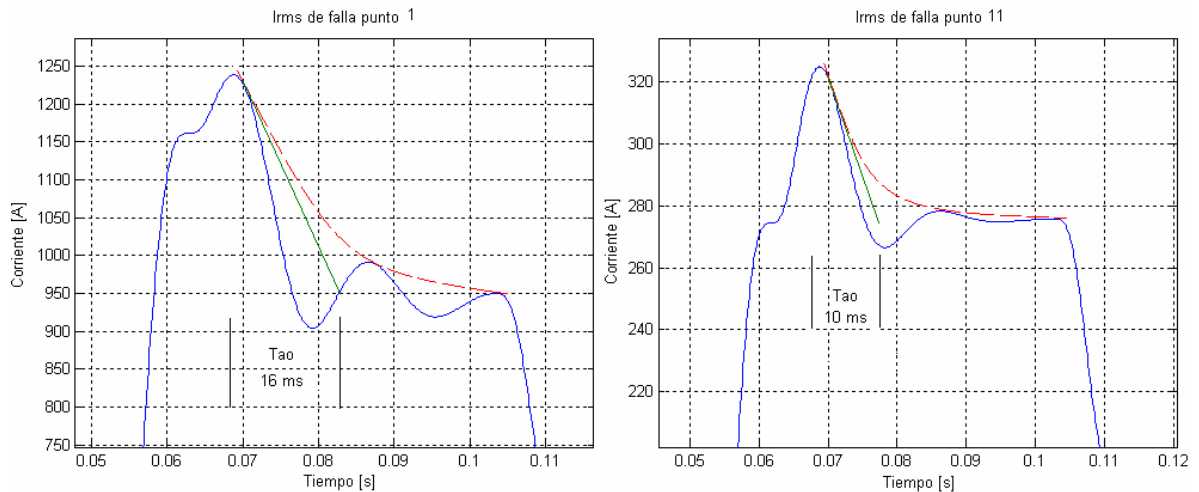


Figura 1.11 Cálculo de la constante de tiempo para Irms de falla en puntos 1 y 11.

Donde los valores de R y L son proporcionales a la longitud de la línea, sin embargo la resistencia en una línea, aumenta más que la inductancia en función de la longitud, debido a que el calibre del conductor disminuye conforme se aleja de la fuente. Para fallas ubicadas a igual distancia de la fuente pero con resistencias de falla diferentes la constante de tiempo disminuye conforme aumenta la resistencia de falla. En la figura 1.12 se muestra un ejemplo de este caso, donde $R1 < R2$.

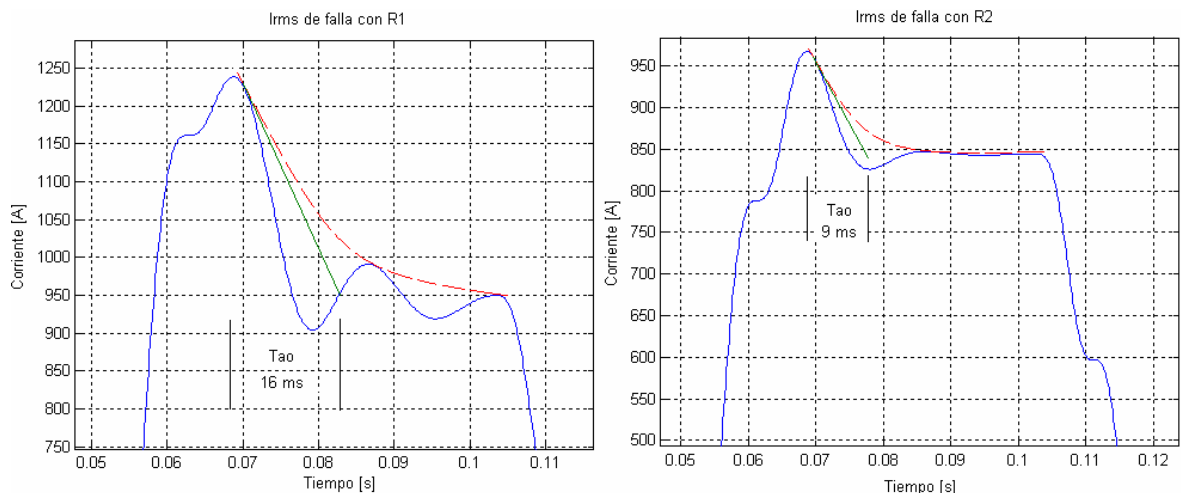


Figura 1.12 Cálculo de la constante de tiempo para Irms de falla con resistencias R1 y R2

➤ Efecto sobre la frecuencia

Para el estudio del efecto de la distancia y resistencia de falla sobre la frecuencia es necesario tener en cuenta que las señales de tensión y corriente simuladas en este ejemplo presentan dos transitorios uno producido por la falla y otro producido por la acción de las protecciones, como se observa en la figura 1.9.

De acuerdo con los objetivos de este trabajo, se estudiará el transitorio originado por la falla, por lo tanto no se tendrán en cuenta las componentes de frecuencia producidas por la acción de las protecciones.

En la figura 1.13 se muestra una señal de corriente de falla en el tiempo. Analizando la forma del transitorio producido por la falla se observa un comportamiento bastante amortiguado, en el que el efecto de la frecuencia natural es insignificante. Este comportamiento se debe a la capacitancia de la línea, la cual para sistemas de distribución es despreciable.

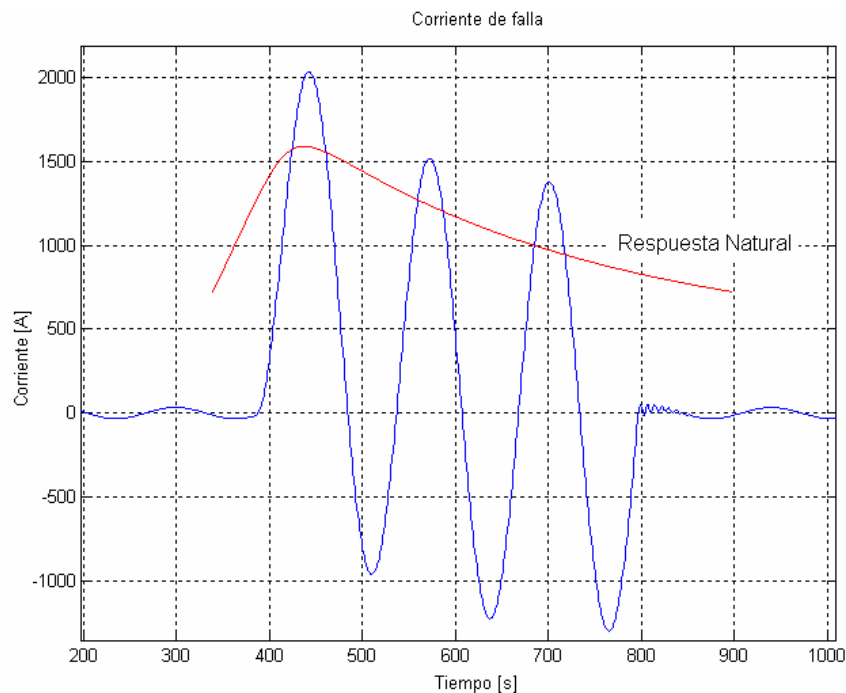


Figura 1.13 Relación entre la corriente de falla y la respuesta natural

Debido a este comportamiento no es posible relacionar la frecuencia natural con la distancia y resistencia de falla, sin embargo las señales I_{rms} presenta un comportamiento interesante el cual sería importante analizar. En la figura 1.14 se muestran las señales $I(t)$ e I_{rms} de falla.

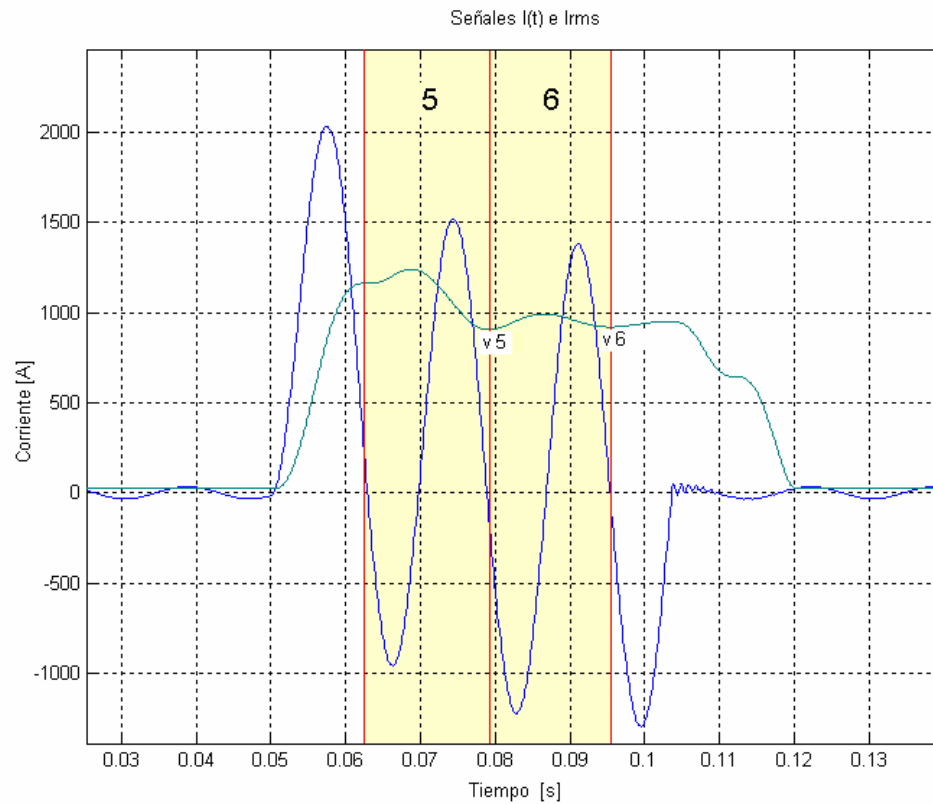
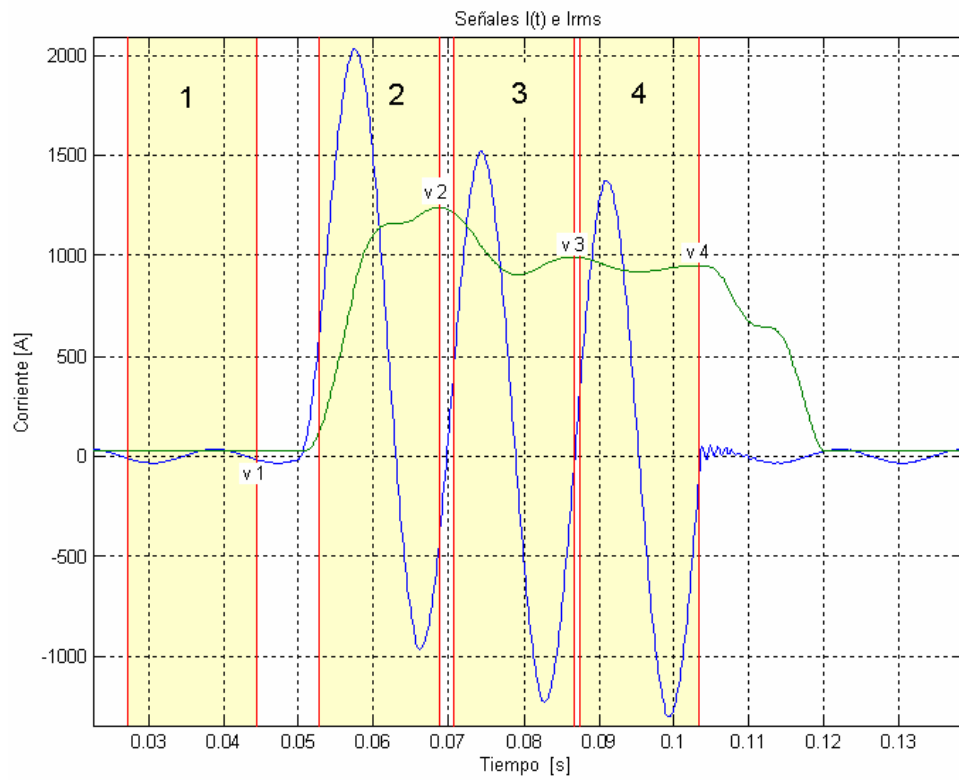


Figura 1.14 Relación entre el amortiguamiento de $I(t)$ y las oscilaciones de I_{rms}

En esta figura se observan oscilaciones en la señal Irms relacionadas con el amortiguamiento de la señal en el tiempo. Este comportamiento se explica analizando el proceso de conversión a valor rms, donde se toman ventanas de 16 ms y se calcula el valor rms de la sección de señal comprendida en cada ventana.

En la figura 1.14 se muestran 6 ventanas que corresponden al cálculo de los valores v_1 a v_6 respectivamente, que corresponden a los picos de la señal Irms. Para cada ventana el valor calculado depende del área bajo la curva de la sección de señal comprendida en esta, la cual es variable debido al amortiguamiento de la señal. De esta manera para n ventanas, siendo n el número de muestras de la señal $I(t)$, se tiene el cálculo de todos los valores de Irms, con sus respectivas oscilaciones.

A continuación se muestra la relación entre la frecuencia de las oscilaciones de Irms, con respecto a la distancia y resistencia de falla.

En la figura 1.15 se comparan las frecuencias de las oscilaciones de Irms de dos fallas ubicadas en los puntos 1 (2.5 km) y 11 (40 km) del circuito de la figura 1.8, para la misma resistencia de falla.

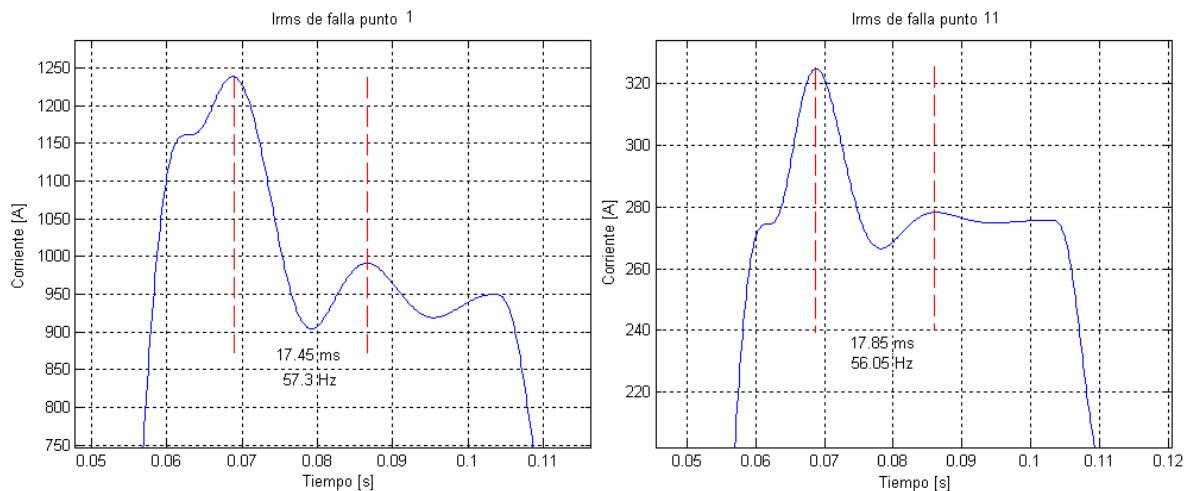


Figura 1.15 Cálculo de la frecuencia para Irms de falla en puntos 1 y 11.

Analizando la figura 1.15 se observa un que la frecuencia de las oscilaciones de Irms disminuye conforme la falla se aleja de la fuente.

En la figura 1.16 se comparan las frecuencias de oscilación de Irms de dos fallas ubicadas en el mismo punto, con diferentes resistencias de falla, donde $R_1 < R_2$. Analizando esta figura, se observa que la frecuencia del transitorio disminuye conforme aumenta la resistencia de falla.

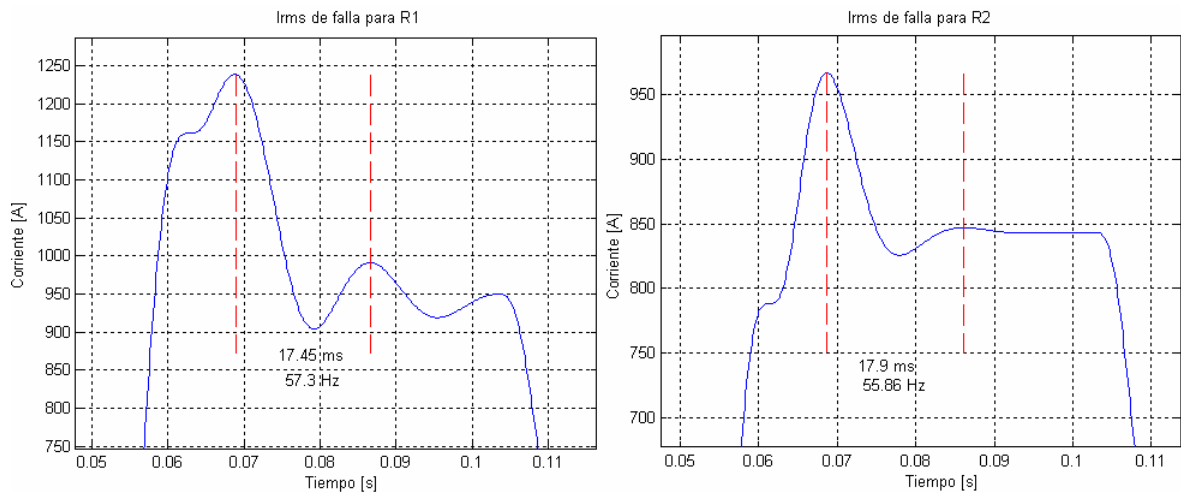


Figura 1.16 Cálculo de la frecuencia para Irms de falla con resistencias R1 y R2.

Finalmente se observa un comportamiento similar al presentado por la constante de tiempo con respecto a la distancia y resistencia de falla, lo que corrobora la relación entre las oscilaciones de la señal Irms y la constante de tiempo de la corriente de falla.

Como conclusión de este ejemplo se puede decir que un transitorio brinda información de lo que ocurre en un circuito cuando hay una falla. En este trabajo se utilizarán algunas herramientas y métodos que permitan aprovechar mejor la información que brinda un transitorio.

1.3 SIMULACIÓN DEL TIPO DE FALLA

Para hacer un análisis en estado transitorio de falla en un sistema de distribución, se tomó el circuito de [Das] y se simuló en el software ATP. (Ver figura 1.15)

Este sistema consta de una línea principal, dos ramales monofásicos y un ramal trifásico, con 21 barras en la cuales se simularon diferentes tipos de fallas para varias resistencias de falla. En la tabla 1.1 se muestran las diferentes fallas simuladas.

Las distancias entre las barras y la cabecera del circuito se muestran en la tabla 1.2, y las resistencias de falla usadas en la simulación con su respectiva nomenclatura se muestran en la tabla 1.3

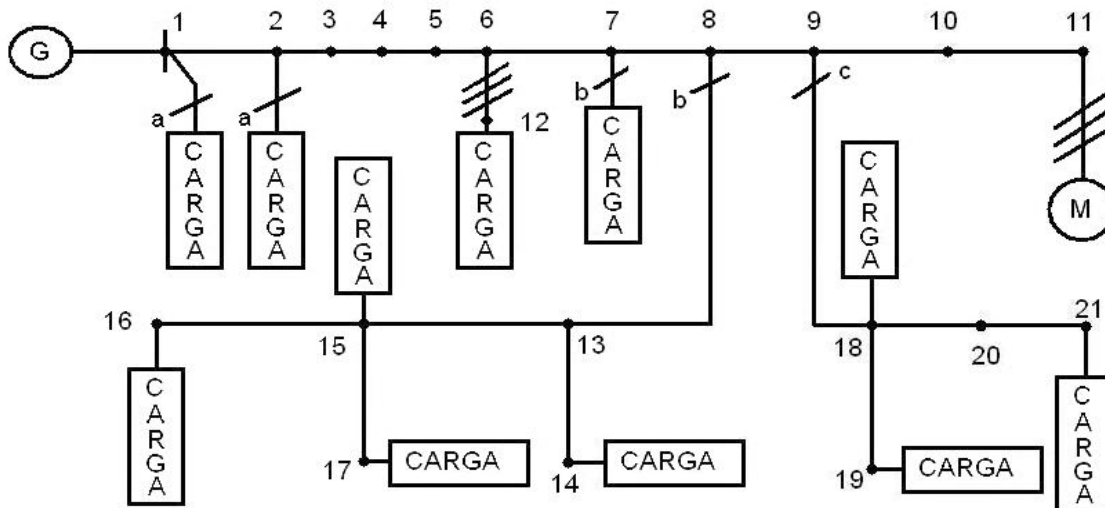


Figura 1.17 Sistema de Prueba

Falla	Tipo	Fases			Nodos																				
		A	B	C	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
01	1ΦT	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
02	1ΦT		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
03	1ΦT			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	x	x
04	2Φ	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
05	2Φ		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
06	2Φ	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
07	2ΦT	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
08	2ΦT		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
09	2ΦT	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
10	3Φ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
11	3ΦT	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										

Tabla 1.1 Códigos Empleados en la Simulación en ATP.

Nodo	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Distancia [km]	2,414	4,828	8,851	12,874	16,897	20,92	24,943	30,093	32,507	37,013	39,427

Nodo	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Distancia [km]	23,334	32,507	34,921	34,291	37,335	37,335	34,921	37,335	38,14	41,359

Tabla 1.2 Distancias entre las barras y la cabecera del circuito.

RF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rfalla [Ω]	0,05	5	10	25	50	2	15	20	30	35	3	12	17	23	33

Tabla 1.3 Resistencias de Falla.

En la simulación de los casos de falla mencionados se tomaron las señales de tensión y corriente medidas en la cabecera del circuito, para el tiempo que dura la falla, y se almacenaron en archivos .mat para facilitar su análisis con el software Matlab.

La frecuencia de muestreo para las señales de falla simuladas fue de 7680 Hz es decir, se tomaron 128 muestras por ciclo. Esta frecuencia de muestreo esta dentro del rango de los medidores comerciales.

En los siguientes capítulos se muestra el análisis hecho a estas señales, usando herramientas mas poderosas como son las Series de Tiempo y la transformada de Wavelet, con el fin de obtener de ellas información valiosa para la localización de la falla.

2 APLICACIÓN DE SERIES DE TIEMPO PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS

En este capítulo se presentan la aplicación de Series de Tiempo en el análisis de transitorios, se muestra su definición, sus componentes y la relación de estos con los componentes de un transitorio, y los tipos de transformadas para las series de tiempo; adicionalmente se proponen las transformadas de Box-Cox y Wavelet como herramientas para la caracterización de un transitorio, se explican algunos conceptos básicos y su utilidad en la localización de la falla.

2.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE SERIES DE TIEMPO

Se llama “Series de Tiempo” a un conjunto de mediciones de cierto fenómeno o experimento registrado secuencialmente en el tiempo, (en escala de días, meses o años) como se muestra en el ejemplo de la figura 2.1

A pesar de tener las señales de tensión y corriente de falla en la escala de milisegundos, para este análisis se consideran como series de tiempo. Antes de analizar detalladamente las señales de falla es necesario conocer algunos conceptos básicos de series de tiempo. [Chatfield].

2.1.1 Componentes de las series de tiempo

Una serie de tiempo puede ser expresada como suma o producto de cuatro componentes: tendencia, estacionalidad, variabilidad y error aleatorio. Para explicar cada uno de estos componentes se utilizará el ejemplo de serie de tiempo mostrado en la figura 2.1.

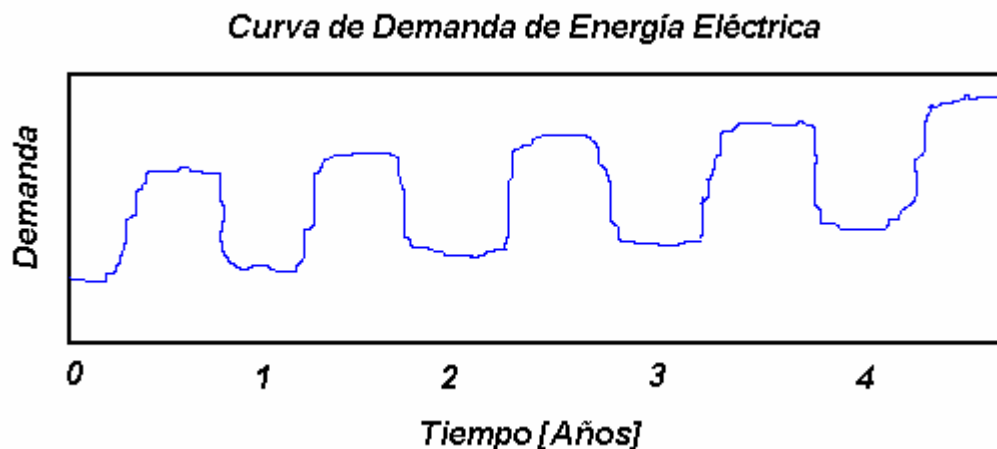


Figura 2.1 Ejemplo de una serie de tiempo.

En este ejemplo se muestra una serie de tiempo convencional, una curva de demanda de energía eléctrica por un periodo de tiempo de varios años.

Se puede ver que la demanda es más alta en la primera mitad del año y más baja en la segunda mitad, también se observa que la demanda crece con el tiempo, y aunque no se alcanza a apreciar, existen variaciones cíclicas diarias en la demanda que dependen de las horas del día, además de esto existe un error aleatorio.

➤ **Tendencia**

Puede ser definida como un cambio a término largo en un nivel principal. En el ejemplo de la curva de demanda la tendencia es creciente, ya que la demanda media aumenta con el paso del tiempo. En la figura 2.2 se muestra la tendencia de la curva de demanda de energía eléctrica.

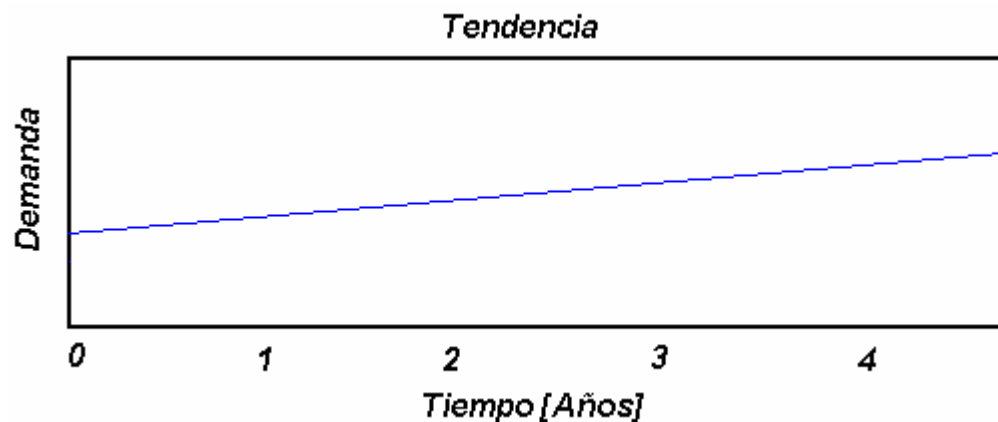


Figura 2.2 Tendencia de la Serie de Tiempo.

➤ **Estacionalidad**

Son variaciones que se repiten cada periodo de tiempo. En el ejemplo vemos un comportamiento en la demanda similar dependiendo de las estaciones, invierno o verano. En la figura 2.3 se muestra la estacionalidad de la curva de demanda de energía eléctrica.

➤ **Variabilidad**

Aparte de los efectos estacionarios, algunas series de tiempo muestran variación en un período fijo debido a alguna otra causa física. En el ejemplo de la curva de demanda no se presenta variabilidad pues la demanda en las estaciones

permanece constante. Este fenómeno también se conoce como ciclicidad, y se puede apreciar en la figura 2.4. También se entiende por variabilidad como el cambio de una estación con respecto a otra.

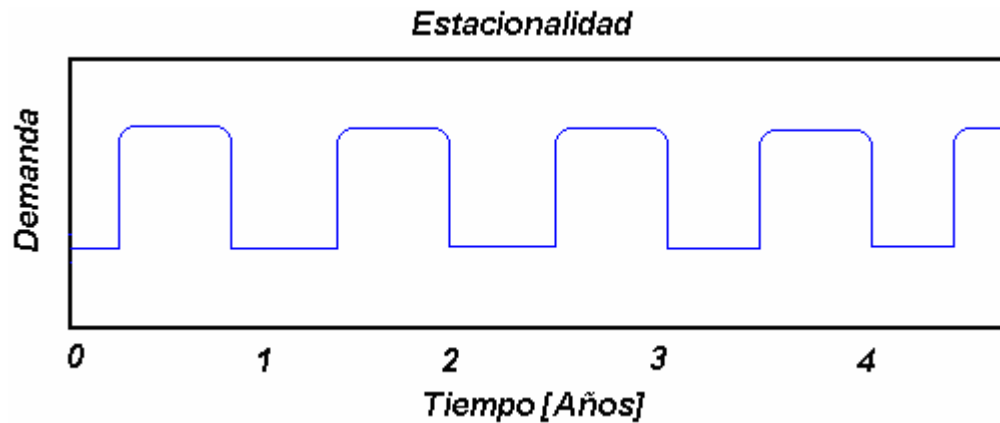


Figura 2.3 Estacionalidad de la Serie de Tiempo.

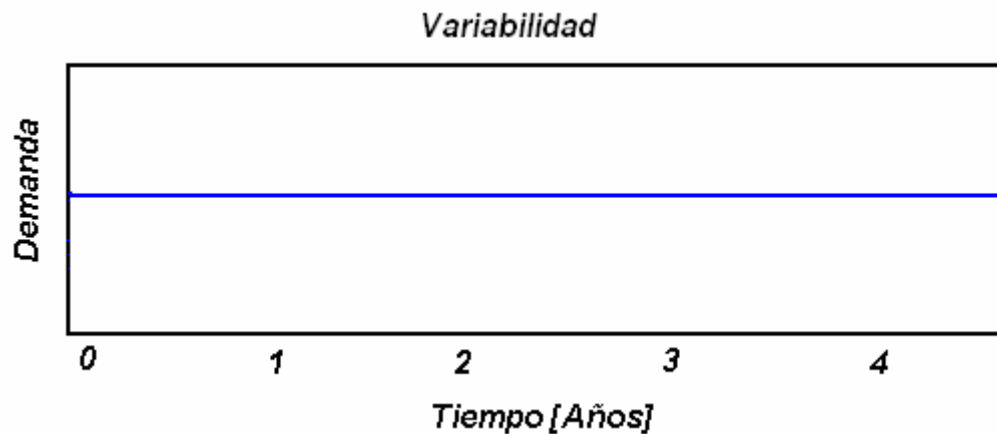


Figura 2.4 Variabilidad de la Serie de Tiempo.

➤ Error aleatorio

Son pequeñas fluctuaciones aleatorias que presentan las series de tiempo (ruido). En la curva de demanda del ejemplo, estas variaciones tipifican la diferencia en la demanda de un día con respecto a otro. El error aleatorio de la curva de demanda se aprecia en la figura 2.5.

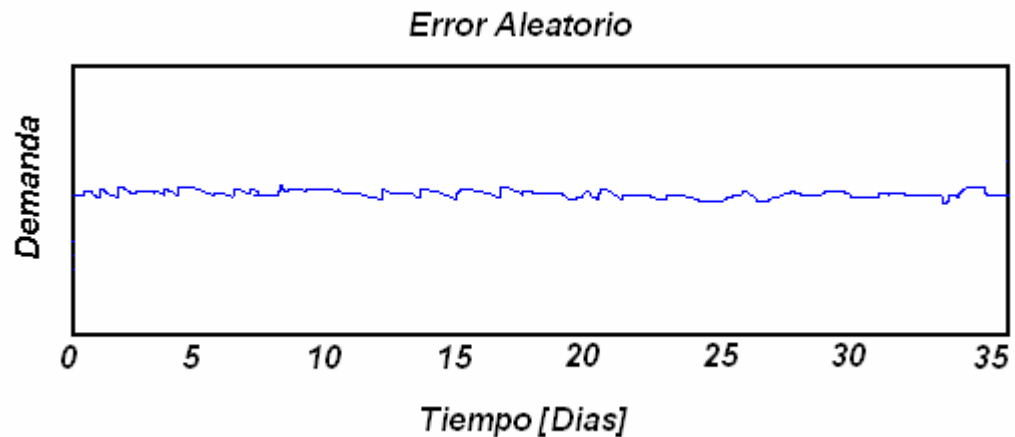


Figura 2.5 Error Aleatorio de la Serie de Tiempo.

2.1.2 Transformadas para las series de tiempo

Para el análisis de series de tiempo existen diferentes tipos de transformadas que actúan sobre los componentes de la serie, realizando una o varias de las siguientes operaciones:

- Separación de una serie de tiempo en sus componentes.
- Caracterización de sus componentes.
- Minimización o maximización de sus componentes.
- Predicción del comportamiento futuro de la serie.

Para las señales de tensión y corriente de falla consideradas como series de tiempo, se presenta un comportamiento especial en cuanto a sus componentes, debido a su carácter transitorio. Para seleccionar el tipo de transformada aplicable a este tipo de señales, es necesario separarla en sus componentes como serie de tiempo y analizar la utilidad de cada uno para la localización de la falla.

2.1.3 Componentes de la serie de tiempo asociada a un transitorio

A continuación se muestran los componentes de la serie de tiempo “Corriente de Falla Monofásica en la fase fallada”, y se analiza su utilidad en la localización de la falla. La señal a analizar es la parte transitoria de la corriente de falla mostrada en la figura 2.6 y su descomposición se hace de forma gráfica y aproximada.

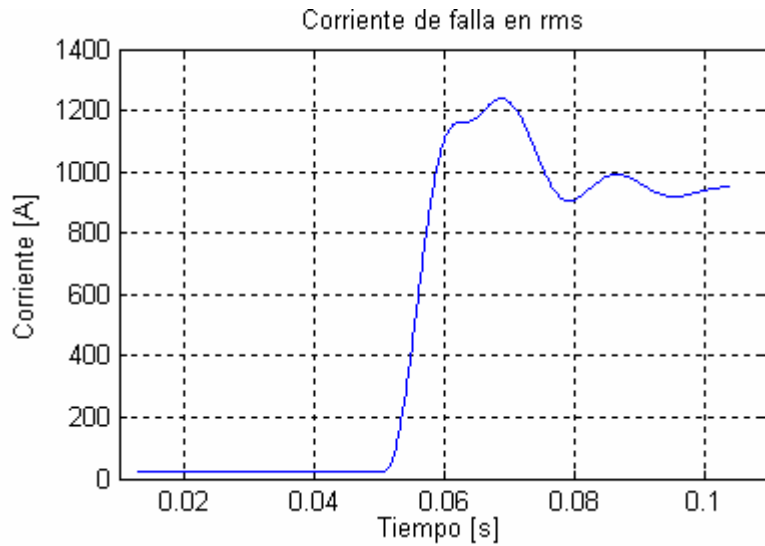


Figura 2.6 Señales Irms e It para una falla monofásica.

La estacionalidad en una señal de falla durante el estado transitorio está asociada a la frecuencia natural del sistema. En la figura 2.7 se muestra un bosquejo de la estacionalidad de la señal Irms.

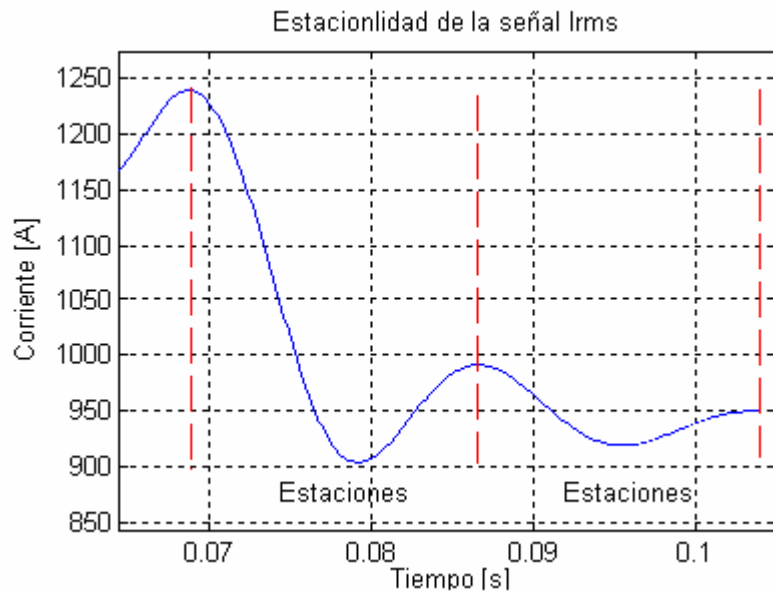


Figura 2.7 Estacionalidad de la señal Irms de falla.

Es importante resaltar que no es posible diferenciar la estacionalidad en transitorios sobre y críticamente amortiguados, debido a que la señal no presenta oscilaciones periódicas. Si embargo aunque la estacionalidad no pueda usarse para obtener información en todos los tipos de transitorios, podría usarse para diferenciar entre los subamortiguados y los otros.

La tendencia en una serie de tiempo se define como la pendiente a la que una serie crece o decrece, en una señal de falla en estado transitorio la tendencia puede asociarse al pico del transitorio y al tiempo que tarda en alcanzarlo. En la figura 2.8 se muestra un bosquejo de la tendencia de la señal Irms de falla. Donde la línea roja representa la tendencia de la señal Irms de falla en estado transitorio, y su pendiente podría ser utilizada en la localización de la falla pues está relacionada con la magnitud y la constante de tiempo del transitorio.

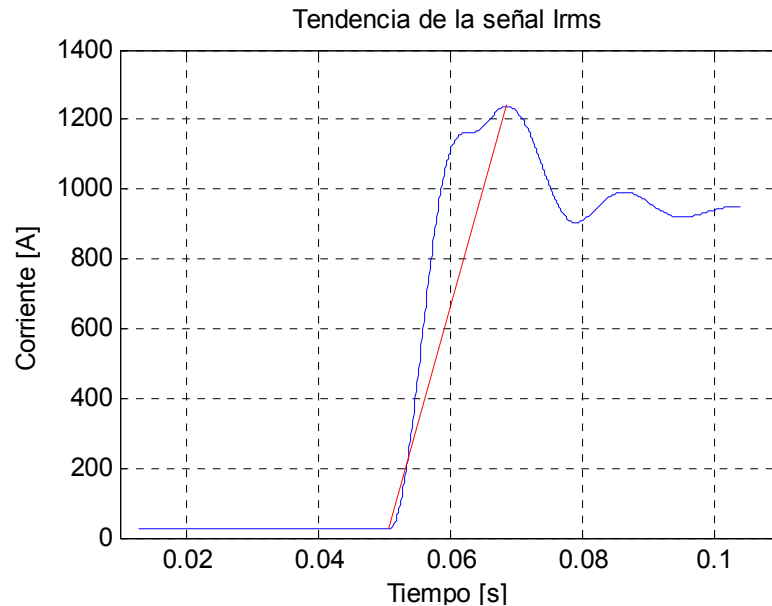


Figura 2.8 Tendencia de la señal Irms de falla.

El error aleatorio está asociado a variaciones muy pequeñas que en el caso de la señal Irms de la figura 2.6 no se alcanzan a apreciar, sin embargo en la figura 2.9 se muestra otra señal donde se observan estas variaciones, las cuales pueden relacionarse con el contenido de alta frecuencia en un transitorio, donde el error aleatorio es proporcional a este.

La variabilidad representa las variaciones sufridas entre los periodos de una serie de tiempo, por lo que en una señal de falla en estado transitorio puede relacionarse con la constante de tiempo o el amortiguamiento del sistema. En la figura 2.10 se muestra la variabilidad para la corriente Irms de falla en estado transitorio.

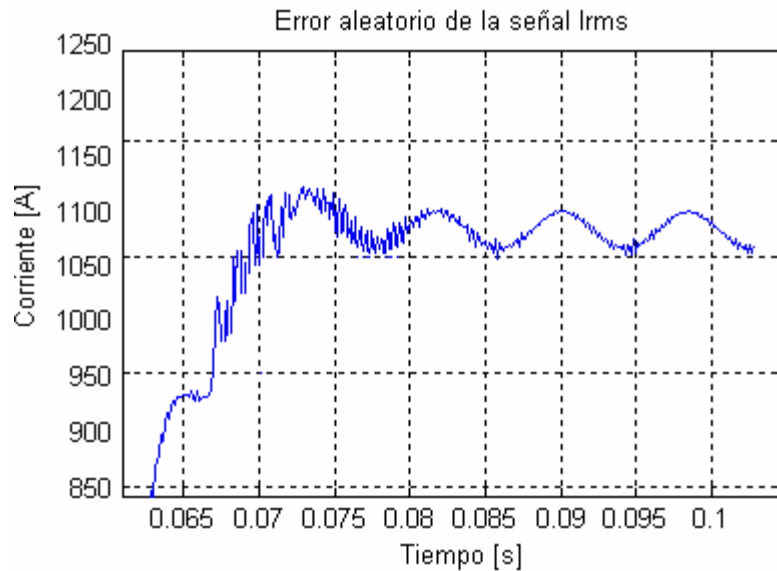


Figura 2.9 Error aleatorio de la señal Irms de falla.

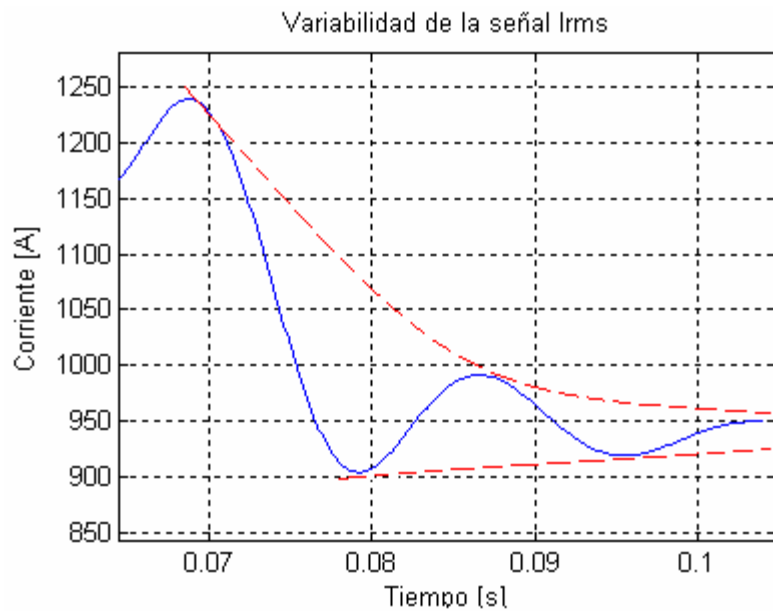


Figura 2.10 Variabilidad de la corriente de falla.

En la figura 2.10 la envolvente representa la variación entre las estaciones de la serie de tiempo, lo que podría asociarse a la constante de tiempo del sistema.

Como resultado de este análisis se puede concluir que para la serie de tiempo asociada a una señal de falla, la estacionalidad, la tendencia, el error aleatorio y la variabilidad, pueden relacionarse con los componentes de un transitorio como son la magnitud, constante de tiempo y frecuencia. Sin embargo se necesitan

herramientas muy poderosas para usar estos componentes en la localización de la falla.

Por esta razón se propone el uso de dos poderosas transformadas, como son la Transformada Box-Cox, para caracterizar tendencia y variabilidad, y la Transformada Wavelet para la estacionalidad y el error aleatorio. Estas herramientas se encuentran disponibles en el software Matlab.

A continuación se explica el funcionamiento de estas transformadas y su aplicación en la localización de fallas.

2.2 TRANSFORMADA BOX – COX (TBC)

Box-Cox es una poderosa transformada que minimiza la variabilidad en la serie de tiempo y la caracteriza a través de un parámetro. En otras palabras suaviza la serie de tiempo, lo que facilita determinar su tendencia, y recoge toda esta información en un solo valor relacionado con la variabilidad. [FTS Toolbox].

Este efecto se aprecia en el ejemplo de la figura 2.11 donde se aplica la transformada Box-Cox a una señal de falla Irms.

La transformada Box-Cox se representa por $y^{(\lambda)}$, donde λ es un parámetro a determinar. La transformada $y^{(\lambda)}$ y el parámetro λ se calculan simultáneamente usando el método de Máxima Probabilidad.

Este procedimiento se lleva a cabo con el ajuste de Mínimos Cuadrados aplicado a la expresión:

$$y^{(\lambda)} = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda * (y^*)^\lambda - 1} \dots\dots\dots(\lambda \neq 0)$$

$$y^{(\lambda)} = y^* * \ln(y) \dots\dots\dots(\lambda = 0)$$

Donde y es la señal discreta a la que se le aplica la transformada, N es el número de puntos, y y^* es la Media Geométrica de la señal, la cual está dada por la expresión:

$$y^* = \exp \left[\frac{\sum_i^N \ln(y_i)}{N} \right]$$

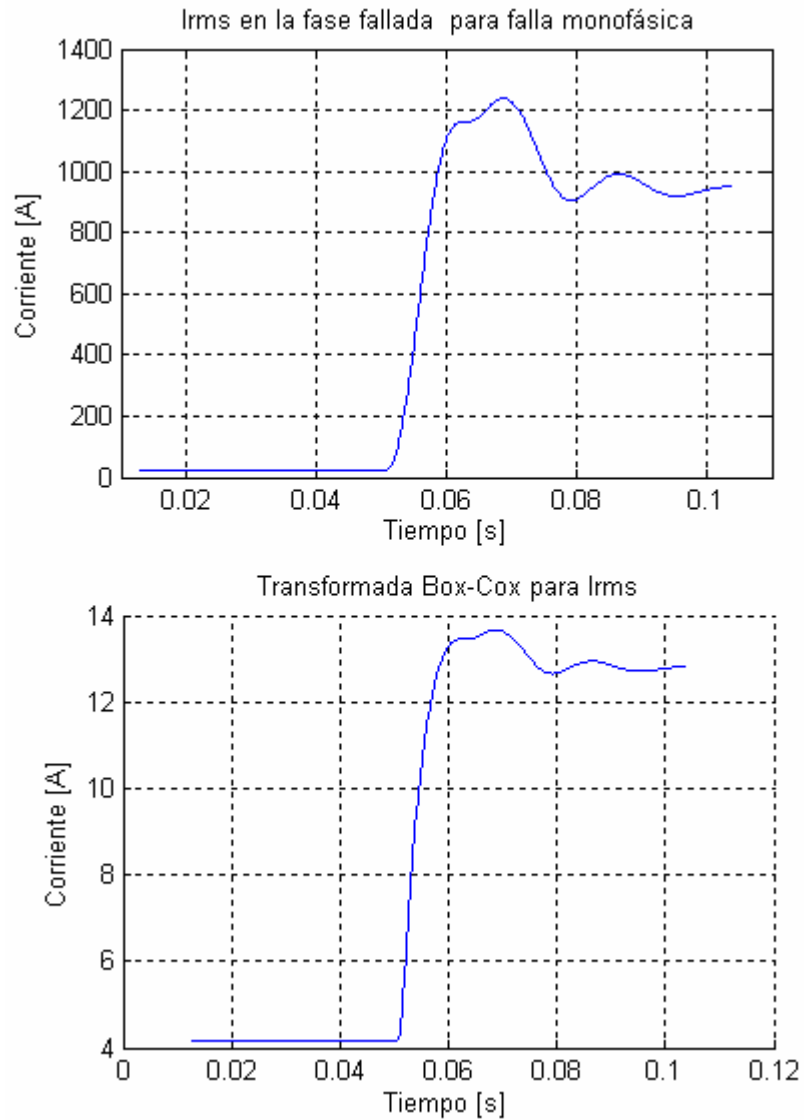


Figura 2.11 Transformada Box-Cox para Irms.

De acuerdo con la anterior expresión los valores de y no pueden ser negativos pues el logaritmo natural sería imaginario, por esta razón la transformada Box-Cox es aplicable únicamente a series de tiempo con valores positivos.

La máxima probabilidad de λ corresponde al valor de λ para el cual la Sumatoria del Error Cuadrático (SSE) del ajuste modelado $y^{(\lambda)}$ es mínima. SSE está dado por la expresión:

$$SSE = \sum_i^N (y_i^{(\lambda)} - (Mx_i + B))^2$$

Donde $Mx_i + B$ representa la ordenada de la recta originada por la regresión lineal del ajuste modelado $y^{(\lambda)}$, en cada caso.

Los valores definitivos para la transformada $y^{(\lambda)}$ y el parámetro λ se obtienen ajustando el modelo para varios valores de λ y escogiendo el valor que corresponda al mínimo valor de SSE.

El parámetro λ es de gran utilidad para el análisis de las señales de falla pues caracteriza la variabilidad, la cual está estrechamente relacionada con el transitorio. En la figura 2.12 se muestra la relación entre λ y la variabilidad de la serie de tiempo.

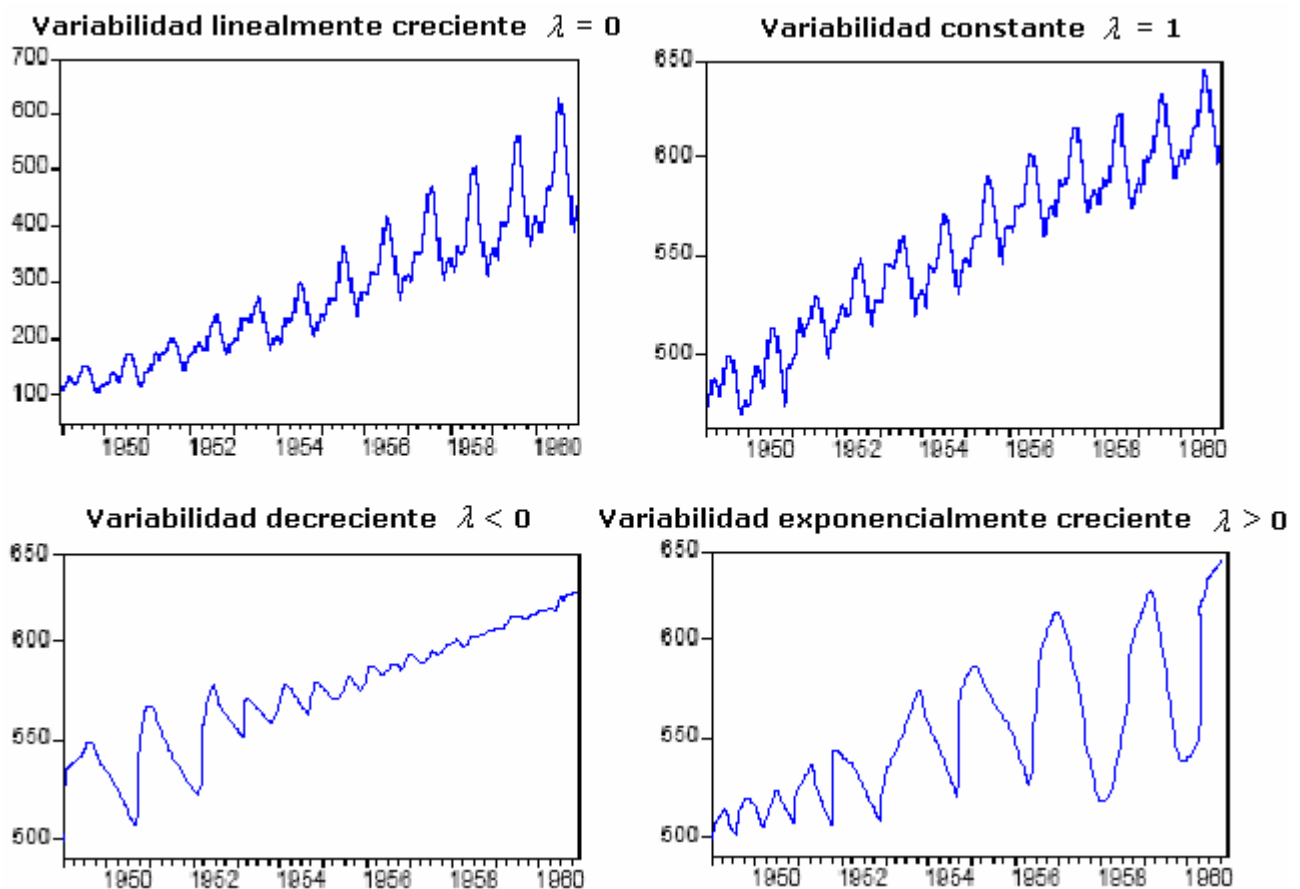


Figura 2.12 Relación entre λ y la variabilidad en una serie de tiempo.

2.2.1 Aplicación de la TBC una señal de falla en estado transitorio

Para aplicar la transformada Box-Cox a la señales de falla se debe tener en cuenta que ésta es aplicable sólo a series de tiempo con valores positivos. Bajo

esta condición no es posible aplicar esta transformada a las señales $i(t)$ y $v(t)$, por lo que el análisis se llevará a cabo con las señales I_{rms} y V_{rms} .

En la figura 2.13 se muestran las señales I_{rms} y V_{rms} de la fase fallada desde antes de ocurrir una falla monofásica hasta su extinción, con sus respectivos valores de λ .

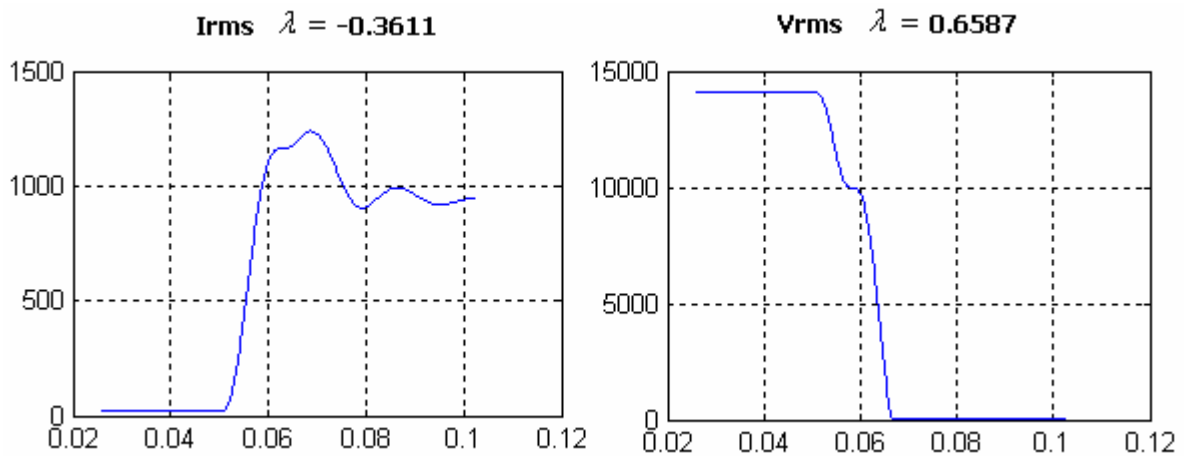


Figura 2.13 Parámetro λ para las señales de falla.

Para la señal V_{rms} el valor del parámetro λ es positivo lo que corresponde a una variabilidad creciente. Esto se explica al considerar los dos escalones que presenta la señal de tensión en su caída, donde el segundo crece con respecto al primero, como se muestra en la figura 2.13. En el caso de la señal I_{rms} , el valor del parámetro λ es negativo lo que corresponde a una variabilidad decreciente lo que se debe al amortiguamiento del transitorio.

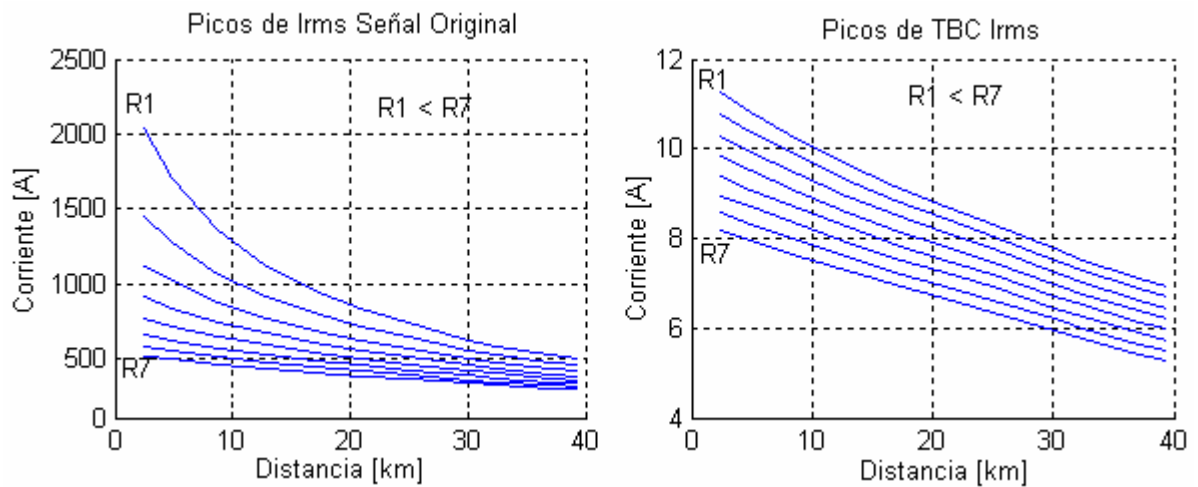


Figura 2.14 Comparación entre los picos de I_{rms} y TBC de I_{rms} .

Como se mencionó anteriormente, la TBC facilita la determinación de la tendencia ya que al minimizar la variabilidad, disminuye los picos, lo que produce una respuesta más lineal al momento de comparar los picos de un mismo tipo de falla en función de la distancia y la resistencia de falla.

En la figura 2.14 se muestran los picos de corriente en función de la distancia de falla, donde cada curva equivale a un valor de resistencia de falla. La figura 2.14 a) corresponde a los picos de la señal original y la 2.14 b) a los picos de la señal luego de aplicarle la TBC.

Analizando estos resultados se puede concluir que la transformada Box-Cox es una herramienta muy útil para caracterizar la serie de tiempo asociada a una señal de falla y por consiguiente para estimar su localización. Esto se debe a que el valor del parámetro λ está estrechamente relacionado con la constante de tiempo del transitorio, y el pico de TBC de Irms presenta un comportamiento aproximadamente lineal en función de la distancia y resistencia de falla.

En el siguiente capítulo se estudia con más detalle esta transformada para obtener los descriptores que serán usados en la localización de la falla.

2.3 TRANSFORMADA WAVELET

La Transformada de Wavelet se puede describir como una transformada para las series de tiempo, capaz de descomponer una serie en diferentes secuencias de datos, con rangos de frecuencia delimitados. [Wavelet Toolbox].

Al hablar de frecuencia podría pensarse en la transformada de Fourier. Sin embargo la transformada Wavelet presenta una gran ventaja para el estudio de transitorios, ya que no solo presenta el contenido de frecuencias de una señal, sino que indica cuando ocurren y su duración en el tiempo.

Antes de explicar en que consiste esta transformada es importante entender que es una “wavelet”. La palabra “wavelet” significa ondilla y es una onda de duración efectiva limitada que tiene un valor promedio cero. En la figura 2.15 se presentan para efecto de comparación una “wavelet” y una onda senoidal.

Mientras que el análisis de Fourier consiste en descomponer una señal en funciones senoidales de frecuencias múltiplos de la suya propia. El análisis de “wavelets” consiste en descomponer una señal en versiones escaladas móviles de la “wavelet” original. Al comparar la “wavelet” con la senoidal se puede ver que las señales con cambios bruscos como los transitorios se pueden analizar mejor con una “wavelet” irregular.

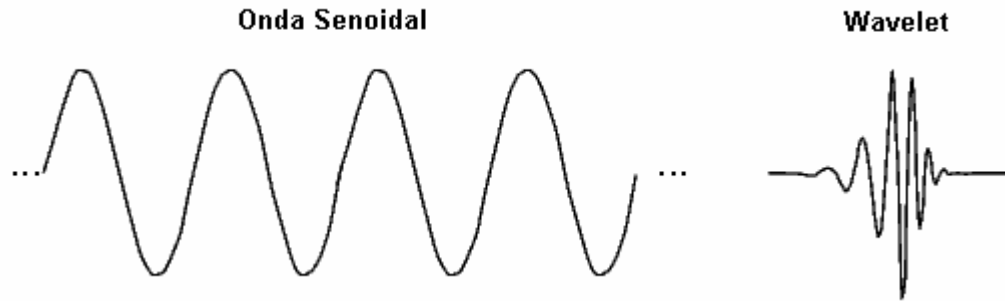


Figura 2.15 Comparación entre una wavelet y una senoidal.

A continuación se muestra un ejemplo para explicar de manera gráfica y sencilla el funcionamiento de la transformada Wavelet. Considérese la señal original mostrada en la figura 2.16 a), definida en el intervalo de tiempo $t_i - t_f$, y la “wavelet” mostrada en la figura 2.16 b), definida en el intervalo de tiempo $t_i - t_o$.

La señal original se compara desde su inicio con la “wavelet” y se calcula el valor C , que representa qué tanto se correlaciona la “wavelet” con la sección de la señal. Ver figura 2.16 c). El valor C se conoce como “coeficiente de correlación” y varía entre cero y uno, si C vale uno quiere decir que la “wavelet” es igual a la señal original en el tramo analizado. Es importante resaltar que los resultados dependen de la forma de la “wavelet” que se elija.

La “wavelet” se desplaza hacia la derecha un tiempo d , y se calcula el valor de C para este tramo, como se muestra en la figura 2.16 d). La “wavelet” se continúa desplazando hasta cubrir toda la señal, calculando el valor de C para cada tramo. Luego la “wavelet” se escala en el tiempo por un factor e y se calculan nuevamente los valores de C para cada tramo de la señal original, como se muestra en las figuras 2.16 e) y 2.16 f). Este procedimiento se repite para todas las escalas hasta que la wavelet alcance el mismo tamaño que la señal original, como se muestra en la figura 2.16 g).

Al terminar, se tendrán los coeficientes de correlación calculados a diferentes escalas de tiempo, por las diferentes secciones de la señal. Los coeficientes constituyen los resultados de una regresión de la señal original obtenida por las “wavelets”.

Las gráficas de los coeficientes de la transformada de Wavelet son precisamente la representación escala-tiempo de la señal, es decir los coeficientes calculados para todos los factores de escala e , y para todos los desplazamientos d . Un ejemplo de esta gráfica se muestra en la figura 2.17.

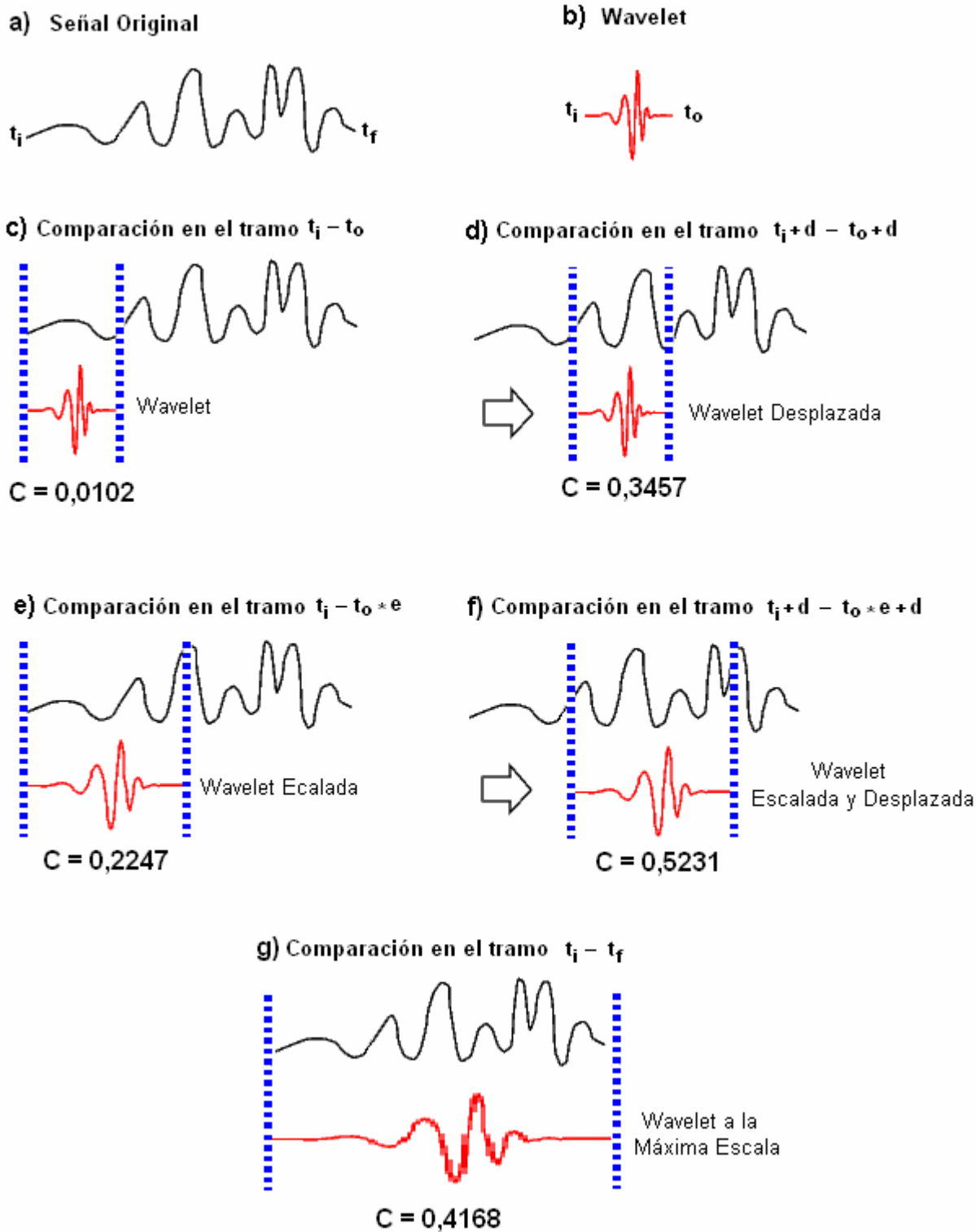


Figura 2.16 Funcionamiento de la Transformada Wavelet.

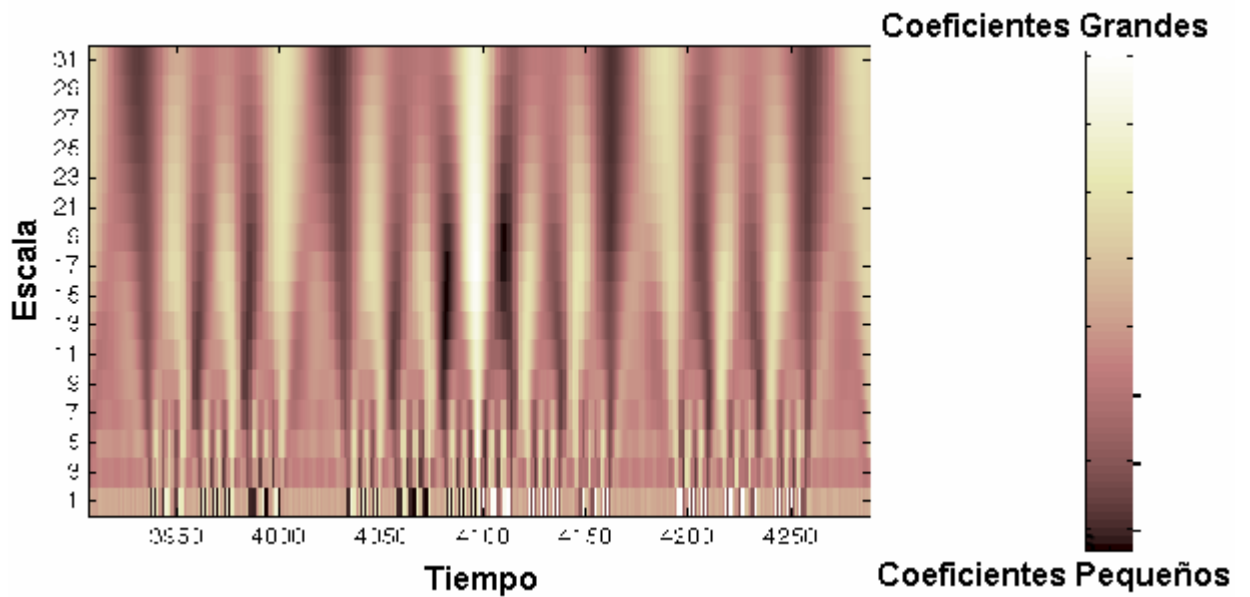


Figura 2.17 Coeficientes de la Transformada Wavelet.

En el ejemplo descrito hace referencia a la Transformada Wavelet Continua (TWC), lo cual brinda una idea de su principio de funcionamiento. Sin embargo, ya que para la localización de la falla se cuenta con señales discretas tomadas por medidores ubicados en las cabeceras de los circuitos, usará la Transformada de Wavelet Discreta o (TWD). A continuación se explica el funcionamiento de esta transformada y su aplicación en la caracterización del transitorio asociado a una falla.

2.3.1 Transformada Wavelet Discreta (TWD)

En la TWC se miran todas las posiciones y todas las escalas, lo que aumenta el tiempo de cálculo y la memoria requerida. Para agilizar este proceso se utiliza la TWD donde se recorren todas las escalas y posiciones, utilizando escalas diádicas (escalas y posiciones en potencias de 2).

Una manera de implementar la TWD es utilizando filtros, lo que lleva a la transformada rápida de wavelets; una caja a la que entra una señal y de la que salen coeficientes.

Para entender mejor este concepto considérese la señal con múltiples frecuencias mostrada en la figura 2.18.

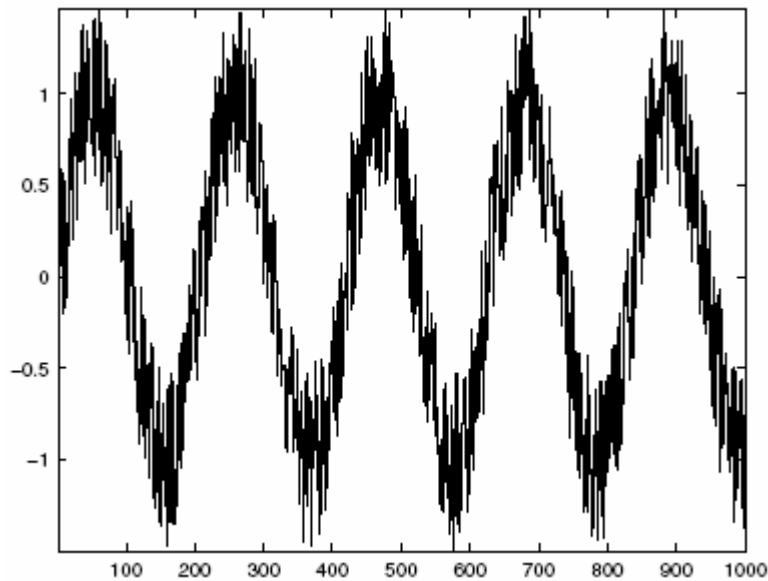


Figura 2.18 Señal con múltiples frecuencias.

Esta señal puede ser expresada como la suma de dos componentes, una de baja y otra de alta frecuencia, como las que se muestran en la figura 2.19.

El contenido de baja frecuencia puede llamarse coeficientes de aproximación, y son los que le dan la identidad a la señal, pues su forma se aproxima a la de la señal original, mientras que al contenido de alta frecuencia se le llama coeficientes de detalle pues representa los detalles de la señal original. Viéndolo desde la perspectiva de series de tiempo, los coeficientes de aproximación de esta señal estarían relacionados con la estacionalidad, mientras que los de detalle se relacionan con el error aleatorio.

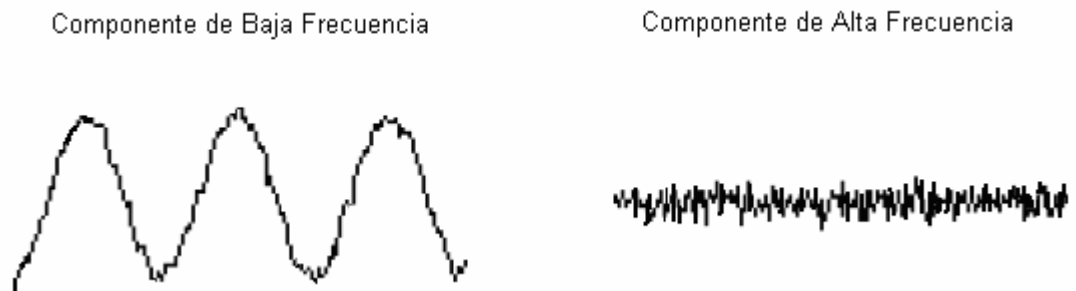


Figura 2.19 Componentes de alta y baja frecuencia.

La TWD se encarga de descomponer una señal en sus coeficientes de aproximación y detalle, para esto usa dos filtros complementarios, uno pasa baja y otro pasa alta.

El filtro pasa baja deja pasar las frecuencias menores a la mitad de la frecuencia de muestreo de la señal original, mientras que el filtro pasa alta deja pasar las frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo de esta señal. Un ejemplo de este proceso se muestra en la figura 2.20.

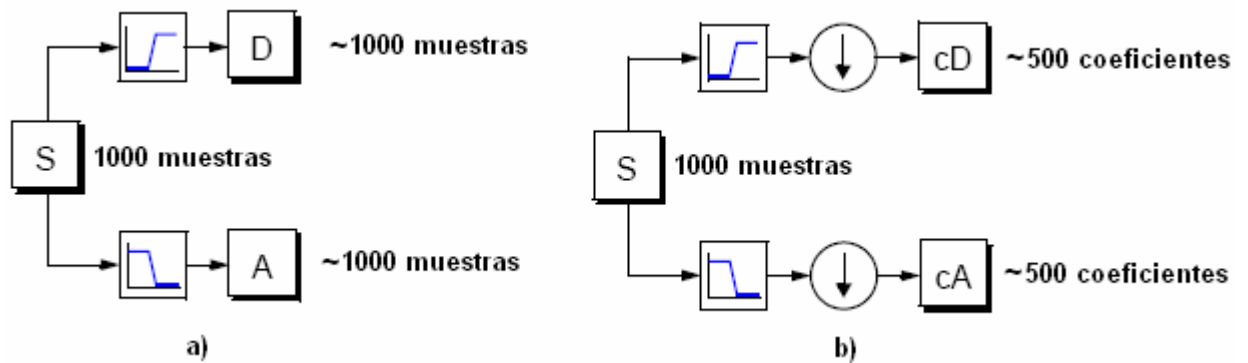


Figura 2.20 Proceso de filtrado de la TWD.

En la parte a) de la figura 2.20 se filtra una señal S de 1000 muestras y se obtienen las señales A y D , que corresponden a la aproximación y al detalle. Estas señales son de aproximadamente 1000 muestras cada una lo que significa que el número de datos se duplicó después del filtrado, para corregir esto la TWD aplica un submuestreo a las señales A y D , obteniendo aproximadamente 500 coeficientes de detalle y 500 de aproximación.

Los coeficientes de detalle y aproximación cD y cA , son el producto final de la TWD, y en ellos se encuentra información valiosa para la caracterización de la señal original.

El proceso de descomposición puede ser iterativo, descomponiendo sucesivamente las aproximaciones y obteniendo una señal descompuesta en muchas componentes de baja resolución.

Este proceso recibe el nombre de árbol de descomposición de "wavelet", y su esquema se presenta en la figura 2.21. Donde la señal original se expresa como la suma de la última aproximación más los detalles de todas las descomposiciones.

Este proceso es muy útil porque al hacer varias descomposiciones se tienen más coeficientes de detalle y se puede obtener información para varios rangos de frecuencia de la señal original.

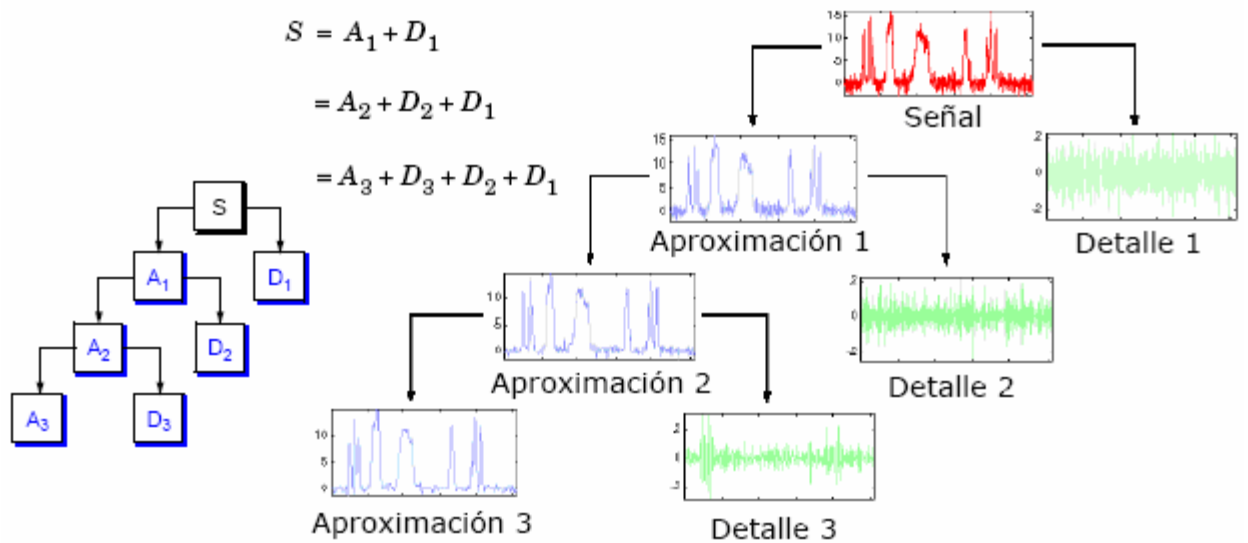


Figura 2.21 Árbol de descomposición de wavelet.

En la aplicación de la TWD es importante el tipo de filtro que se utilice, a continuación se muestran los tipos de filtros más usados.

➤ Tipos de filtros para la TWD

Cada tipo de filtro usado en la TWD tiene asociada una función llamada “Wavelet” madre, que es su análogo en la transformada de Wavelet Continua. Dentro de las “wavelets” madres más famosas y utilizadas se puede citar la “Haar”, que es la más simple y la más antigua.

Se describe con la siguiente función:

$$h(x) = \begin{cases} 1; 0 \leq x < \frac{1}{2}, \\ -1; \frac{1}{2} \leq x < 1, \\ 0; \text{otrovalor} \end{cases}$$

Y su gráfica se muestra en la figura 2.22.

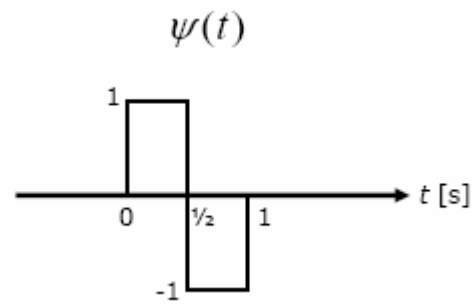


Figura 2.22 Wavelet Haar

En la figura 2.23 se muestran otras wavelets muy utilizadas.

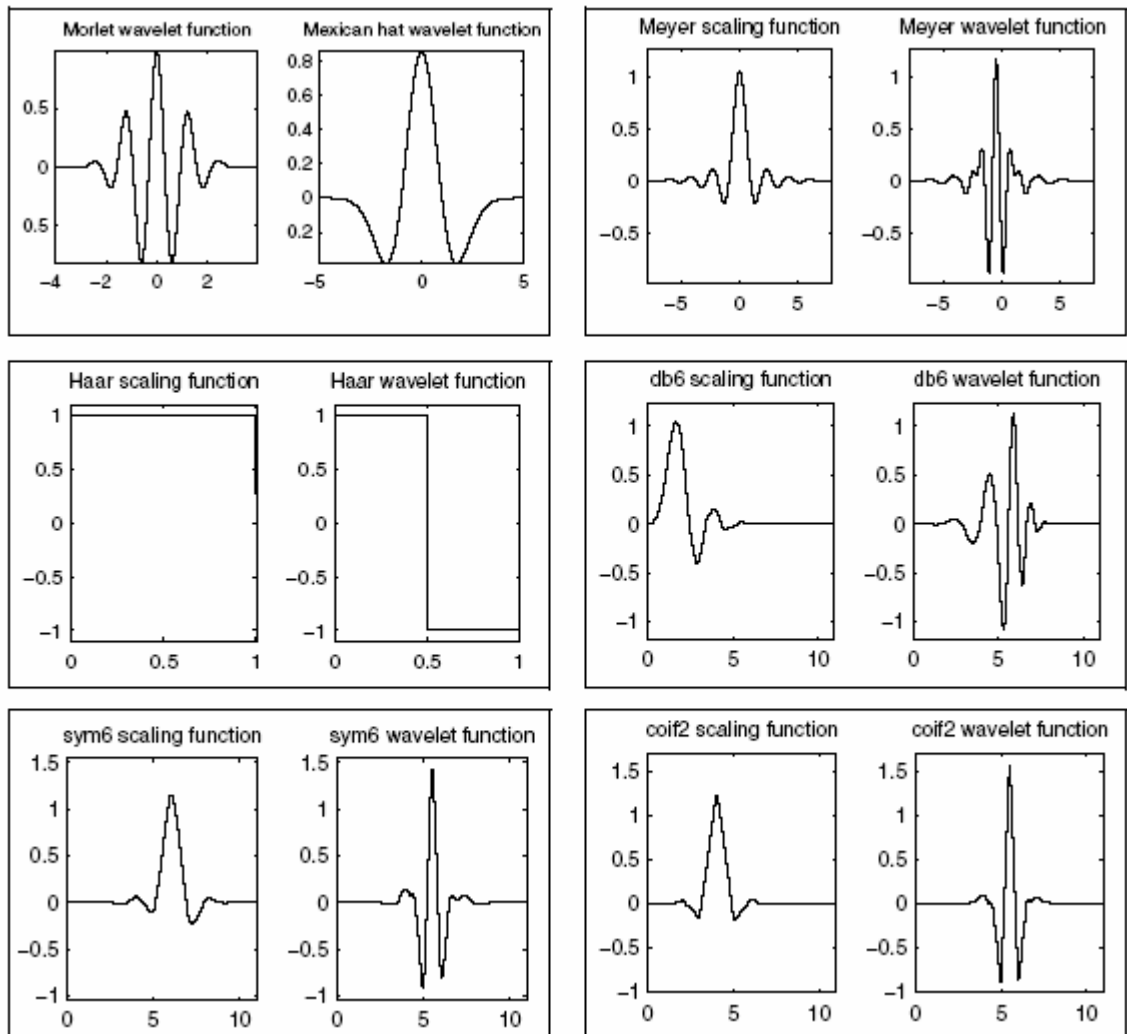


Figura 2.23 Algunas funciones wavelets con su función escalada.

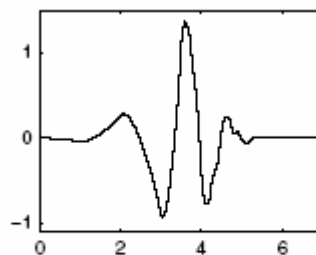
La selección del tipo de “wavelet” a utilizar en la TWD depende de su aplicación. A continuación se evalúa el uso de esta transformada para la señal asociada a un transitorio de falla, y se busca la “wavelet” madre más apropiada para este fin.

2.3.2 Aplicación de la TWD a una señal de falla en estado transitorio

Según los conceptos estudiados, se concluye que la TWD puede usarse como una herramienta para trabajar con series de tiempo que presentan distorsiones no estacionarias y un contenido de frecuencia.

De acuerdo con esto es posible aplicar esta transformada sobre una señal de falla en estado transitorio, puesto que los transitorios son distorsiones no estacionarias presentadas en las señales de tensión y corriente.

Es importante resaltar que estudios realizados para detectar eventos anormales en las señales de tensión y corriente de un sistema de distribución, usando la TWD [Vega Garcia], han arrojaron que la “wavelet” madre mas adecuada para el análisis de distorsiones en señales de tensión y corriente es la daubechies 4 (db4). Por esta razón se escoge la db4 para el análisis de señales de falla en estado transitorio. Su forma se muestra en la figura 2.24.



db4

Figura 2.24 Wavelet madre daubechies 4 (db4).

Una vez seleccionada la “wavelet” madre, es necesario conocer el coeficiente más adecuado para detectar y conocer el tipo de falla que se está presentando.

Para esto se prueba con los coeficientes que sean necesarios, buscando el que brinde una mejor resolución. Este análisis se hace con la herramienta de Matlab (wave menu), que calcula la TWD de cualquier señal, utilizando la “wavelet” madre deseada y permite visualizar los coeficientes de detalle y aproximación.

A continuación se aplica la TWD, usando la db4 y 10 coeficientes de detalle, para una señal Irms de falla, en una falla monofásica. Los resultados se muestran en la figura 2.25.

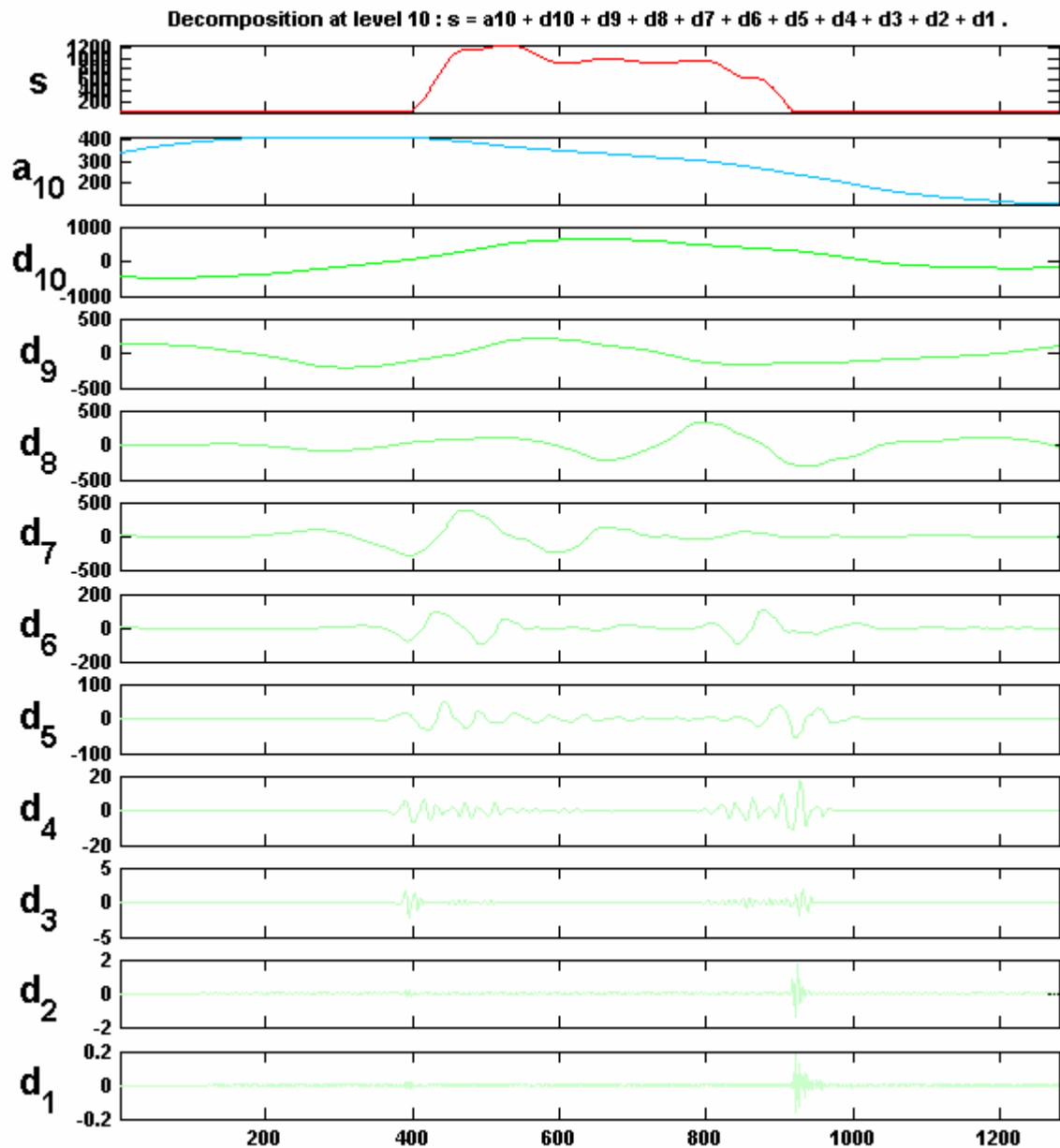


Figura 2.25 Coeficientes de aproximación y detalle para lrms.

De los resultados mostrados en la figura 2.25 se deben observar los valores de los coeficientes entre las muestras 400 y 790, pues este es el tiempo que dura el transitorio antes de ser extinguido.

Analizando estos datos se observa que los detalles 7 y 8 presentan los coeficientes con los valores más altos, lo que quiere decir que en ese rango de frecuencias se encuentra la mayor energía del transitorio. Para saber el rango de frecuencia de estos detalles se toma la frecuencia de muestreo de la señal

original, que como se mencionó en la sección 1.3 es de 7680 Hz, y se divide por 2^N donde N es el detalle en cuestión, lo que arroja la frecuencia mínima del filtro pasa alta del detalle N, para saber la frecuencia máxima se divide la frecuencia de muestreo por 2^{N-1} .

Siguiendo este procedimiento se tiene para el detalle 7 un rango de frecuencias de 60 a 120 Hz, y para el detalle 8 un rango de 30 a 60 Hz, este resultado coherente con el obtenido en la sección 1.2.3 donde se calculaba la frecuencia para dos fallas monofásicas similares a la estudiada en este caso, los valores obtenidos para esas fallas eran poco menores a 60 Hz, es decir que se encuentran en el mismo rango de frecuencias.

Este mismo análisis se realizó para la señal $I(t)$ en una falla monofásica, donde se encontró que el detalle 6 presenta el coeficiente con el valor más alto. Este detalle corresponde a un rango de frecuencias de 120 a 240 hz. Ver figura 2.26.

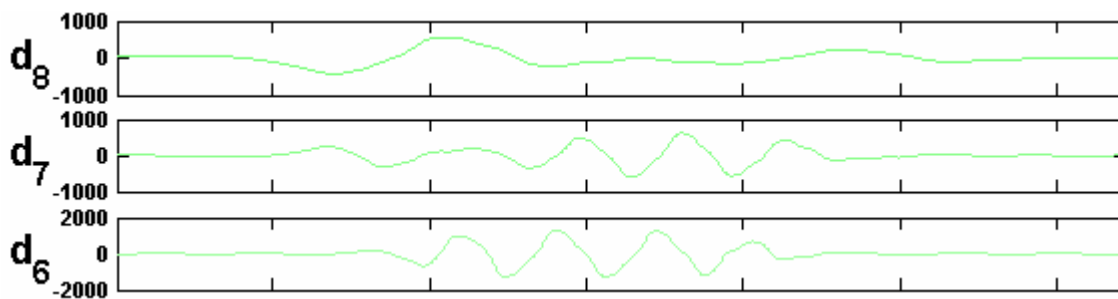


Figura 2.26 Coeficientes de detalle 6, 7 y 8 para $I(t)$.

De este análisis se concluye que la TWD puede ser una buena herramienta para caracterizar el transitorio asociado a una falla, y que los detalles 6, 7 y 8, son los mas apropiados para buscar información que permita la localización de la falla. Estos detalles corresponden a bajas frecuencias y están relacionados con la estacionalidad de la serie asociada al transitorio.

En el siguiente capítulo se estudia con más profundidad esta transformada para obtener los descriptores que serán usados en la localización de la falla.

3 DESCRIPTORES USADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA

En este capítulo se presentan primeramente unas consideraciones iniciales para la localización de la falla y se muestran los descriptores obtenidos con las transformadas de Box – Cox y Wavelet Discreta, y su aplicación para obtener información de la falla tal como, el tipo, la resistencia, la distancia y la zona del circuito donde se presenta la falla.

3.1 CONSIDERACIONES INICIALES

Uno de los componentes de un transitorio que puede brindar información para la localización de una falla es su magnitud, y como se dijo en el capítulo 1, ésta depende de las condiciones iniciales y finales del sistema.

Las condiciones finales del sistema a su vez dependen de la impedancia equivalente que ve el sistema en el momento de falla, las cuales se relacionan con la distancia y la resistencia de falla.

Sin embargo, las condiciones iniciales del sistema dependen del valor instantáneo de las señales de tensión y corriente en el momento exacto que ocurre la falla, el cual está asociado al valor de la onda senoidal en ese instante y a la carga del sistema.

La onda y la carga son variables difíciles de controlar, por lo que se propone trabajar en lo posible con los valores rms de tensión y corriente en por unidad, donde la corriente y tensión nominales sean los valores antes de ocurrida la falla. Esto disminuiría el efecto de la variación de la carga en la forma de las señales rms durante la falla. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de las señales a considerar, I_{rms} y V_{rms} en por unidad.

El efecto del valor de la onda senoidal en el instante de falla se estudiará en el capítulo 4, donde se determinará su relación con el valor de los descriptores.

Otra consideración para facilitar la localización de la falla es el dividir el circuito de prueba por zonas, como se muestra en la tabla 3.1.

Bajo estas consideraciones se muestran a continuación los descriptores empleados para la localización de la falla.

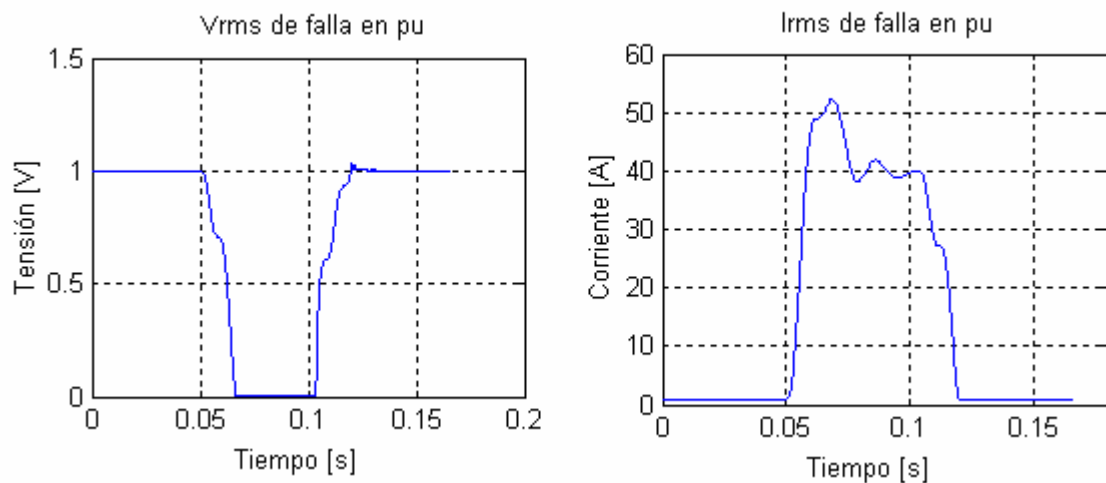


Figura 3.1 Valores de Vrms y Irms de falla en pu.

Zona	Nodos	Tipos de Falla
1	1 - 11	Todas las Fallas
2	8, 13, 14, 15, 16 y 17	Falla 2
3	9, 18, 19, 20 y 21	Falla 3
4	6 y 12	Todas las Fallas

Tabla 3.1 Zonas del sistema de prueba.

3.2 DESCRIPTOR LAMBDA

El parámetro λ como se mencionó anteriormente es el resultado de la transformada Box – Cox y caracteriza la variabilidad de una serie de tiempo, la cual está relacionada con la constante de tiempo del transitorio.

3.2.1 Estimación del tipo de falla

Para determinar el tipo de falla se calculó el parámetro λ de las señales Irms y Vrms por fase para todos los tipos de falla, obteniendo resultados similares para cada tipo, independientemente de la distancia y resistencia de la falla. Los resultados se muestran en la tabla 3.2

Analizando los valores de λ para las señales Irms en los diferentes tipos de fallas se encontraron tres tipos de comportamientos. Las señales Irms de las fases falladas tienen valores de λ entre -1 y 0, mientras que en las Irms de las fases no

falladas los valores de λ son positivos a excepción del tipo de falla 6 donde λ para la fase no fallada es un valor negativo menor que -1.

Falla	Tipo	Parámetro λ					
		Irms			Vrms		
		A	B	C	A	B	C
1	1 Φ T	-0,3611	27,5147	17,5942	0,6587	29,7761	17,8353
2	1 Φ T	20,4506	-0,4050	33,8393	17,5192	0,7158	37,2373
3	1 Φ T	30,0306	18,9933	-0,3150	28,7771	14,9319	0,6243
4	2 Φ	-0,4204	-0,4295	111,5621	3,8948	3,4085	-2,3275
5	2 Φ	113,7734	-0,3029	-0,3086	-2,1260	3,1145	3,1914
6	2 Φ	-0,4131	-7,2315	-0,4141	3,3129	-2,2875	3,8439
7	2 Φ T	-0,3845	-0,4191	8,1989	0,6547	0,7200	8,1933
8	2 Φ T	7,5629	-0,4043	-0,3252	7,5472	0,6911	0,6246
9	2 Φ T	-0,3376	7,7650	-0,3569	0,6776	7,7623	0,7001
10	3 Φ	-0,3630	-0,4352	-0,3787	0,7910	0,8428	0,8360
11	3 Φ T	-0,3631	-0,4352	-0,3788	0,6621	0,6974	0,6935

Tabla 3.2 Parámetro λ para los diferentes tipos de falla.

Estos comportamientos se deben a la forma de la señal para los diferentes casos, y se pueden apreciar en la figura 3.2. De acuerdo con lo anterior, es posible determinar la fase o las fases donde ocurrió la falla usando el valor de λ para las señales Irms, aunque no es posible diferenciar entre una falla bifásica y una a falla bifásica a tierra, ni entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra.

Analizando los valores de λ para las señales de Vrms no se observan patrones que diferencien entre una fase fallada y una no fallada ya que los valores de λ son positivos para ambos casos a excepción de la fase no fallada en las fallas bifásicas donde el valor de λ es negativo.

Estos comportamientos se deben a la forma de la señal para los diferentes casos, y se pueden apreciar en la figura 3.3. De acuerdo con lo anterior es posible usar el parámetro λ de la señal Vrms para diferenciar entre una falla bifásica y una falla bifásica a tierra.

Finalmente es posible conocer el tipo de falla calculando el parámetro λ para las señales Irms de las tres fases y así determinar las fases falladas, en caso de haber dos fases falladas se calcula el parámetro λ de la señal Vrms en la fase no fallada para saber si se trata de una falla bifásica o una falla bifásica a tierra. Sin embargo el parámetro λ no permite diferenciar entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra ya que su respuesta es muy similar.

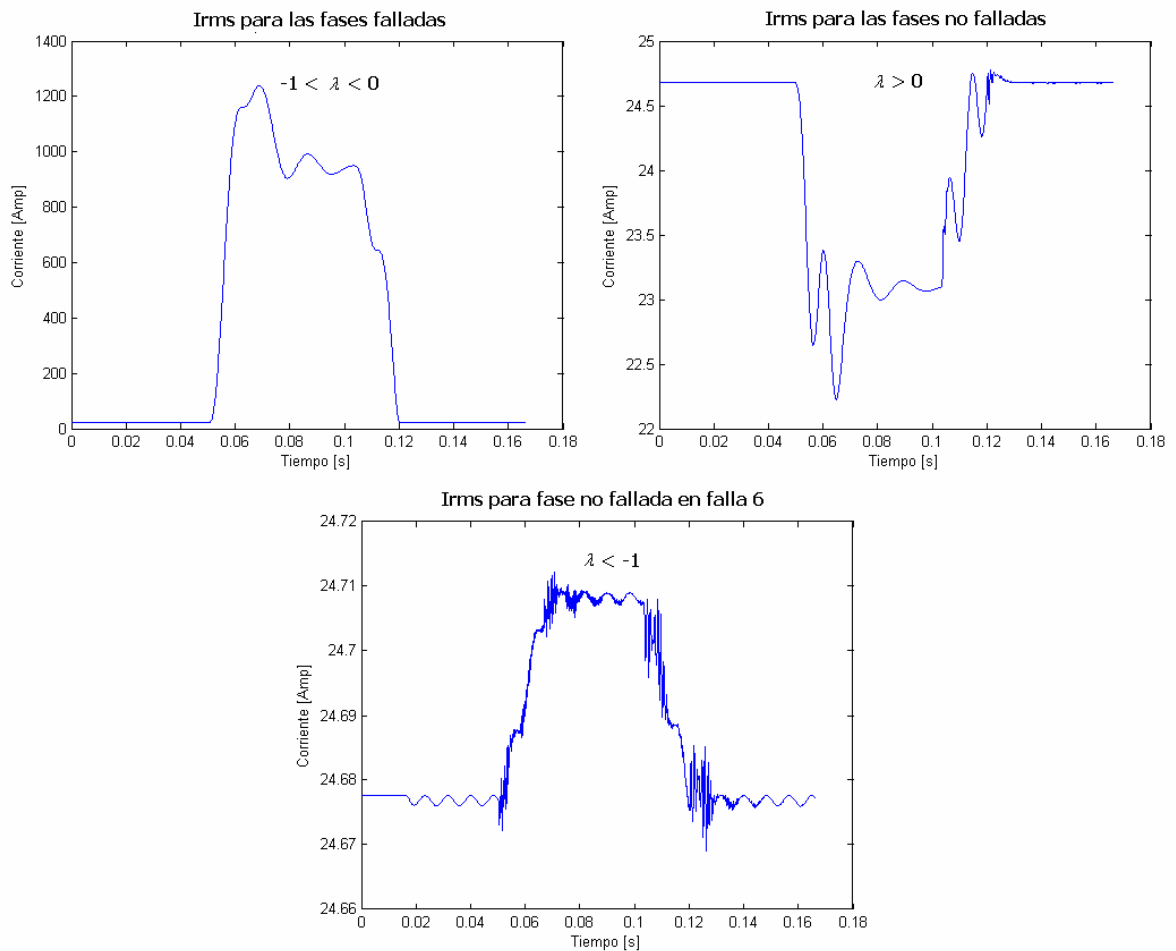


Figura 3.2 Rangos de λ para los diferentes tipos de Irms.

A continuación se muestra un ejemplo para determinar el tipo de falla.

Se usó la señal Irms de una falla bifásica entre las fases A y C, en el nodo 5 con una resistencia de falla de 5Ω .

Al aplicar la transformada Box-Cox a las señales Irms por fase se obtuvieron los siguientes valores del parámetro λ .

Fase A: $\lambda = -0,5058$	$-1 < \lambda < 0$	Fase Fallada
Fase B: $\lambda = -7,2395$	$\lambda < -1$	Fase no Fallada
Fase C: $\lambda = -0,5069$	$-1 < \lambda < 0$	Fase Fallada

De acuerdo con los valores de λ se trata de una falla entre las fases A y B, para saber si es a tierra o no se calcula el valor de λ para Vrms en la fase B.

Fase B: $\lambda = -2,0797$ $\lambda < 0$ No es a tierra

Finalmente se comprueba que se trata de una falla bifásica entre las fase A y C.

Esta metodología fue aplicada a todas las fallas simuladas, arrojando resultados exitosos.

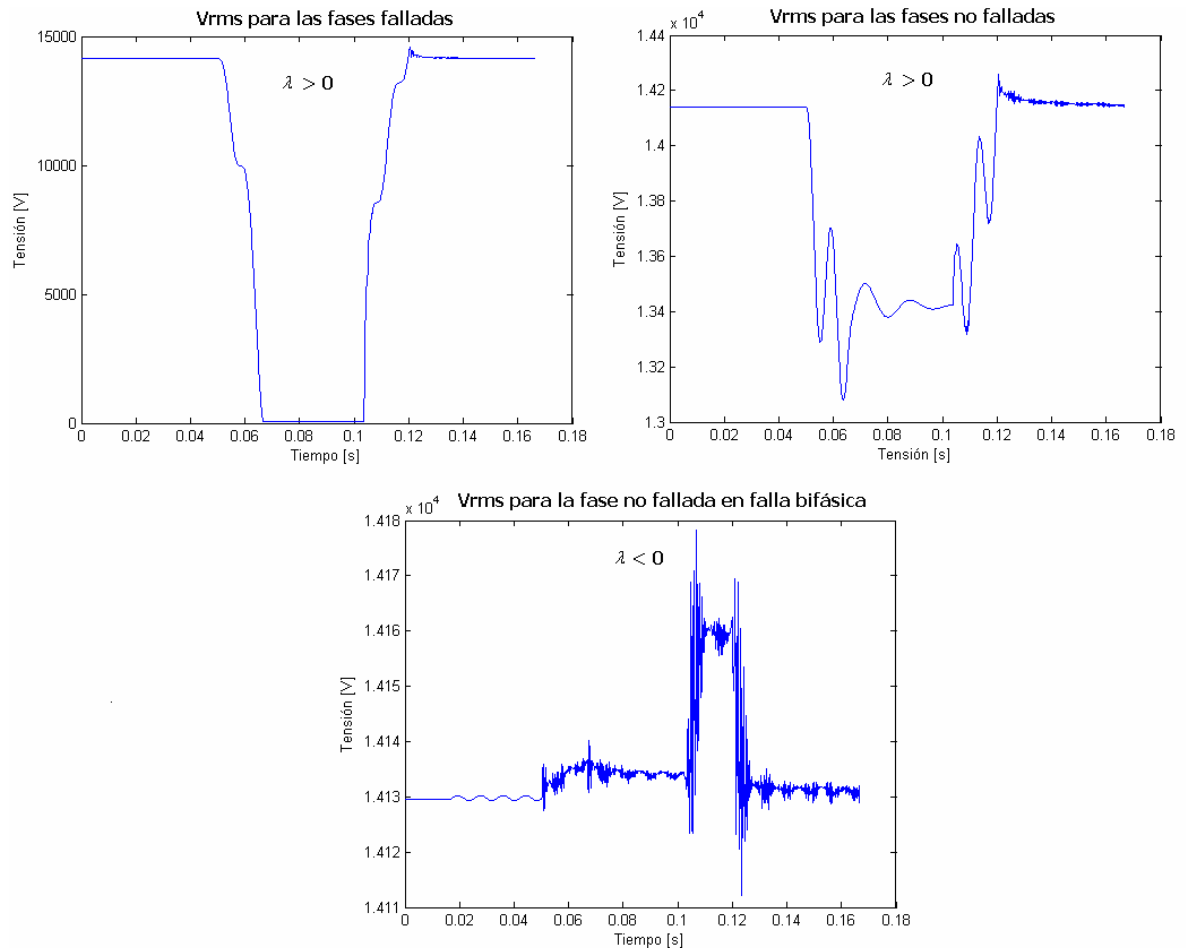


Figura 3.3 Rangos de λ para diferentes tipos de Vrms.

3.2.2 Estimación de la distancia y resistencia de falla

Una vez determinado el tipo de falla es posible analizar cada caso en particular para estudiar la relación del parámetro λ con la distancia y la resistencia de la falla, a fin de dar una posible localización de ésta.

Para hacer este estudio se ha implementado un programa en Matlab que calcula el parámetro λ de las señales Irms y Vrms para todos los tipos de fallas, en

diferentes nodos dentro del circuito de prueba con diferentes resistencias de falla, y los grafica en función de la distancia y la resistencia.

Inicialmente se usaron las resistencias R1, R2, R3, R4, R7, R8, R9 y R10, que corresponden a los valores de 0,05; 5; 10; 15; 20; 25; 30 y 35 Ω respectivamente, para todos los nodos del circuito de prueba. Los resultados se muestran a continuación.

En la figura 3.4 se aprecia la relación entre el parámetro λ para la señal V_{rms} de la fase fallada en una falla tipo 1, y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia. Se puede observar que la relación no es lineal y cambia para los diferentes valores de resistencia lo cual dificulta su análisis.

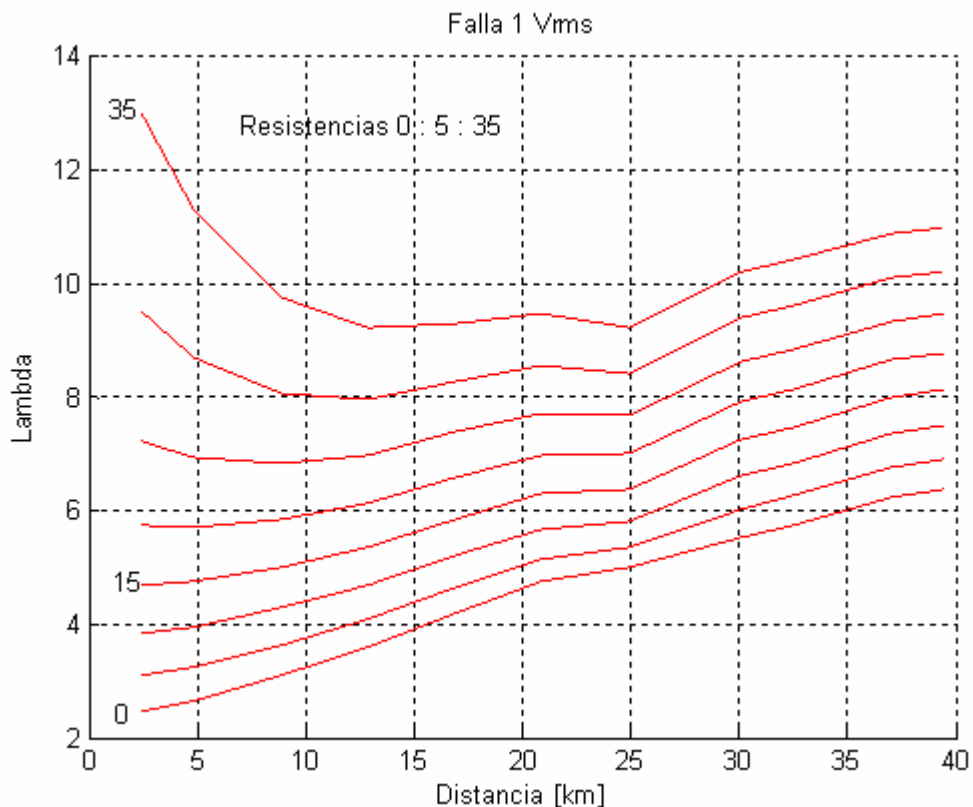


Figura 3.4 Relación entre λ , la distancia y la resistencia para V_{rms} .

Este comportamiento se presenta para todos los tipos de fallas, por esta razón no es conveniente usar las señales V_{rms} para relacionar el parámetro λ con la distancia y la resistencia de la falla.

En la figura 3.5 se aprecia la relación entre el valor absoluto del parámetro λ para la señal I_{rms} de la fase fallada y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia. Se puede observar que existe una relación directamente

proporcional y casi lineal entre λ y la distancia, y que esta relación es directamente proporcional con la resistencia de falla, en otras palabras se podría decir que la curva λ vs Distancia se desplaza hacia arriba conforme se aumenta la resistencia de falla.

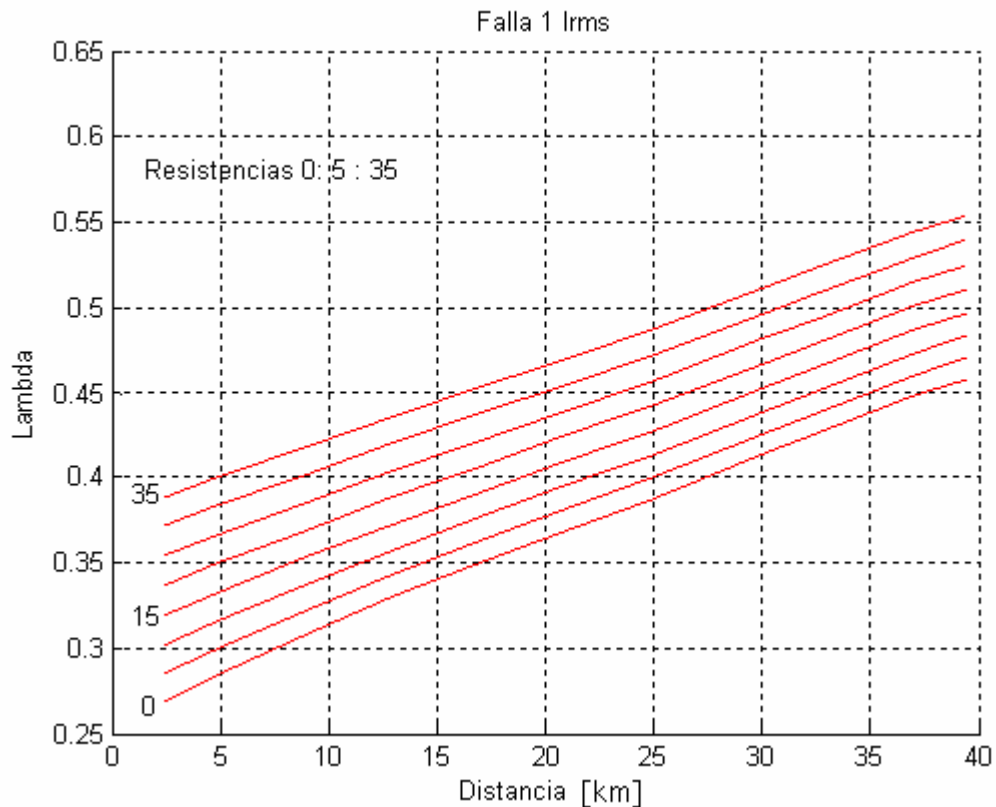


Figura 3.5 Relación entre λ , la distancia y la resistencia para Irms.

Para entender este comportamiento es necesario remitirse a la sección 1.2.3, donde se estudió el comportamiento de la constante de tiempo con respecto a la distancia y resistencia de falla, en esa oportunidad se mostró como la constante de tiempo disminuye con el aumento de la distancia y la resistencia de falla, lo que indica que el valor absoluto del parámetro lambda para la Irms fallada es inversamente proporcional a la constante de tiempo.

Esta misma relación se presenta para todos los tipos de fallas como se muestra en la figura 3.6. Debido a este comportamiento es posible usar el parámetro λ de la señal Irms en la fase fallada para relacionar la distancia y la resistencia de falla. A continuación se muestra un análisis más detallado para los diferentes tipos de fallas.

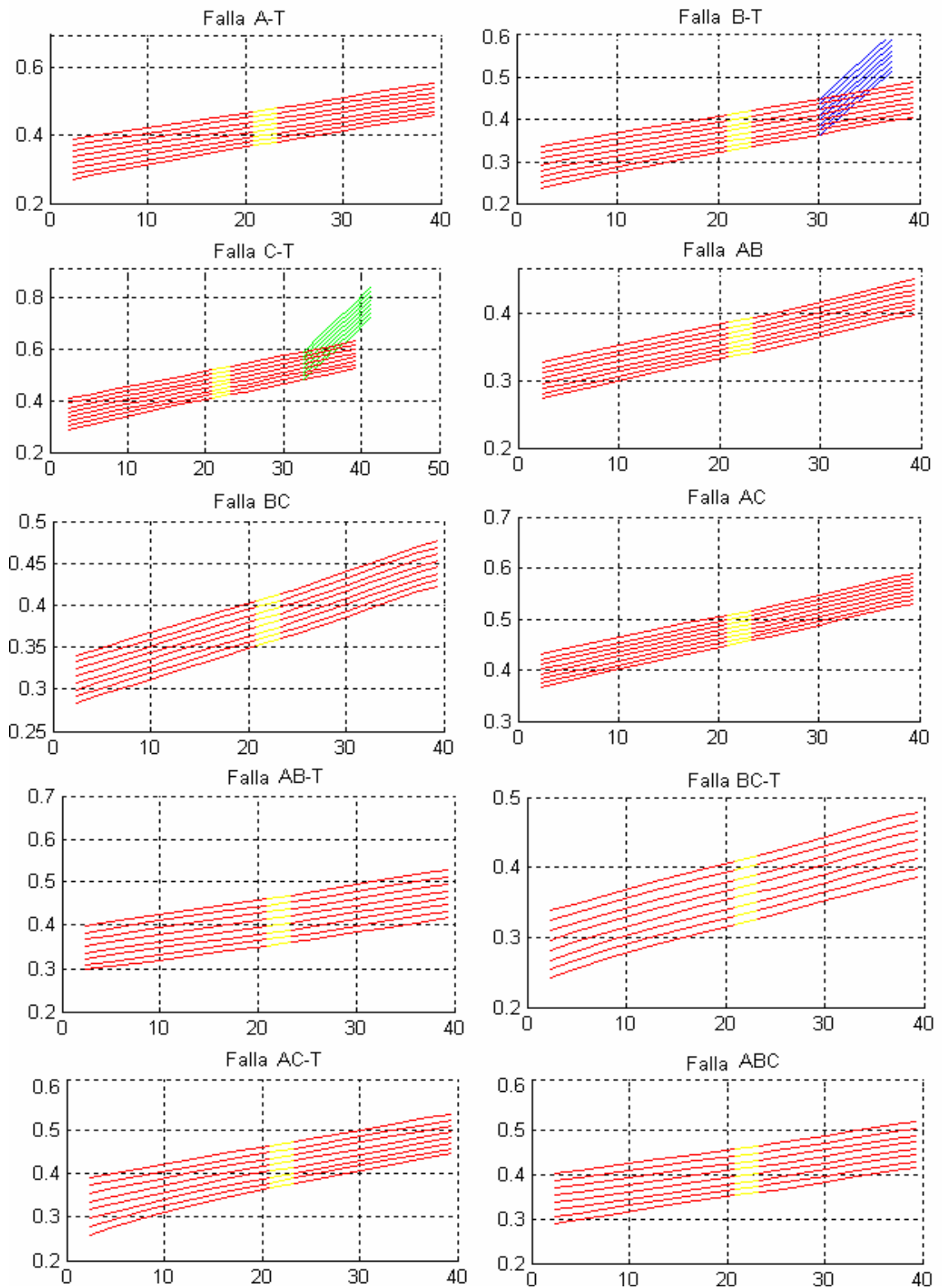


Figura 3.6 Relación entre λ , la distancia y la resistencia con I_{rms} para todos tipos de falla.

En la figura 3.6 las curvas rojas, azules, verdes y amarillas corresponden a las fallas en las zonas 1, 2, 3 y 4 el circuito, respectivamente. Se puede observar que las curvas de las zonas 2 y 3 se intersectan en cierta parte con la zona 1. Mientras que las curvas de la zona 4 se intersectan totalmente con las curvas de la zona 1.

Esto significa que es necesario un criterio distinto al valor de lambda para Irms de falla si se quiere diferenciar entre una zona y otra, pero por ahora se continuará estudiando la relación entre la distancia, resistencia de falla, y el descriptor lambda. Para esto se considera una falla ocurrida en la zona 1.

Cuando ocurre una falla en esta zona, se determina su tipo usando el método mostrado en la sección 3.2.1, esto permite remitirse a uno de los 10 grupos de curvas mostradas en la figura 3.6 para buscar los puntos en los que el parámetro λ de la señal Irms se interseca con las curvas que relacionan a λ con la distancia y la resistencia.

Este procedimiento se explica mejor en el siguiente ejemplo:

Ocurre una falla cualquiera en la zona 1, se desconoce la distancia a la cual ocurrió y la resistencia de la falla. Primero se calcula el valor de λ para las señales Irms por fase para determinar el tipo de falla.

Fase A: $\lambda = -0,4$	$-1 < \lambda < 0$	Fase Fallada
Fase B: $\lambda = -25,2491$	$\lambda < -1$	Fase no Fallada
Fase C: $\lambda = -20,5059$	$\lambda < -1$	Fase no Fallada

Según los valores de λ se trata de una falla monofásica en la fase A, es decir un tipo de falla 1, con este resultado se toma el valor absoluto de λ en la fase A y se buscan los puntos en los que se intersecta con las curvas para el tipo de falla 1. Este procedimiento se muestra en la figura 3.7. Con estos puntos se construye la curva de Distancia vs. Resistencia para esa falla en particular, como se muestra en la figura 3.8.

Finalmente se tiene una curva con todas las posibles soluciones para la localización de esta falla, en esta curva se encuentran todas las posibles combinaciones de resistencias y distancias de falla que producirían la misma respuesta transitoria.

En este momento se tendría un problema con dos incógnitas y una sola relación o curva, para tener la solución exacta debe buscarse un parámetro adicional que proporcione otra relación entre la distancia y la resistencia de falla.

Esta relación o curva adicional se obtendrá con los otros descriptores mostrados en este capítulo. Por ahora se continúa con el análisis de la utilidad del descriptor lambda para diferenciar en que zona del circuito ocurre la falla.

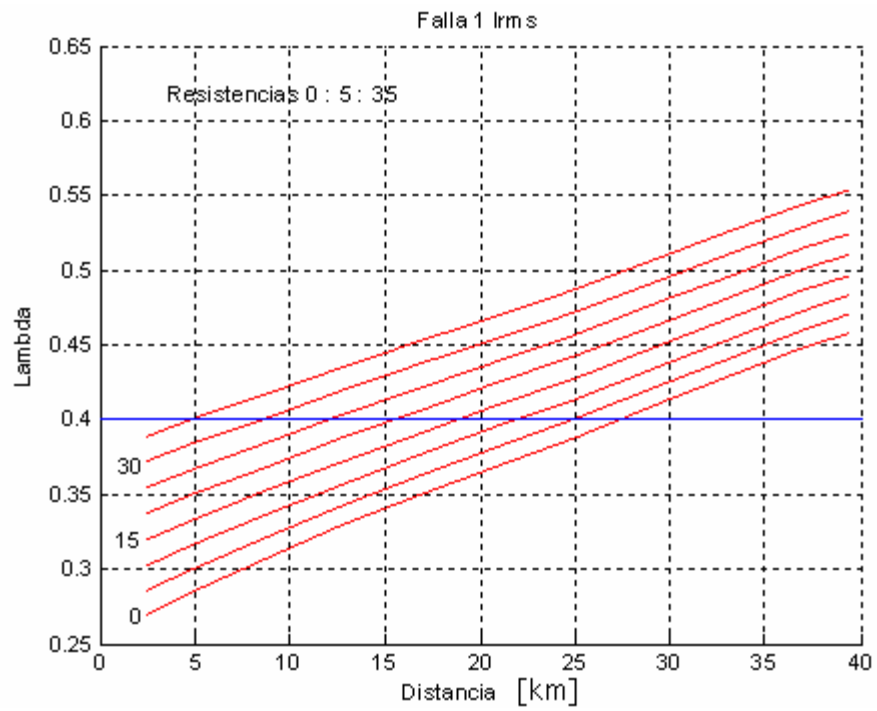


Figura 3.7 Intersección de λ con las curvas de distancia para cada resistencia.

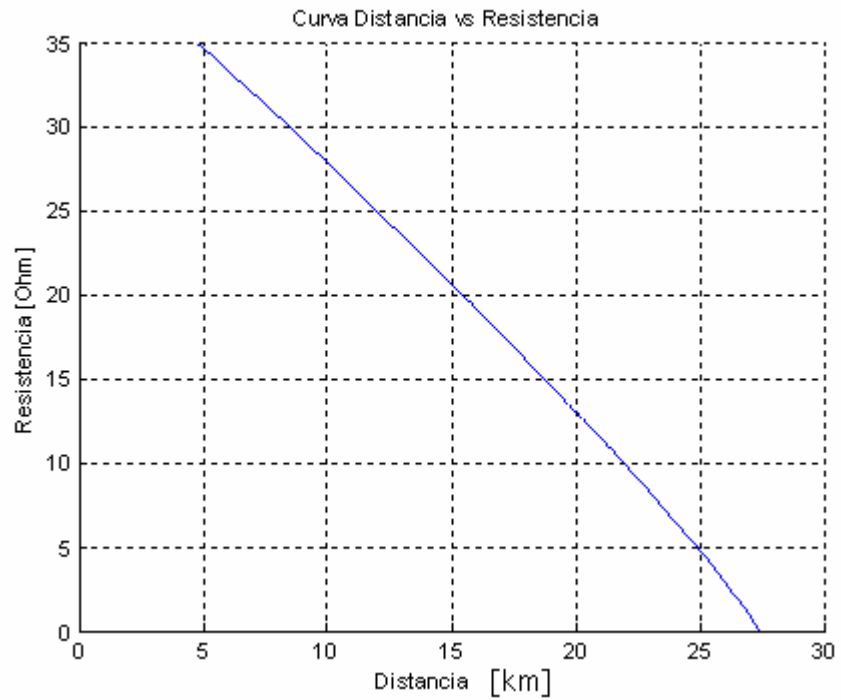


Figura 3.8 Relación Distancia vs Resistencia para la falla del ejemplo usando el descriptor lambda.

3.2.3 Estimación de la zona

Como se mencionó anteriormente las curvas del parámetro lambda de Irms, en función de la resistencia y la distancia de falla para las diferentes zonas, se intersectan en ciertos puntos, lo que dificulta el uso de este parámetro para diferenciar la zona. Sin embargo en la figura 3.6 se observa un comportamiento interesante para las zonas 2 y 3, en lo referente a un aumento en la pendiente de las curvas con relación a las de la zona 1. Ver figura 3.9.

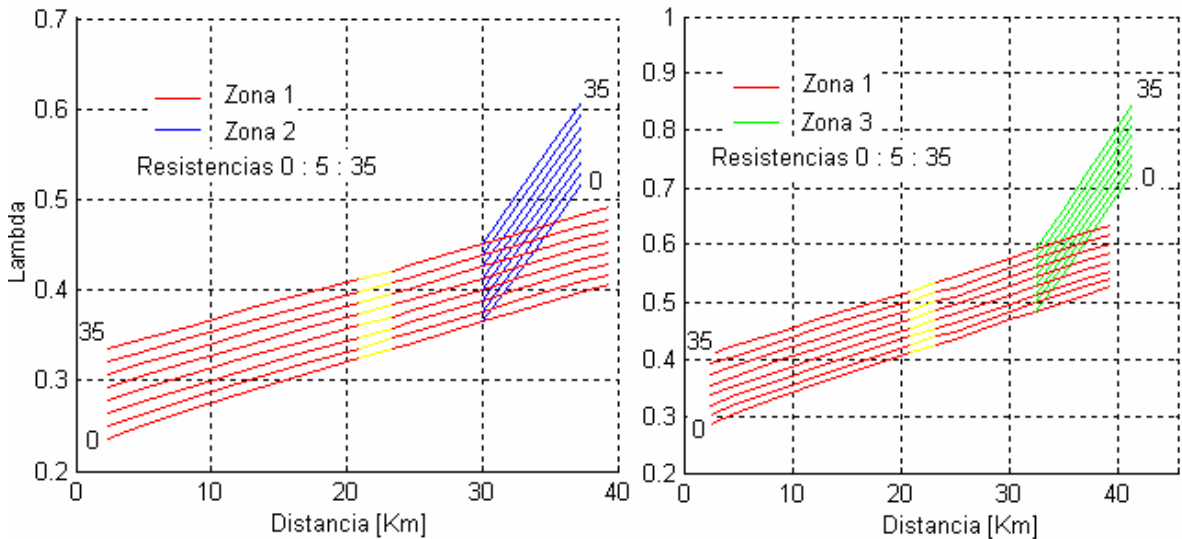


Figura 3.9 Parámetro lambda para las diferentes zonas.

Esto quiere decir que en estas zonas el valor absoluto de lambda crece más rápidamente en función de la distancia, lo que significa que la constante de tiempo disminuye más rápido. Este comportamiento se debe a que en estas zonas del circuito las líneas son monofásicas, y su inductancia equivalente disminuye con relación a la de las líneas trifásicas, debido a la desaparición de los efectos mutuos entre conductores [2].

Cuando ocurre una falla cuya localización está en la parte de las curvas que se intersectan se tendrán dos respuestas, similares a la mostrada en la figura 3.8.

Para seleccionar la respuesta correcta es necesario el uso de más de un descriptor, por esta razón este problema se solucionará en el próximo capítulo, luego de mostrar todos los descriptores, encontrados en este trabajo.

3.3 DESCRIPTOR TENDENCIA (MXT)

Como se mencionó anteriormente, la tendencia de la serie de tiempo asociada a un transitorio se relaciona con su magnitud. Sin embargo, en la sección 2.2.1 se

demostró que es más conveniente usar la tendencia de la TBC de una señal, que la tendencia de la señal original, ya que presenta un comportamiento más lineal en relación con la distancia y resistencia de falla. Esta comparación se puede apreciar en la figura 2.14.

Para calcular la tendencia de una señal de falla se toma el máximo o el mínimo valor de la TBC de las señales Irms o Vrms, respectivamente. Aunque el descriptor que se propone en este trabajo es la tendencia de la señal Irms, es decir, el máximo de la TBC de Irms (MXT), el cual se prefiere frente a la tendencia de Vrms por tener un mejor comportamiento en su relación con la distancia y la resistencia de falla, como se explica mas adelante.

3.3.1 Estimación del tipo de falla

Para determinar el tipo de falla se calculó la tendencia de las señales Irms y Vrms por fase para todos los tipos de fallas, obteniendo resultados similares para cada tipo, independientemente de la distancia y resistencia de la falla. Los resultados se muestran en la tabla 3.3.

Falla	Tipo	Tendencia (MXT)					
		Irms			Vrms		
		A	B	C	A	B	C
1	1ΦT	2,226	0,0428	0,0185	-0,296	-0,0316	-0,026
2	1ΦT	0,0101	1,52	0,0427	-0,0059	-0,0884	-0,0212
3	1ΦT	0,033	0,0104	1,242	-0,0167	-0,0064	-0,0647
4	2Φ	2,303	2,263	0,009	-0,2305	-0,3399	0,01
5	2Φ	0,003	2,179	2,138	0,05	-0,226	-0,283
6	2Φ	2,006	0,0018	1,982	-0,306	0,015	-0,204
7	2ΦT	2,295	2,346	0,0457	-0,333	-0,417	-0,048
8	2ΦT	0,0423	2,277	2,153	-0,0526	-0,333	-0,358
9	2ΦT	2,267	0,0533	2,047	-0,391	-0,0546	-0,305
10	3Φ	2,324	2,358	2,146	-0,453	-0,455	-0,406
11	3ΦT	2,324	2,358	2,146	-0,453	-0,455	-0,406

Tabla 3.3 Tendencia para los diferentes tipos de falla.

Analizando la tendencia de Irms se observa que para las fases falladas el valor esta por encima de 1, mientras que en las fases no falladas es un valor menor que 1 y cercano a 0. Esto se debe a que en la TBC de Irms en pu, el valor en estado estable es cero, por esto la tendencia de una fase no fallada es cercana a cero, pues no hay un incremento considerable respecto al valor en estado estable, mientras que para una fase fallada la tendencia pasa de cero a un valor por encima de uno. Este comportamiento se muestra en la figura 3.10.

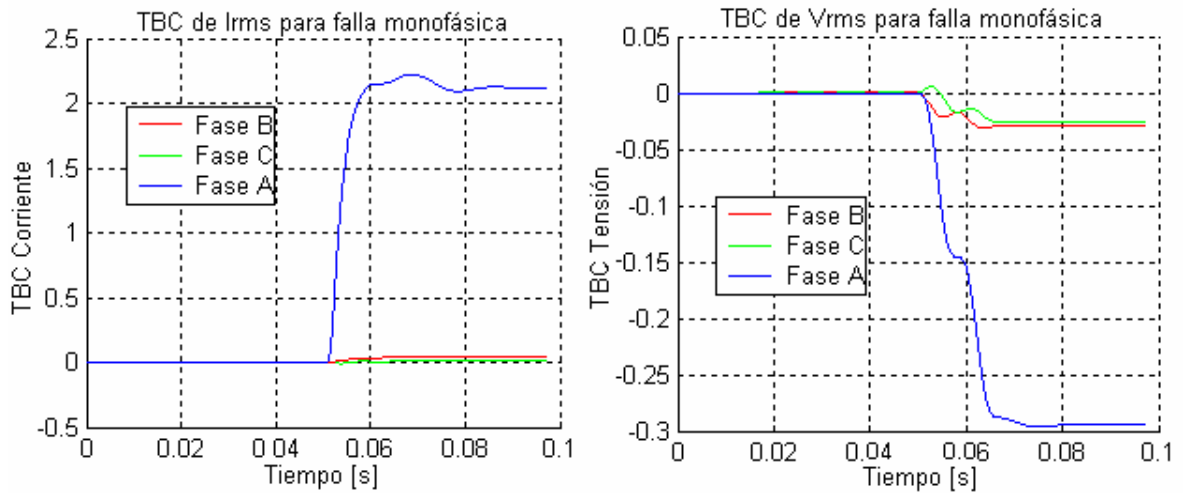


Figura 3.10 TBC para Irms y Vrms en pu.

De acuerdo con lo anterior, es posible determinar la fase o las fases donde ocurrió la falla usando la tendencia de señales Irms, aunque no es posible diferenciar entre una falla bifásica y una a falla bifásica a tierra, ni entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra.

Analizando la tendencia de las señales de Vrms no se observan patrones que diferencien entre una fase fallada y una no fallada ya que los valores son negativos para ambos casos, a excepción de la fase no fallada en las fallas bifásicas donde el valor de la tendencia es positivo. Esto se debe a que en una falla bifásica hay un leve incremento en la tensión de la fase no fallada, a diferencia de una falla bifásica a tierra donde la tensión de la fase no fallada también disminuye. Este comportamiento se aprecia en la figura 3.11.

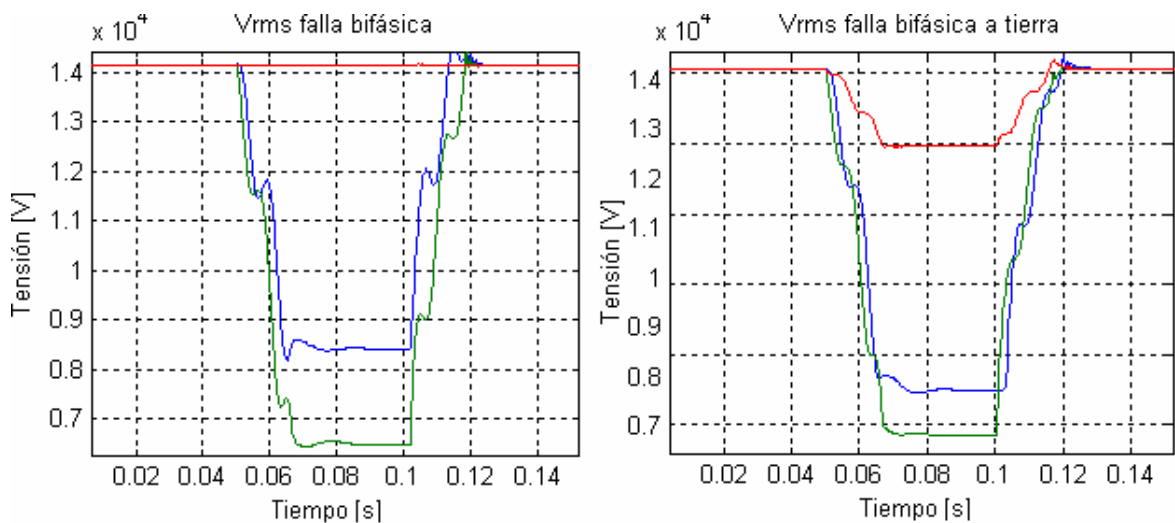


Figura 3.11 Vrms por fase en fallas 2Φ y 2ΦT.

De acuerdo con lo anterior se puede usar la tendencia de la señal V_{rms} para diferenciar entre una falla bifásica y una falla bifásica a tierra.

Finalmente es posible conocer el tipo de falla calculando la tendencia para las señales I_{rms} de las tres fases y así determinar las fases falladas, en caso de haber dos fases falladas se calcula la tendencia de la señal V_{rms} en la fase no fallada para saber si se trata de una falla bifásica o una falla bifásica a tierra. Sin embargo la tendencia no permite diferenciar entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra ya que su respuesta es muy similar.

3.3.2 Estimación de la distancia y resistencia de falla

Una vez determinado el tipo de falla es posible analizar cada caso en particular para estudiar la relación de la tendencia con la distancia y la resistencia de la falla, a fin de dar una posible localización de esta.

Para hacer este estudio se ha implementado un programa en Matlab que calcula la TBC y toma la tendencia de las señales I_{rms} y V_{rms} para todos los tipos de fallas, en diferentes nodos dentro del circuito de prueba y con diferentes resistencias de falla, y los grafica en función de la distancia y la resistencia.

Se usaron las resistencias $R_1, R_2, R_3, R_4, R_7, R_8, R_9$ y R_{10} , que corresponden a los valores de 0.05, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 Ω respectivamente, para todos los nodos del circuito de prueba. Los resultados se muestran a continuación.

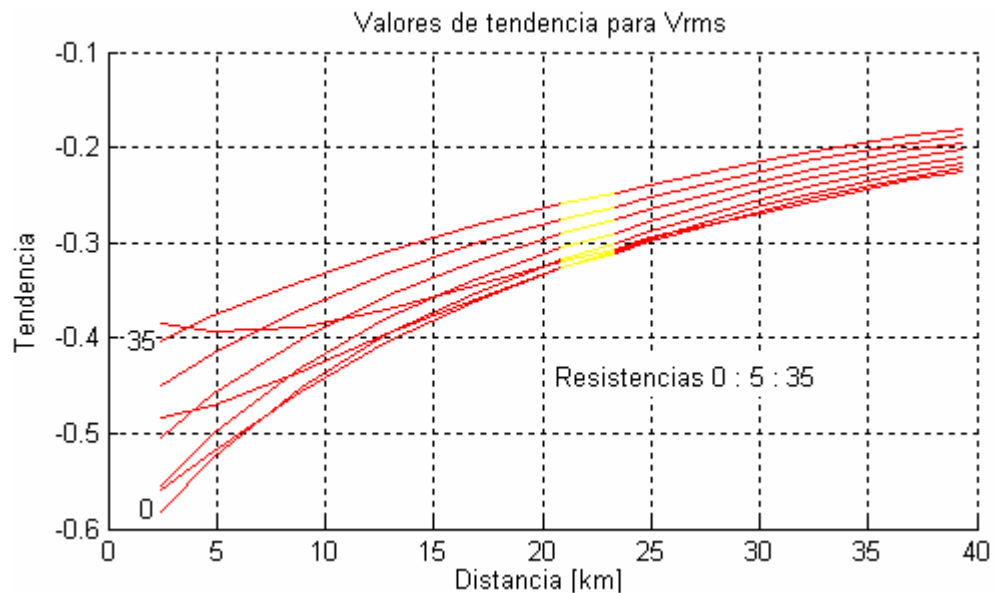


Figura 3.12 Relación entre la tendencia de V_{rms} , la distancia y la resistencia.

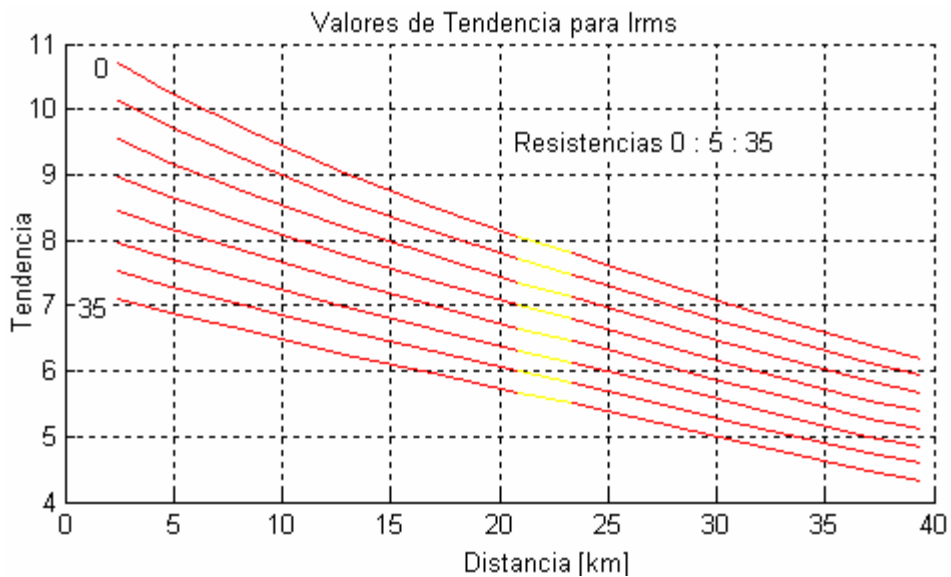


Figura 3.13 Relación entre la tendencia de Irms, la distancia y la resistencia.

En la figura 3.12 se aprecia la relación entre la tendencia de la señal Vrms de la fase fallada en una falla tipo 1, y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia. Se puede observar que la relación no es lineal y cambia para los diferentes valores de resistencia lo cual dificulta su análisis. Este comportamiento se presenta para todos los tipos de fallas, por esta razón no es conveniente usar las señales Vrms para relacionar su tendencia con la distancia y la resistencia de la falla.

En la figura 3.13 se aprecia la relación entre la tendencia de la señal Irms de la fase fallada y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia. Se puede observar que existe una relación inversamente proporcional y casi lineal entre la tendencia y la distancia, y resistencia de falla, en otras palabras se podría decir que la curva tendencia vs distancia se desplaza hacia abajo conforme se aumenta la resistencia de falla.

Este comportamiento es semejante al mostrado en la figura 1.10 donde se analizó la relación entre el pico del transitorio, la distancia y la resistencia de falla, aunque como se mencionó anteriormente la tendencia presenta un comportamiento más lineal, pues la TBC elimina los picos lo que permite tener una mejor idea de la magnitud del transitorio.

La relación mostrada en la figura 3.13 se presenta para todos los tipos de fallas. Debido a este comportamiento es posible usar la tendencia de la señal Irms en la fase fallada para relacionar la distancia y la resistencia de falla. Por esta razón se propone como descriptor, y se le da el nombre MXT, que quiere decir máximo de la Transformada Box-Cox. En la figura 3.14 se muestra el valor de MXT en función de la distancia y la resistencia para todos los tipos de fallas.

Figura 2. Comparación entre los picos de Irms y TBC de Irms

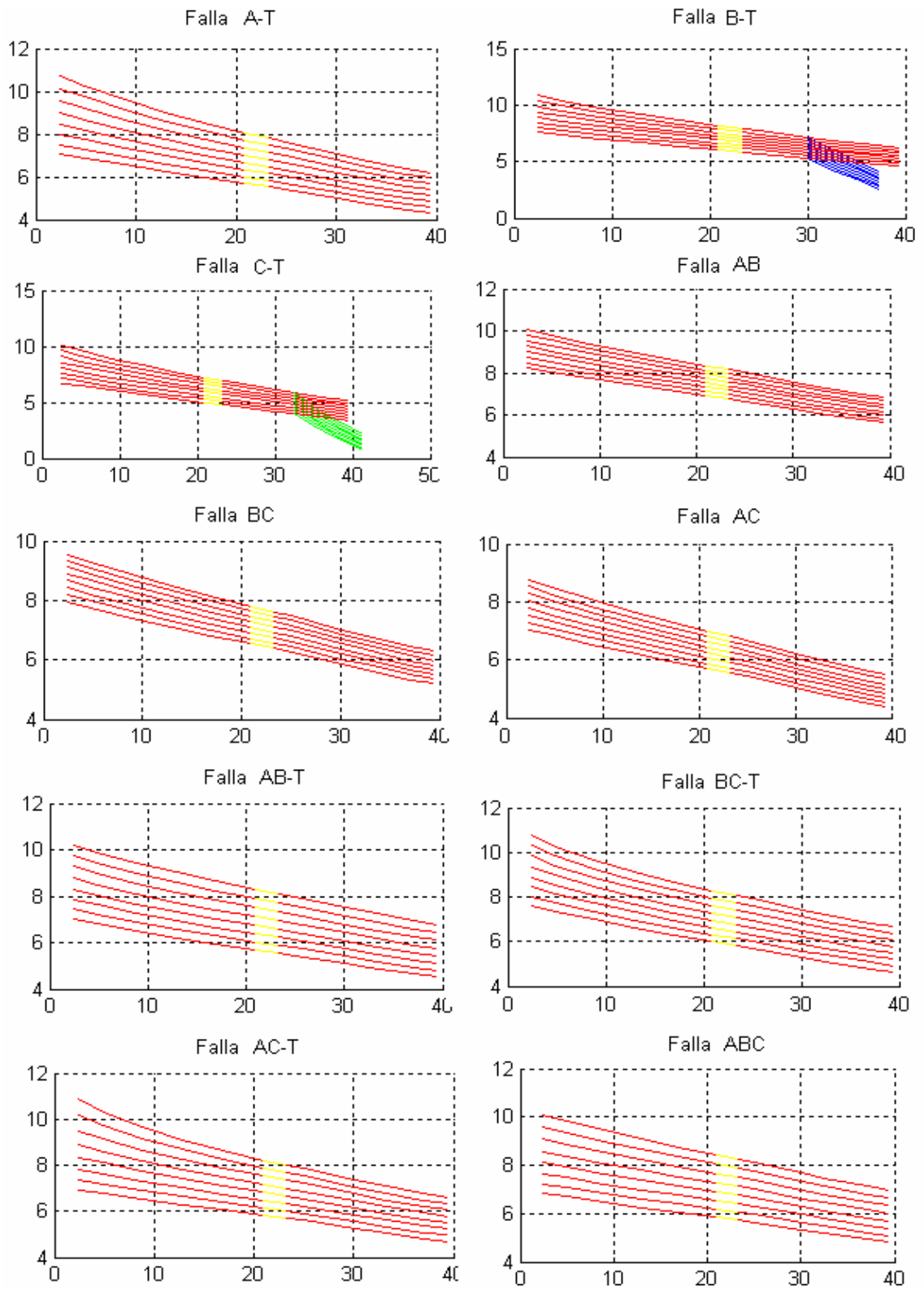


Figura 3.14 MXT para las diferentes tipos de fallas

En la figura 3.14 las curvas rojas, azules, verdes y amarillas corresponden a las fallas en las zonas 1, 2, 3 y 4 el circuito, respectivamente. Se puede observar que las curvas de las zonas 2 y 3 se intersectan en cierta parte con la zona 1. Mientras que las curvas de la zona 4 se intersectan totalmente con las curvas de la zona 1.

Esto significa que es necesario un criterio adicional para diferenciar entre una zona y otra, pero por ahora se continuará estudiando la relación entre la distancia y resistencia de falla, y el descriptor MXT.

Siguiendo el mismo procedimiento usado para el descriptor lambda, se obtiene la curva Distancia vs Resistencia para una falla en particular, usando MXT. Esta curva se muestra en la figura 3.15.

En esta curva se encuentran todas las posibles combinaciones de resistencias y distancias de falla que producirían la misma respuesta transitoria. Al igual que con el descriptor lambda, se tendría un problema de infinitas soluciones por lo que en el próximo capítulo se integrarán diferentes curvas para encontrar una única solución.

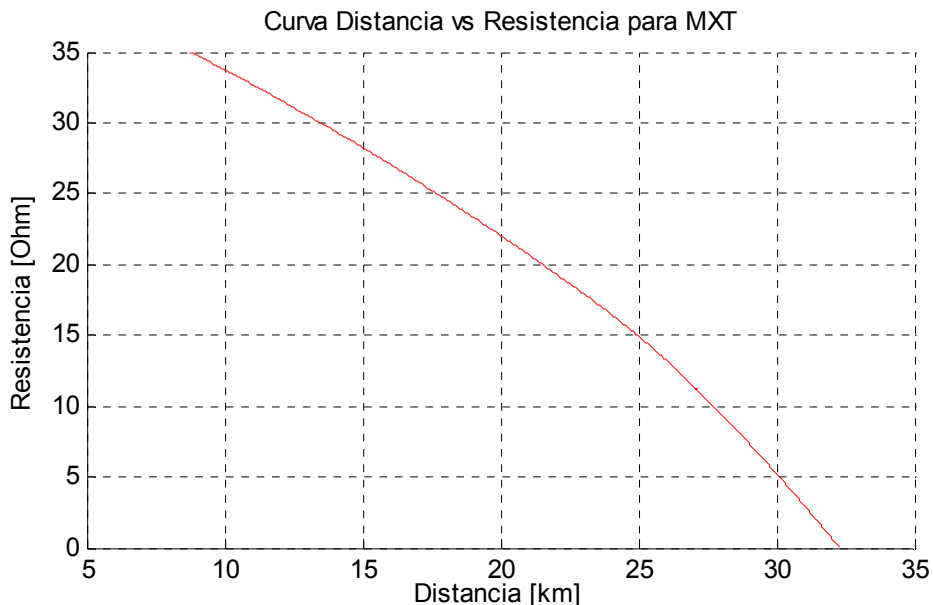


Figura 3.15 Relación entre la distancia y la resistencia, con MXT.

3.3.3 Estimación de la zona

Como se mencionó anteriormente las curvas de MXT para I_{rms} , en función de la resistencia y la distancia de falla para las diferentes zonas, se intersectan en ciertos puntos, lo que dificulta el uso de este descriptor para diferenciar la zona. Sin embargo se observa un comportamiento interesante para las zonas 2 y 3, en

lo referente a un aumento en la pendiente de las curvas con relación a las de la zona 1. Ver figura 3.16.

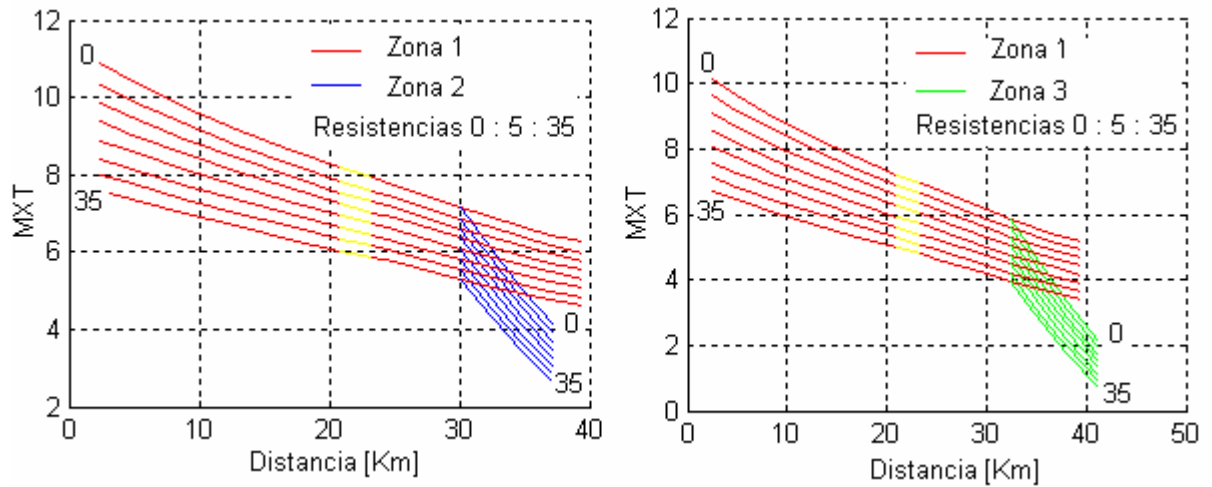


Figura 3.16 MXT para las diferentes zonas.

Esto quiere decir que en estas zonas el valor de MXT decrece más rápidamente en función de la distancia, lo que significa que la magnitud del transitorio disminuye más rápido conforme aumenta la distancia. Este comportamiento se debe a que en estas zonas del circuito las líneas son monofásicas, y el calibre de los conductores disminuye con relación a los de la línea principal del circuito.

Cuando ocurre una falla cuya localización está en la parte de las curvas que se intersectan se tendrán dos respuestas, similares a la mostrada en la figura 3.15.

Para seleccionar la respuesta correcta es necesario el uso de más de un descriptor, por esta razón este problema se solucionará en el próximo capítulo, luego de mostrar todos los descriptores, encontrados en este trabajo.

3.4 DESCRIPTOR SSE

SSE significa Sumatoria de los Errores cuadráticos. En un modelo de regresión lineal simple $y = mx + b$, SSE está dada por la suma de los cuadrados de las diferencias de los valores observados de y al valor correspondiente de la curva que se está analizando. Así la suma de cuadrados correspondiente a las diferencias observadas es:

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (Mx_i + B))^2$$

SSE es una herramienta para las series de tiempo, usada dentro de la Transformada Box-Cox para minimizar el error de la transformada. En la figura 3.17 se la regresión lineal aplicada a la TBC de una señal monofásica.

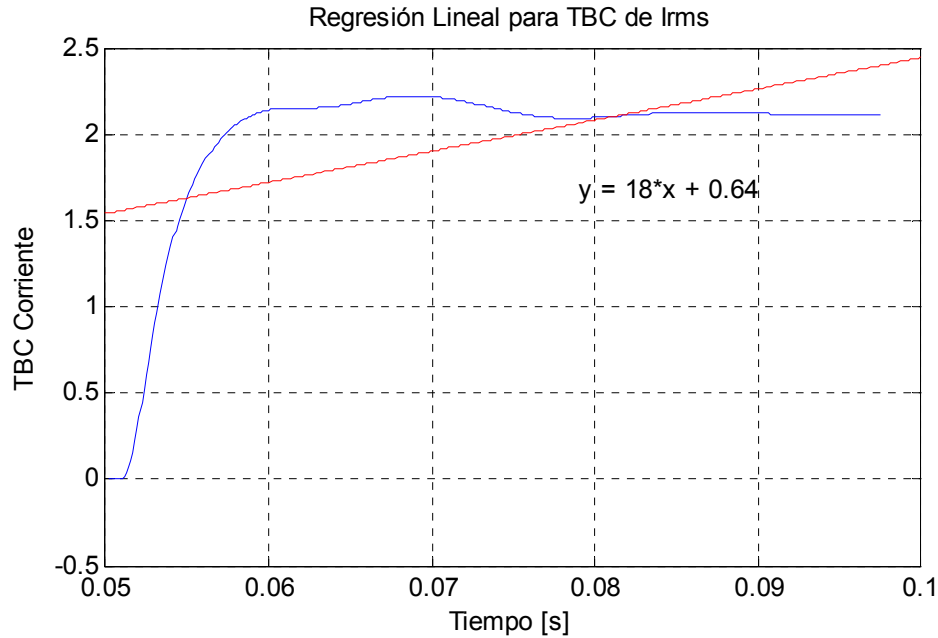


Figura 3.17 Regresión lineal para TBC de Irms.

SSE esta relacionado implícitamente con la tendencia y la variabilidad de la serie de tiempo, ya que la pendiente de la recta depende de la variabilidad, mientras que el corte el eje y, depende de la tendencia. Este concepto se puede ver más claramente en la figura 3.18. Donde se calcula la regresión lineal para Irms de falla con diferentes tendencias y variabilidades.

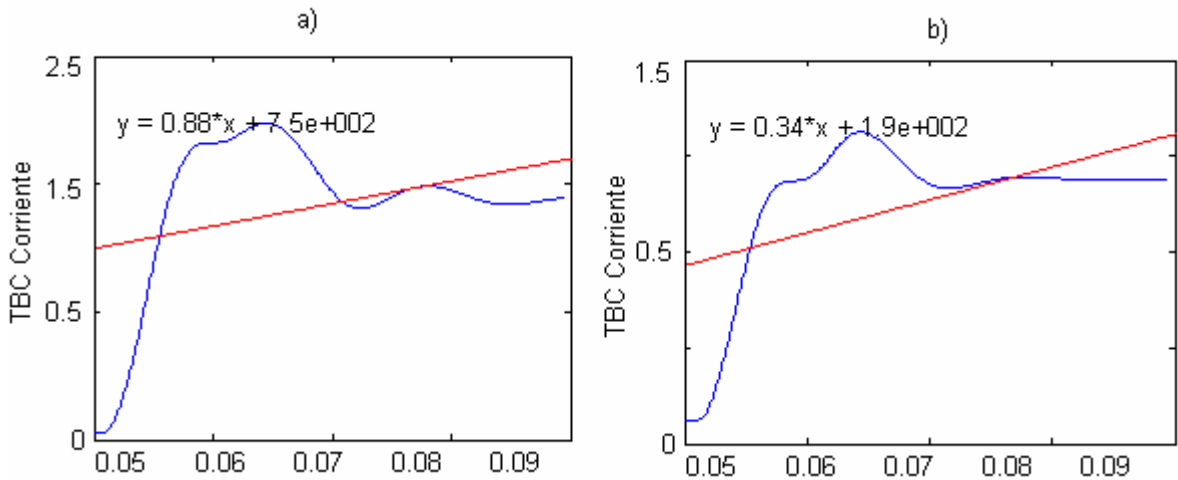


Figura 3.18 Relación entre la Regresión lineal y la tendencia y variabilidad.

En la figura 3.18 la señal a) tiene una mayor variabilidad que la señal b), por lo que la pendiente de su regresión lineal también es mayor. De la misma manera la tendencia de la señal a) es mayor que la de la señal b), por lo que el corte con el eje y de la regresión lineal también es mayor.

Por esta razón el SSE de la TBC puede usarse como un descriptor que se relaciona con la magnitud y la constante de tiempo de la señal de falla.

3.4.1 Estimación del tipo de falla

Para determinar el tipo de falla se calculó el SSE de las señales I_{rms} y V_{rms} por fase para todos los tipos de fallas, obteniendo resultados similares para cada tipo, independientemente de la distancia y resistencia de la falla. Los resultados se muestran en la tabla 3.4.

Falla	Tipo	SSE					
		I _{rms}			V _{rms}		
		A	B	C	A	B	C
1	1ΦT	23,2119	15,420	15,118	13,9990	15,7933	15,6820
2	1ΦT	15,7022	23,422	15,734	15,6657	13,9564	15,8102
3	1ΦT	15,7826	15,909	23,165	15,8124	15,6762	14,1546
4	2Φ	22,4940	22,4504	15,854	14,8814	14,8260	15,8924
5	2Φ	15,8920	22,3160	22,614	15,8926	14,8404	14,9506
6	2Φ	22,4246	15,9750	22,669	14,8960	15,8926	14,9663
7	2ΦT	23,0325	22,9792	15,061	13,9998	13,9612	15,4174
8	2ΦT	15,3838	22,9577	23,861	15,3906	13,9229	14,1546
9	2ΦT	23,1846	15,4601	22,774	14,0167	15,3887	14,1706
10	3Φ	22,7949	22,6444	22,6130	14,0189	13,9597	14,1725
11	3ΦT	22,7948	22,6444	22,6130	14,0177	13,9584	14,1715

Tabla 3.4 SSE para los diferentes tipos de falla.

Analizando los valores de SSE se para la I_{rms} para los diferentes tipos de fallas se encontraron varios tipos de comportamiento para las diferentes fallas, lo cual es muy importante para estimar el tipo de falla. Para estimar el tipo de falla se compara los valores de SSE obtenidos por fase y se mira la magnitud entre cada uno de ellos, al hacer esta comparación se puede notar que la fase fallada presenta una mayor amplitud que la fase no fallada, y las no falladas presentan un valor similar, por lo cual se puede definir el tipo de falla con facilidad.

Sin embargo este descriptor no permite diferenciar entre una falla bifásica y un a falla bifásica a tierra, ni entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra.

3.4.2 Estimación de la distancia y resistencia de falla

Después de haber estudiado el tipo de falla, se puede comenzar a analizar que tipo de relación existe entre el valor de SSE, la distancia y la resistencia de falla, a fin de poder dar una posible localización de la falla.

Para hacer un buen análisis, fue necesario realizar un programa en Matlab que fuera capaz de relacionar las 3 variables para cada tipo de falla y a diferentes distancias de la fuente.

Inicialmente se usaron las resistencias R1, R2, R3, R4, R7, R8, R9 y R10, que corresponden a los valores de 0.05, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 Ω respectivamente, para todos los nodos del circuito de prueba. Los resultados se muestran a continuación.

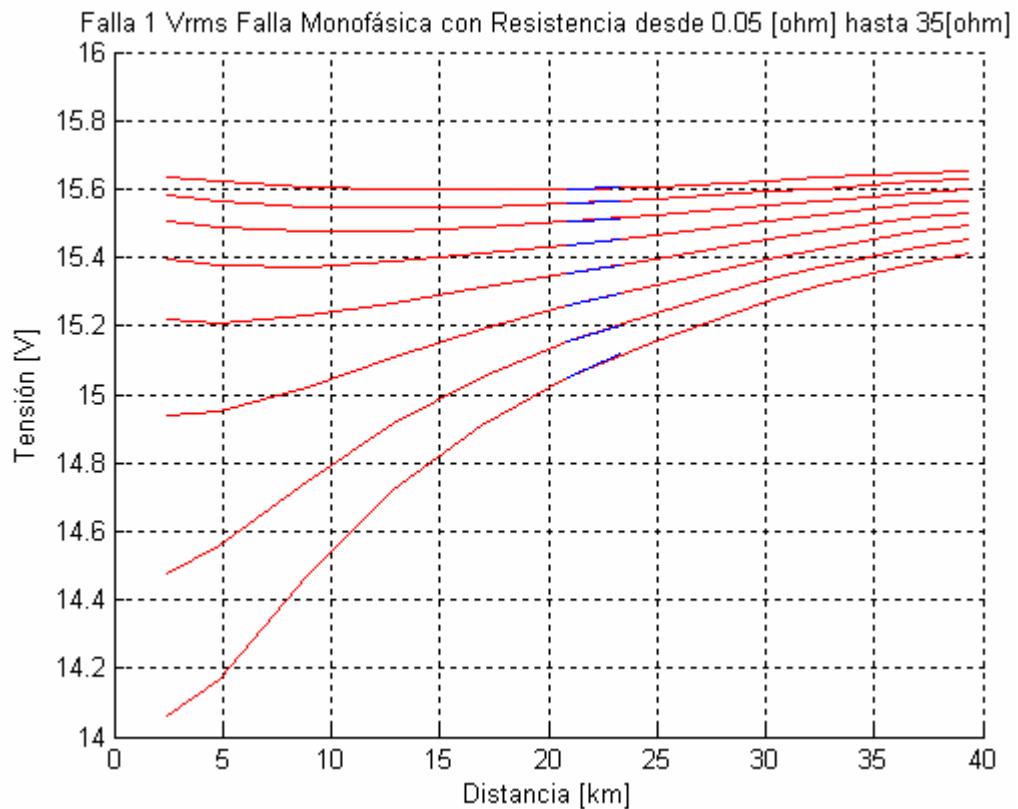


Figura 3.19 Relación entre SSE, la distancia y la resistencia para Vrms.

En la figura 3.18 se aprecia la relación entre SSE para la señal Vrms de la fase fallada en una falla tipo 1, y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia. Se puede observar que la relación no es lineal y cambia para los diferentes valores de resistencia lo cual dificulta su análisis. Este comportamiento

se presenta para todos los tipos de fallas, por esta razón no es conveniente usar las señales V_{rms} para relacionar SSE con la distancia y la resistencia de la falla.

En la figura 3.20 se puede observar la relación que existe entre el valor de SSE, la distancia y la resistencia de falla, la cual es casi lineal, siendo la distancia directamente proporcional al valor de SSE. En la figura también se puede observar como a medida que aumenta la resistencia aumenta el valor de SSE, debido a esto se presentan líneas paralelas entre las resistencias.

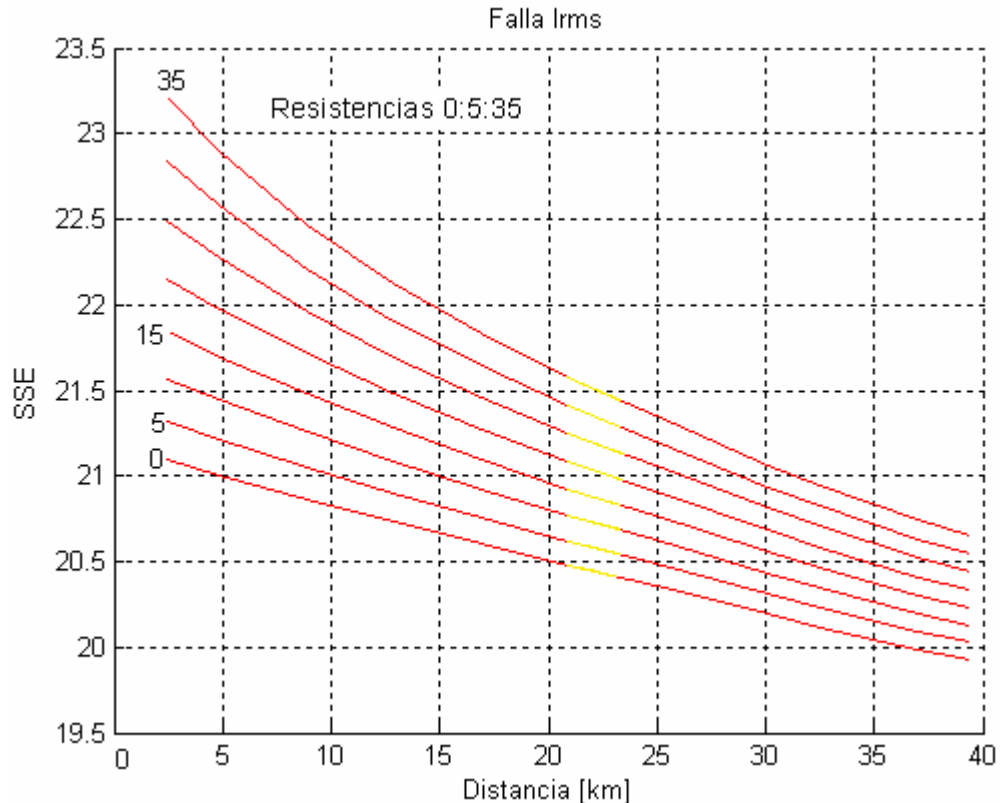


Figura 3.20 Relación entre SSE, la distancia y la resistencia para Irms.

Esto es de esperarse debido a que SSE trabaja con la tendencia la cual esta directamente relacionada con la magnitud de la señal, por eso al aumentar la distancia, disminuye el valor de SSE, al igual que la variabilidad de la señal, ya que los picos son mas pequeños, de esto se puede concluir que la tendencia es inversamente proporcional a la distancia.

En la figura 3.21 se muestra la relación entre SSE, la distancia y resistencia para los diferentes tipos de fallas. Las curvas rojas, azules, verdes y amarillas corresponden a las fallas en las zonas 1, 2, 3 y 4 el circuito, respectivamente. Se puede observar que las curvas de las zonas 2 y 3 se intersectan en cierta parte con la zona 1. Mientras que las curvas de la zona 4 se intersectan totalmente con las curvas de la zona 1.

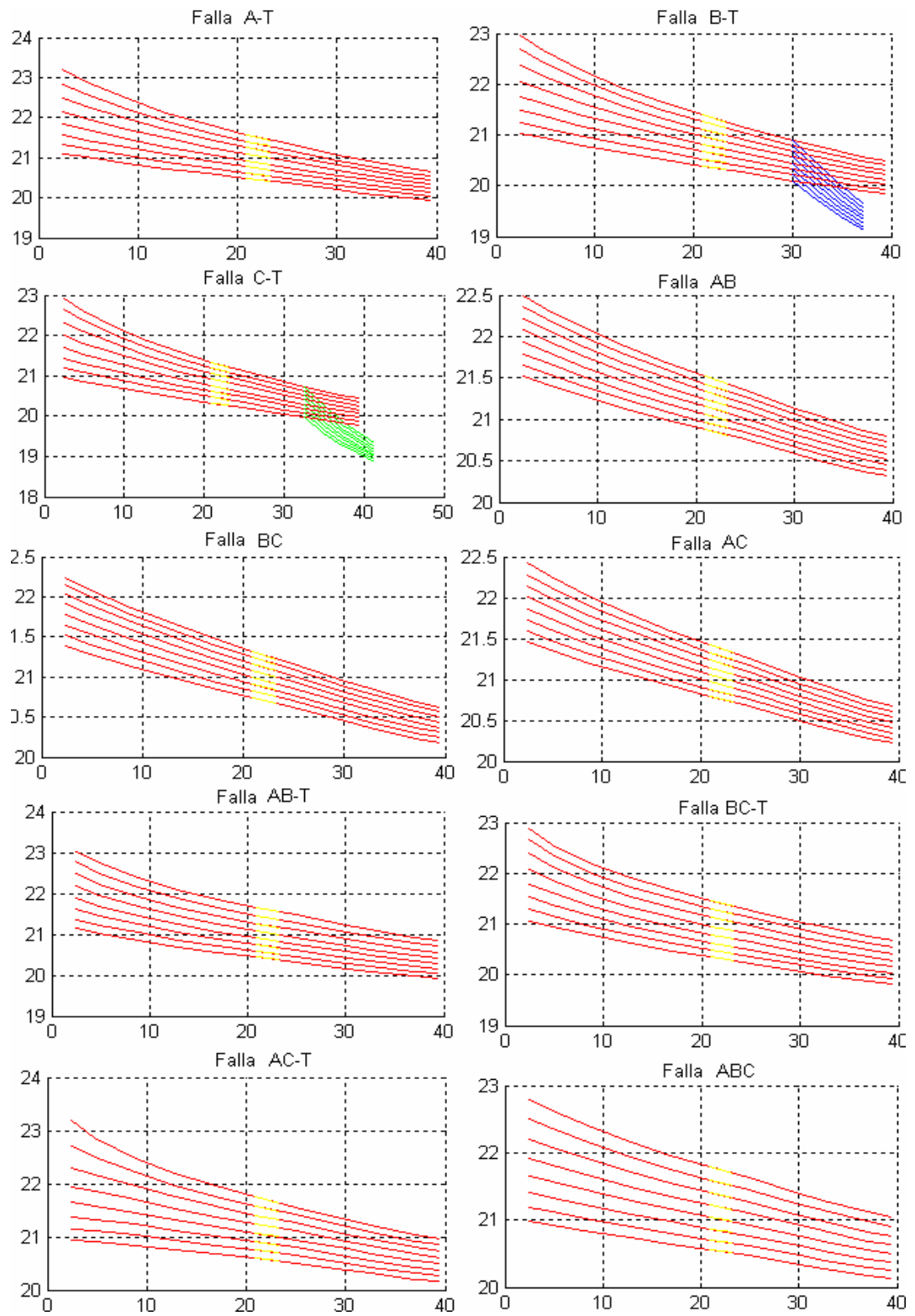


Figura 3.21. Relación entre SSE, la distancia y la resistencia con I_{rms} para todos tipos de falla.

Esto significa que es necesario un criterio adicional para diferenciar entre una zona y otra, pero por ahora se continuará estudiando la relación entre la distancia y resistencia de falla, y el descriptor SSE.

Siguiendo el mismo procedimiento usado para el descriptor lambda, se obtiene la curva Distancia vs Resistencia para una falla en particular, usando SSE. Esta curva se muestra en la figura 3.22.

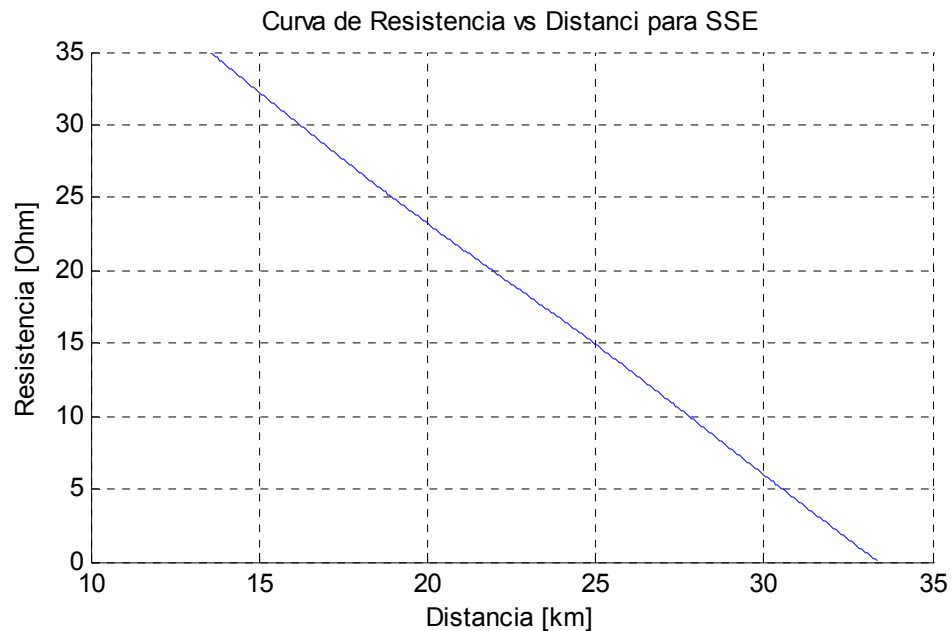


Figura 3.22 Relación entre la distancia y la resistencia, con SSE.

En esta curva se encuentran todas las posibles combinaciones de resistencias y distancias de falla que producirían la misma respuesta transitoria. Al igual que con los otros descriptores, se tendría un problema de infinitas soluciones por lo que en el próximo capítulo se integrarán diferentes curvas para encontrar una única solución.

3.4.3 Estimación de la zona

Como se mencionó anteriormente las curvas de SSE para I_{rms} , en función de la resistencia y la distancia de falla para las diferentes zonas, se intersectan en ciertos puntos, lo que dificulta el uso de este descriptor para diferenciar la zona. Sin embargo se observa un comportamiento interesante para las zonas 2 y 3, en lo referente a un aumento en la pendiente de las curvas con relación a las de la zona 1. Ver figura 3.23.

Esto quiere decir que en estas zonas el valor SSE decrece más rápidamente en función de la distancia, lo que significa que la energía del transitorio disminuye

más rápido conforme aumenta la distancia. La justificación de este fenómeno es la misma que para el descriptor MXT.

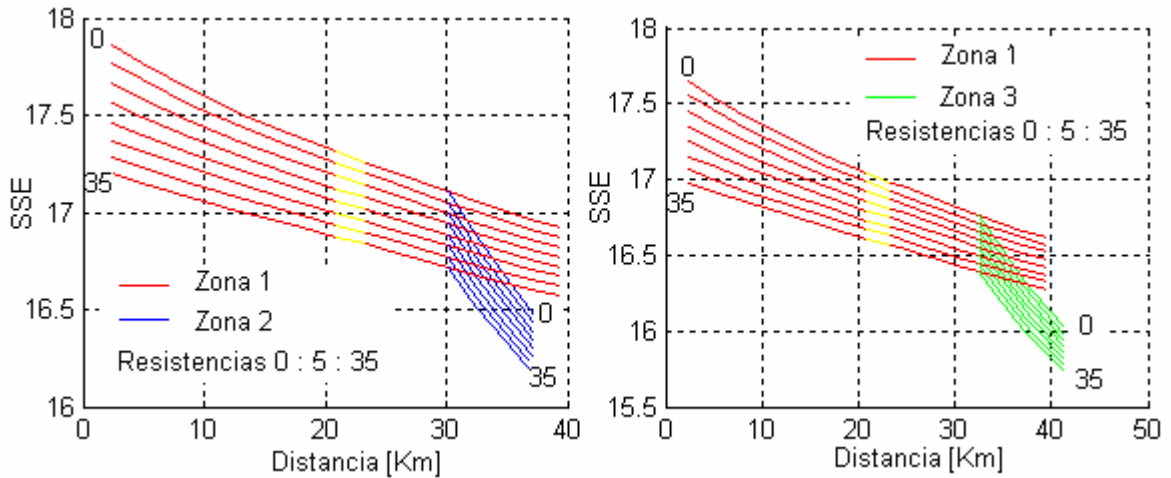


Figura 3.23 SSE para las diferentes zonas.

Cuando ocurre una falla cuya localización está en la parte de las curvas que se intersectan se tendrán dos respuestas, similares a la mostrada en la figura 3.22.

Para seleccionar la respuesta correcta es necesario el uso de más de un descriptor, por esta razón este problema se solucionará en el próximo capítulo, luego de mostrar todos los descriptores, encontrados en este trabajo.

3.5 DESCRIPTOR CD7(4)

Como se mostró en la sección 2.3.2, al aplicar la TWD para la señal Irms de falla, los detalles 7 y 8 son los que presentan mayor energía, los cuales corresponden a los rangos de frecuencia de 60 a 120 hz y de 30 a 60 hz, respectivamente, y están relacionados con la estacionalidad de la serie de tiempo asociada al transitorio.

Para ambos el coeficiente con mayor valor es el 4, que corresponde a los dos picos que alcanza el transitorio antes de empezar a decrecer. Este comportamiento se aprecia en la figura 3.24.

Se escogió este coeficiente como descriptor pues contiene información de la energía relacionada con la frecuencia natural del transitorio. Sin embargo se prefirió CD7(4) por encima del CD8(4), pues como se muestra mas adelante tiene un mejor comportamiento en la relación Distancia vs Resistencia.

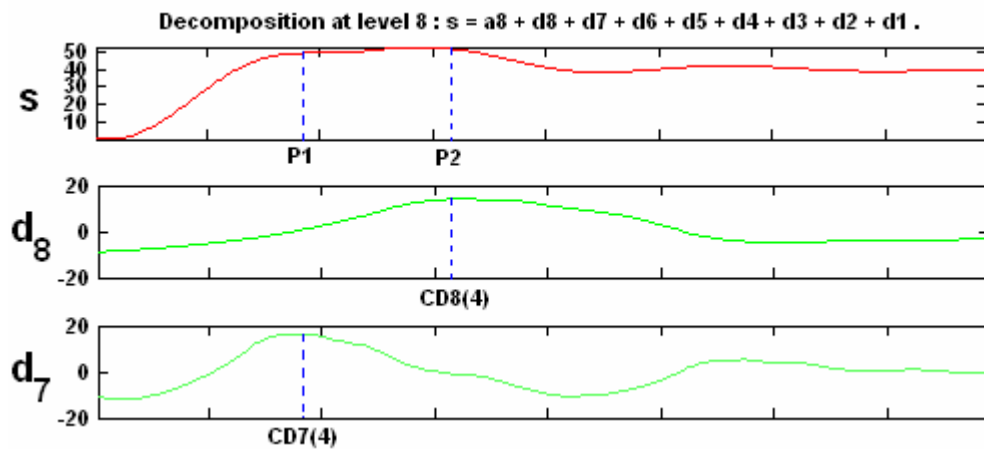


Figura 3.24 Detalle 7 y 8 de la Irms de falla.

3.5.1 Estimación del tipo de falla

Para determinar el tipo de falla se calculó el CD7(4) de las señales Irms y Vrms por fase para todos los tipos de fallas, obteniendo resultados similares para cada tipo, independientemente de la distancia y resistencia de la falla. Los resultados se muestran en la tabla 3.5.

Falla	Tipo	CD7(4)					
		Irms			Vrms		
		A	B	C	A	B	C
1	1ΦT	42,35	0,073	-0,023	-0,329	-0,067	-0,0316
2	1ΦT	0,015	8,17	0,063	-0,092	-0,167	-0,032
3	1ΦT	0,021	0,016	6,297	-0,017	-0,006	-0,102
4	2Φ	36,16	33,65	0,001	-0,338	-0,483	0,0038
5	2Φ	0,002	17,05	16,12	0,004	-0,332	-0,165
6	2Φ	34,98	0,004	33,09	-0,257	0,003	-0,155
7	2ΦT	43,6	29,47	0,035	-0,373	-0,5	-0,064
8	2ΦT	0,034	25,59	22,54	-0,095	-0,424	-0,167
9	2ΦT	45,02	0,086	24,02	-0,321	-0,099	-0,188
10	3Φ	45,89	28,722	24,27	-0,386	-0,486	-0,169
11	3ΦT	45,88	28,725	24,28	-0,387	-0,487	-0,167

Tabla 3.5 CD7(4) para los diferentes tipos de falla.

Analizando los valores de CD7(4) para las señales Irms en los diferentes tipos de fallas se observa que las fases falladas tienen un valor mayor a 1, mientras que en las fases no falladas está por debajo de 1. Esto es apenas lógico, considerando que CD7(4) es una medida de la energía de la falla, la cual se concentra en las fases falladas. Como se muestra en la figura 3.25.

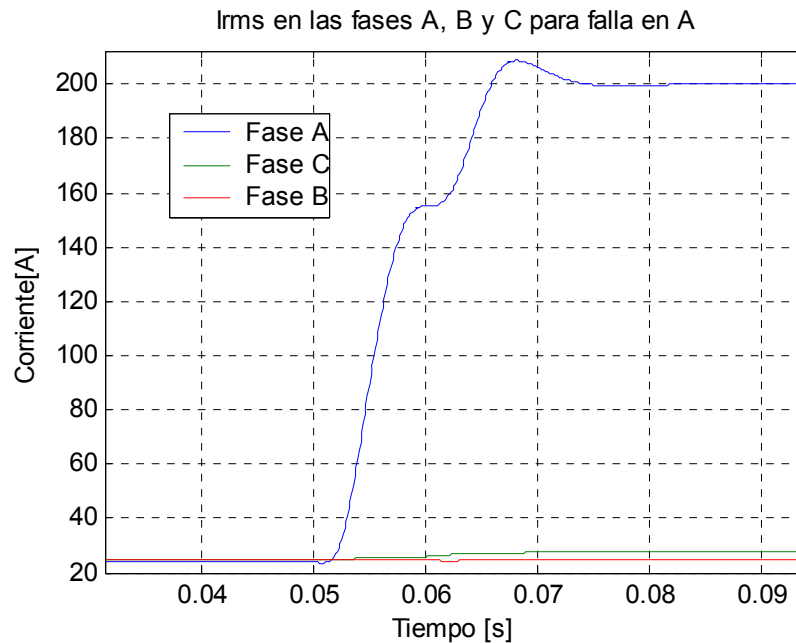


Figura 3.25 Irms por fase en falla monofásica.

De acuerdo con lo anterior, es posible determinar la fase o las fases donde ocurrió la falla usando el valor de $CD7(4)$ para las señales I_{rms} , aunque no es posible diferenciar entre una falla bifásica y una a falla bifásica a tierra, ni entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra.

Analizando los valores de $CD7(4)$ para las señales de V_{rms} no se observan patrones que diferencien entre una fase fallada y una no fallada ya que los valores de $CD7(4)$ son negativos y menores que 1 para ambos casos, a excepción de la fase no fallada en las fallas bifásicas donde el valor de $CD7(4)$ es positivo.

Como se explico anteriormente esto se debe a que un una falla bifásica hay un leve incremento en la tensión de la fase no fallada, a diferencia de una falla bifásica a tierra donde la tensión de la fase no fallada también disminuye. Este comportamiento se mostró en la figura 3.25.

De acuerdo con lo anterior se puede usar $CD7(4)$ de la señal V_{rms} para diferenciar entre una falla bifásica y una falla bifásica a tierra.

Finalmente es posible conocer el tipo de falla calculando $CD7(4)$ para las señales I_{rms} de las tres fases y así determinar las fases falladas, en caso de haber dos fases falladas se calcula $CD7(4)$ de la señal V_{rms} en la fase no fallada para saber si se trata de una falla bifásica o una falla bifásica a tierra. Sin embargo $CD7(4)$ no permite diferenciar entre una falla trifásica y una falla trifásica a tierra ya que su respuesta es muy similar.

3.5.2 Estimación de la distancia y resistencia de falla

Una vez determinado el tipo de falla es posible analizar cada caso en particular para estudiar la relación de $CD7(4)$ con la distancia y la resistencia de la falla, a fin de dar una posible localización de esta.

Para hacer este estudio se ha implementado un programa en Matlab que calcula la TWD y toma el $CD7(4)$ de las señales I_{rms} y V_{rms} para todos los tipos de fallas, en diferentes nodos dentro del circuito de prueba y con diferentes resistencias de falla, y los grafica en función de la distancia y la resistencia.

Se usaron las resistencias $R_1, R_2, R_3, R_4, R_7, R_8, R_9$ y R_{10} , que corresponden a los valores de 0.05, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 Ω respectivamente, para todos los nodos del circuito de prueba. Los resultados se muestran a continuación.

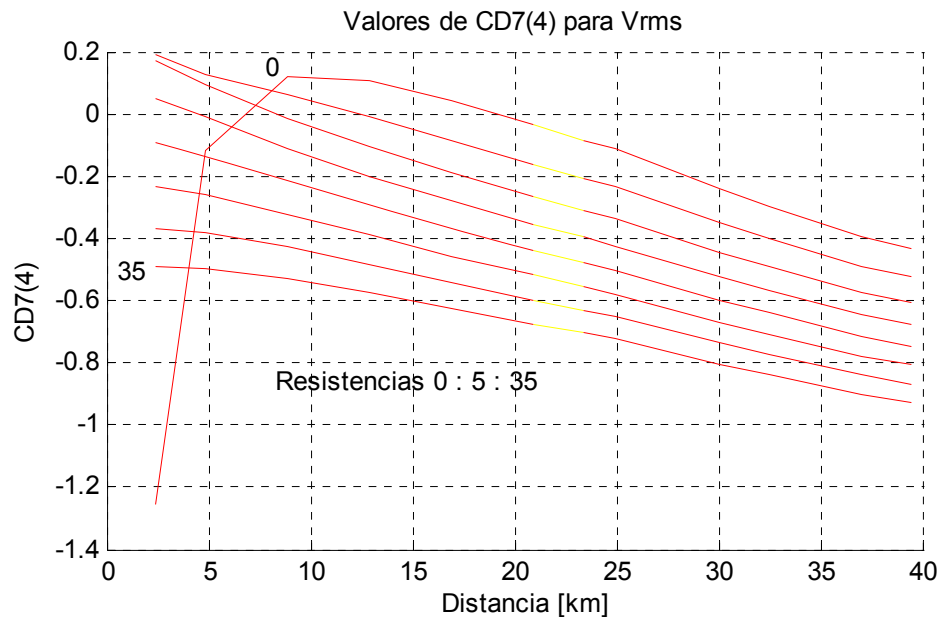


Figura 3.26 Relación entre $CD7(4)$ de V_{rms} , la distancia y la resistencia.

En la figura 3.26 se aprecia la relación entre $CD7(4)$ para la señal V_{rms} de la fase fallada en una falla tipo 1, y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia.

Se puede observar que la relación no es lineal y cambia para los diferentes valores de resistencia lo cual dificulta su análisis. Este comportamiento se presenta para todos los tipos de fallas, por esta razón no es conveniente usar las señales V_{rms} para relacionar $CD7(4)$ con la distancia y la resistencia de la falla.

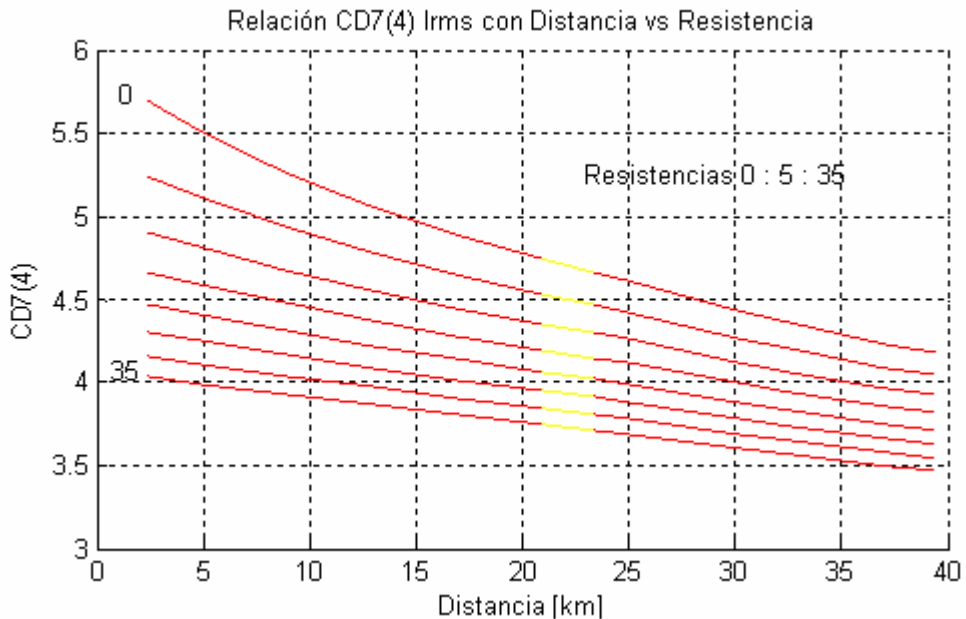


Figura 3.27 Relación entre CD7(4) de Irms, la distancia y la resistencia.

En la figura 3.27 se aprecia la relación entre el valor de CD7(4) para la señal Irms de la fase fallada y la distancia del nodo, para los diferentes valores de resistencia. Se puede observar que existe una relación inversamente proporcional y casi lineal entre CD7(4) y la distancia, y que esta relación es inversamente proporcional con la resistencia de falla, en otras palabras se podría decir que la curva CD7(4) vs Distancia se desplaza hacia abajo conforme se aumenta la resistencia de falla.

Este comportamiento se asemeja al observado en la figura 1.10 de la sección 1.2.3, donde se estudió la relación entre la magnitud del transitorio, la distancia y la resistencia de falla, sin embargo en esta ocasión se observa un comportamiento más lineal debido a que CD7(4) representa la energía de un pico del transitorio, menor al máximo pico, como se muestra en la figura 3.24.

Como se mencionó anteriormente se prefirió CD7(4) por encima del CD8(4), por tener un mejor comportamiento en la relación Distancia vs Resistencia. Para entender mejor esto, considérese la relación entre CD8(4), la resistencia y la distancia mostrada en la figura 3.28.

En la cual se observa un comportamiento irregular en la sección de las curvas encerrada por el ovalo azul.

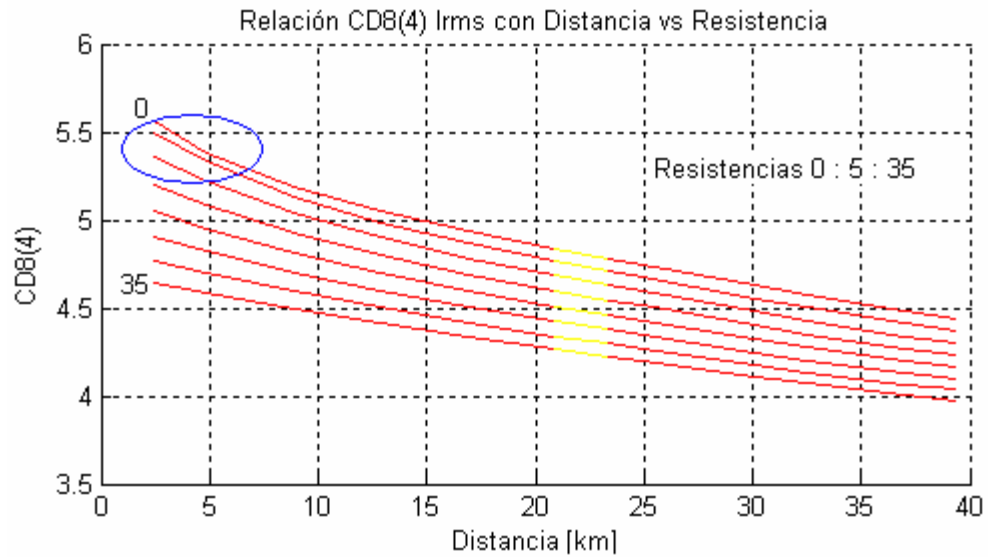


Figura 3.28 Relación entre CD8(4) de Irms, la distancia y la resistencia.

La relación mostrada en la figura 3.27 se presenta para todos los tipos de fallas como se muestra en la figura 3.29. Debido a este comportamiento es posible usar el CD7(4) de la señal Irms en la fase fallada para relacionar la distancia y la resistencia de falla.

En la figura 3.29 las curvas rojas, azules, verdes y amarillas corresponden a las fallas en las zonas 1, 2, 3 y 4 el circuito, respectivamente. Se puede observar que las curvas de las zonas 2 y 3 se intersectan en cierta parte con la zona 1. Mientras que las curvas de la zona 4 se intersectan totalmente con las curvas de la zona 1.

Esto significa que es necesario un criterio adicional para diferenciar entre una zona y otra, pero por ahora se continuará estudiando la relación entre la distancia y resistencia de falla, y el descriptor CD7(4).

Siguiendo el mismo procedimiento usado para los otros descriptores, se obtiene la curva Distancia vs Resistencia para una falla en particular, usando CD7(4). Esta curva se muestra en la figura 3.30.

En esta curva se encuentran todas las posibles combinaciones de resistencias y distancias de falla que producirían la misma respuesta transitoria.

Al igual que con los otros descriptores, se tendría un problema de infinitas soluciones por lo que en el próximo capítulo se integrarán diferentes curvas para encontrar una única solución.

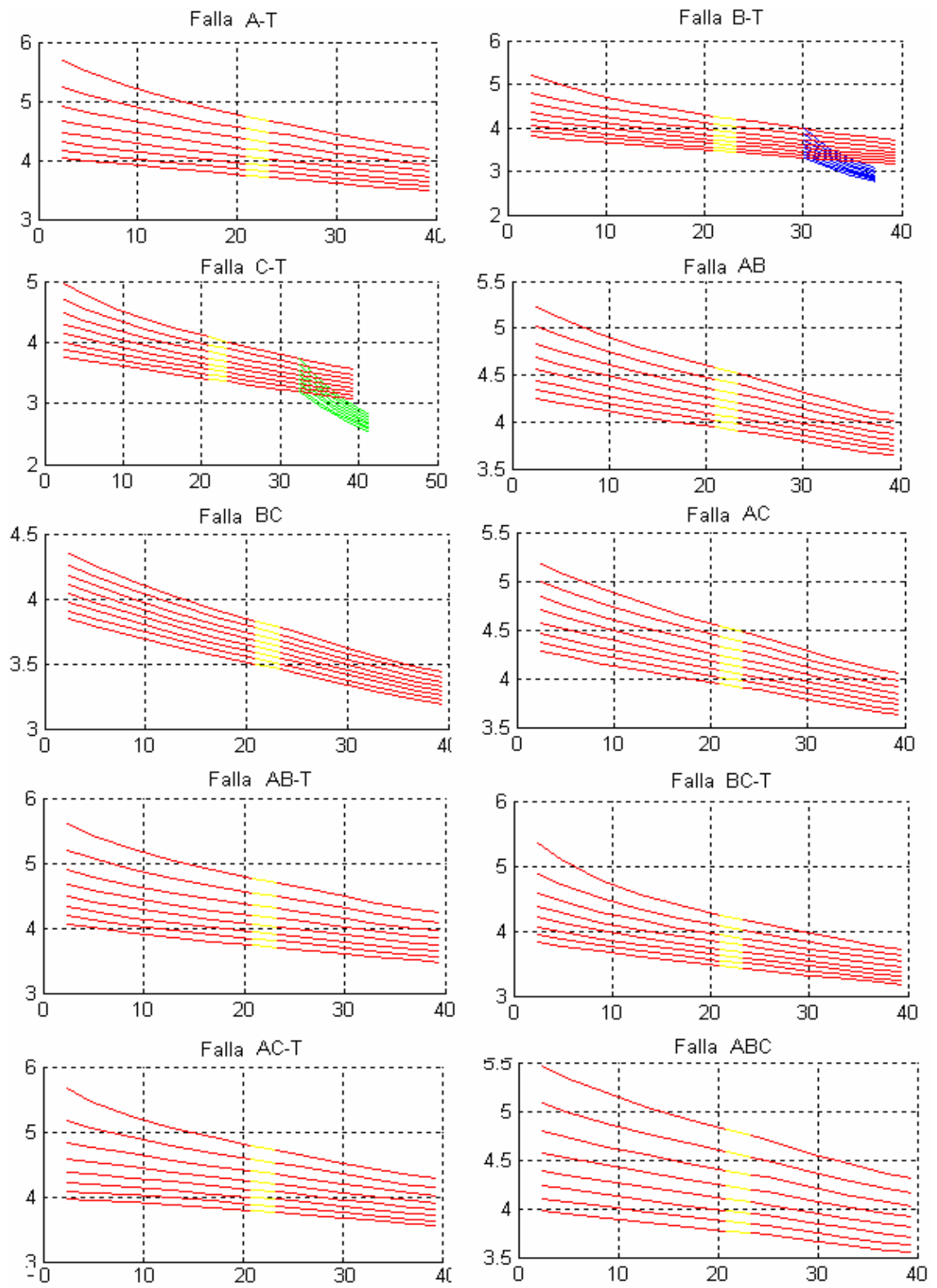


Figura 3.29 CD7(4) para las diferentes tipos de fallas.

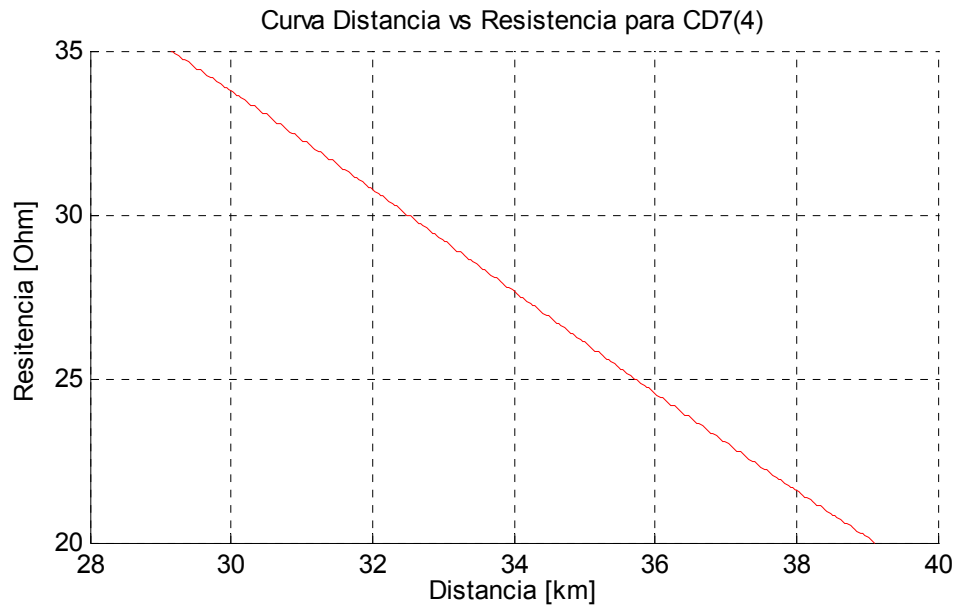


Figura 3.30 Relación entre la distancia y la resistencia, con CD7(4).

3.5.3 Estimación de la zona

Como se mencionó anteriormente las curvas de CD7(4) para I_{rms} , en función de la resistencia y la distancia de falla para las diferentes zonas, se intersectan en ciertos puntos, lo que dificulta el uso de este descriptor para diferenciar la zona. Sin embargo se observa un comportamiento interesante para las zonas 2 y 3, en lo referente a un aumento en la pendiente de las curvas con relación a las de la zona 1. Ver figura 3.31.

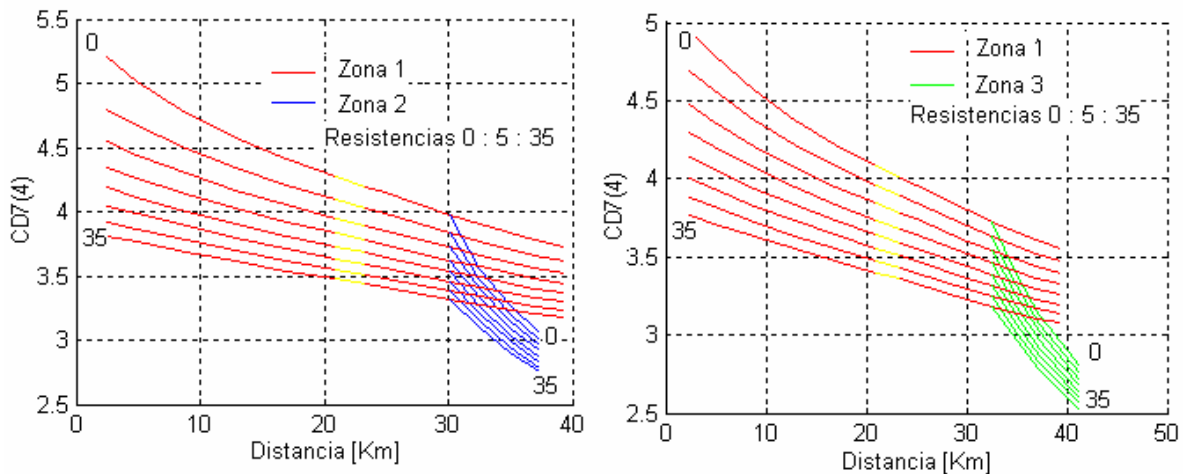


Figura 3.31 CD7(4) para las diferentes zonas.

Esto quiere decir que en estas zonas el valor CD7(4) decrece más rápidamente en función de la distancia, lo que significa que la energía del transitorio disminuye

más rápido conforme aumenta la distancia. La justificación de este fenómeno es la misma que para los descriptores MXT y SSE.

Cuando ocurre una falla cuya localización está en la parte de las curvas que se intersectan se tendrán dos respuestas, similares a la mostrada en la figura 3.31.

Para seleccionar la respuesta correcta es necesario el uso de más de un descriptor, por esta razón este problema se solucionará en el próximo capítulo, donde se integran los cuatro descriptores mostrados.

4 MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLA

Aquí se integran los descriptores mostrados en el capítulo anterior en un método para estimar la localización de la falla. Primeramente se caracteriza el circuito, calculando los descriptores para diferentes tipos de fallas, luego los descriptores se combinan en parejas para obtener la distancia y la resistencia de falla, y se unen las respuestas de cada pareja de descriptores para finalmente estimar la zona del circuito donde se presenta la falla.

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CIRCUITO

Como se mostró en el capítulo anterior es posible usar los descriptores para determinar el tipo de falla. La caracterización del circuito consiste en generar las curvas “Distancia vs Descriptor” por tipo de falla, para diferentes resistencias de falla, y diferentes localizaciones.

Las curvas se generan para las fallas ocurridas en todos los nodos del circuito de prueba, con resistencias de fallas de 0,05; 5; 10; 15; 20; 25; 30 y 35 ohm, y se usan para estimar la distancia y la resistencia de una falla ocurrida en cualquier punto del circuito y con una resistencia dentro del rango usado para crear las curvas.

Se implementó una herramienta en Matlab llamada “caracterización”, que calcula el valor de los descriptores lambda, MXT, SSE y CD7(4), para las fallas simuladas en los nodos y resistencias de caracterización. Con estos valores se construyen las curvas que relacionan el descriptor con la distancia y la resistencia, y se guardan en matrices tridimensionales con la notación que se muestra en el siguiente ejemplo.

Considérese la matriz **LZ1** de dimensiones (tf x rf x df)

La primera letra hace referencia al descriptor y puede ser L, M, S ó W, que corresponden a los descriptores lambda, MXT, SSE y CD7(4) respectivamente. Las letras siguientes hacen referencia a la zona del circuito, y pueden ser Z1, Z2, Z3 ó Z4, según corresponda. Las dimensiones de la matriz están dadas por los valores tf, rf y df que definen el tipo, la resistencia y la distancia de la falla, respectivamente.

Por ejemplo la matriz LZ1 tiene dimensiones de (10 x 8 x 4000), que corresponden a:

- Los 10 tipos de falla que pueden diferenciar los descriptores y que se presentan en la zona 1. Por ejemplo en las zonas 2 y 3 este valor es 1, mientras que en la zona 4 es 10.
- Las 8 resistencias usadas en el entrenamiento.
- Los 4000 puntos en los que se divide la línea de la zona 1, donde cada punto está espaciado 10 metros, para una longitud total de la línea de 40 km. Este espaciamiento hace referencia a la resolución de la curva y por consiguiente de la localización de la falla. Las zonas 2, 3 y 4 tienen 800, 950 y 250 puntos respectivamente.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo del proceso de caracterización del circuito.

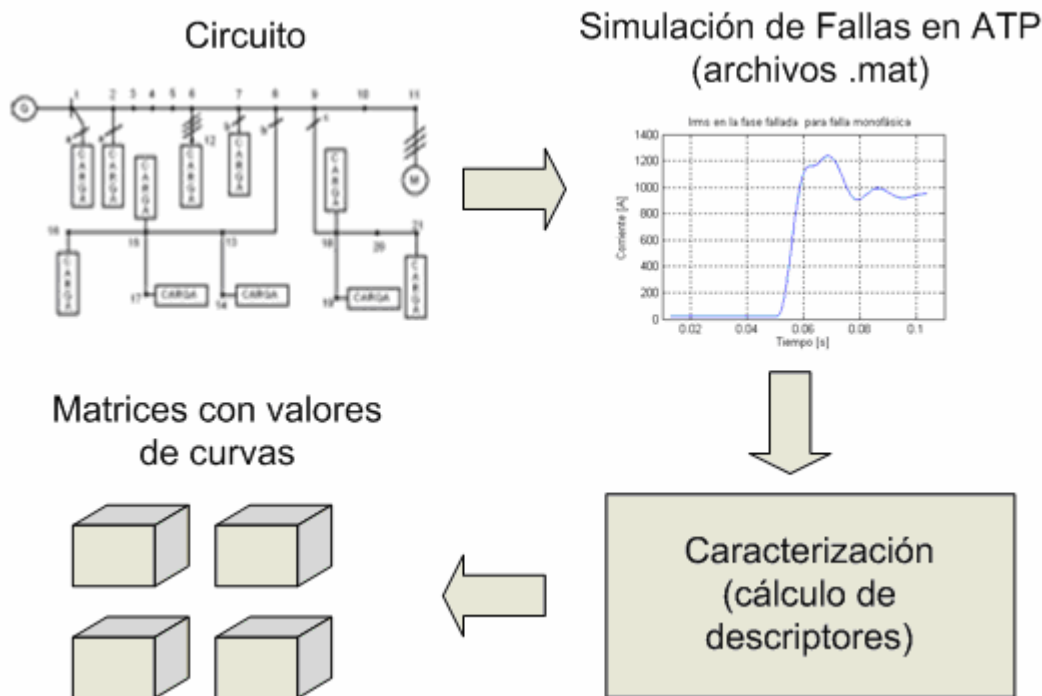


Figura 4.1 Diagrama de flujo del proceso de caracterización del circuito.

Luego se simular en ATP los diferentes tipos de fallas, la herramienta “caracterización” toma aproximadamente tres minutos en calcular los valores de los descriptores para las fallas simuladas en el circuito de prueba, crear las curvas y guardarlas en las matrices, usando un PC con procesador de 3200 MHz y 512 MB de memoria. Cabe resaltar que este proceso se realiza una sola vez por circuito.

4.2 INTEGRACIÓN DE LOS DESCRIPTORES

Cuando ocurre una falla cualquiera, es posible usar los descriptores para determinar su tipo, teniendo en cuenta los criterios mostrados en el capítulo anterior. Una vez determinado el tipo de falla es posible remitirse a las curvas que relacionan los descriptores con la distancia y la resistencia para ese tipo de falla, y obtener una curva de “Distancia vs Resistencias” para cada descriptor como se muestra en la figura 4.2.

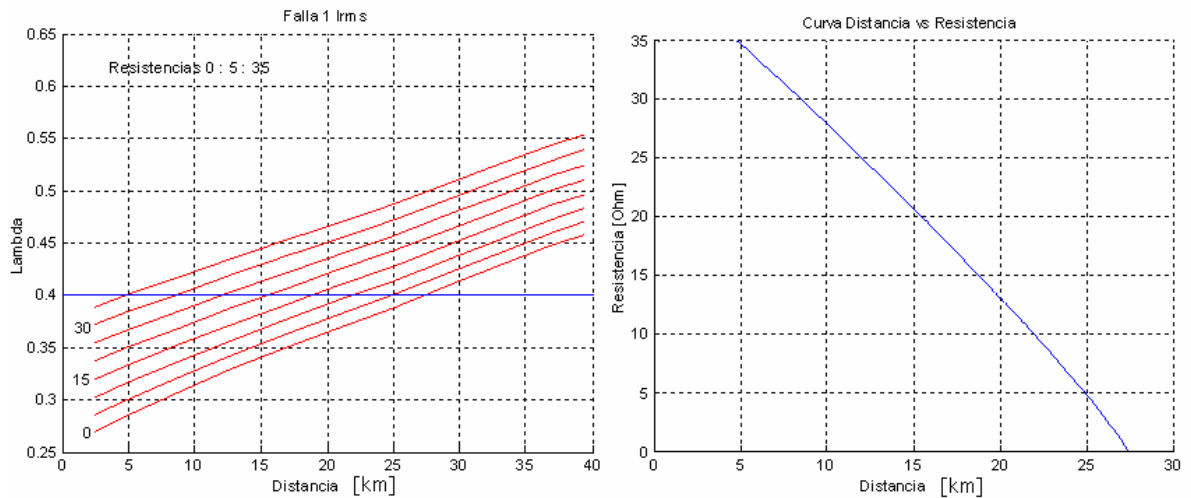


Figura 4.2 Obtención de la curva Distancia vs. Resistencia para una falla.

Como se mencionó anteriormente estas curvas por si solas no permiten tener una respuesta exacta, por esta razón se combinan en parejas, buscando un punto de intersección, cuyas coordenadas serían las respuestas de distancia y resistencia de falla. En la figura 4.3 se muestra el diagrama de flujo de este proceso.

A continuación se aplican las seis posibles combinaciones de descriptores, en un ejemplo que consiste en determinar la distancia y la resistencia de una falla monofásica en la fase B ubicada a 32,507 km en la línea principal y con una resistencia de falla de 15 Ohm. Cabe resaltar que ésta es una de las fallas usadas en el entrenamiento de los descriptores por lo que se espera una respuesta con gran exactitud.

La combinación de dos descriptores se llama algoritmo, y a continuación se muestran los algoritmos encontrados.

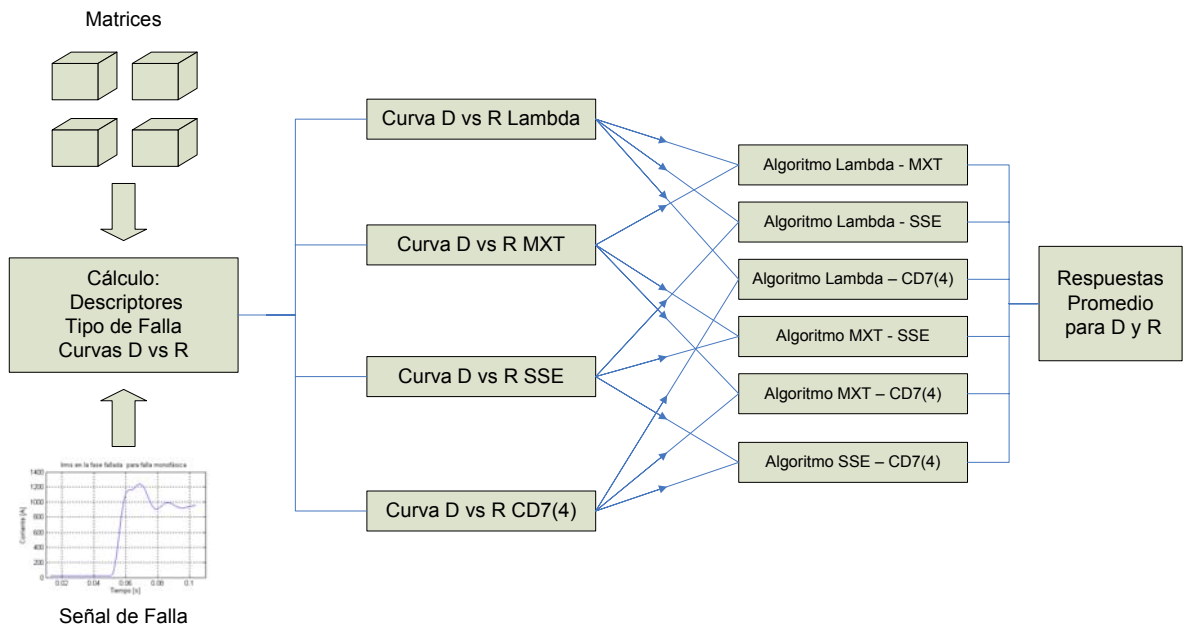


Figura 4.3 Diagrama de flujo para la integración de los descriptores.

4.2.1 Algoritmo Lambda – MXT

En la figura 4.4 se muestra la intersección de las curvas de “Distancia vs Resistencia” para los descriptores lambda y MXT. Se obtuvo una distancia de 32,5 km y una resistencia de 15 Ohm. Este resultado se considera satisfactorio.

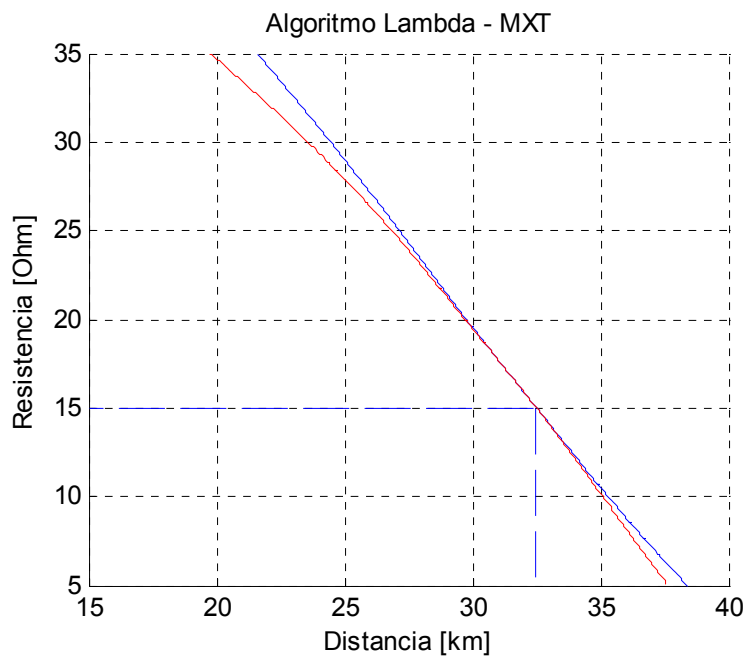


Figura 4.4 Obtención de distancia y resistencia de falla usando Lambda – MXT.

4.2.2 Algoritmo Lambda – SSE

En la figura 4.5 se muestra la intersección de las curvas de “Distancia vs Resistencia” para los descriptores lambda y SSE. Se obtuvo una distancia de 32,5 km y una resistencia de 15 Ohm. Este resultado se considera satisfactorio.

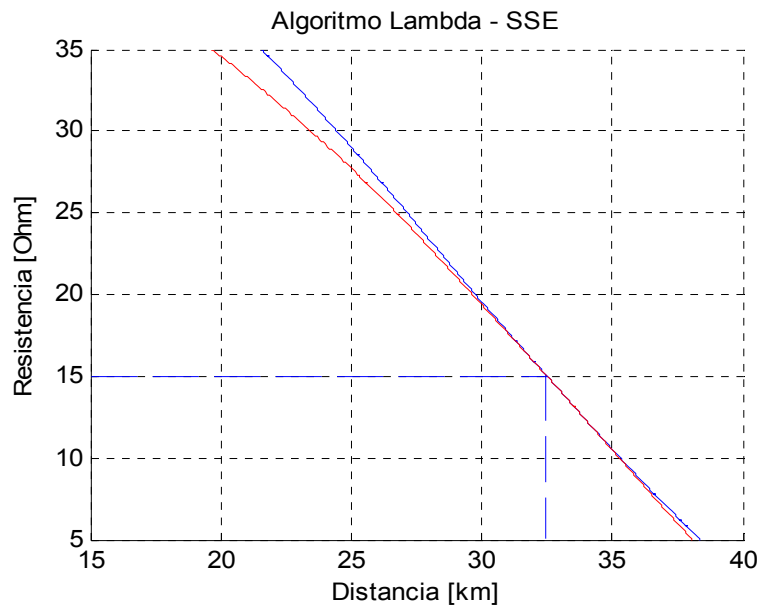


Figura 4.5 Obtención de distancia y resistencia de falla usando Lambda – SSE.

4.2.3 Algoritmo Lambda – CD7(4)

En la figura 4.6 se muestra la intersección de las curvas de “Distancia vs Resistencia” para los descriptores lambda y CD7(4). Se obtuvo una distancia de 32,5 km y una resistencia de 15 Ohm. Este resultado se considera satisfactorio.

4.2.4 Algoritmo MXT - SSE

En la figura 4.7 se muestra la intersección de las curvas de “Distancia vs Resistencia” para los descriptores MXT y SSE. Se obtuvo una distancia de 32,5 km y una resistencia de 15 Ohm. Este resultado se considera satisfactorio

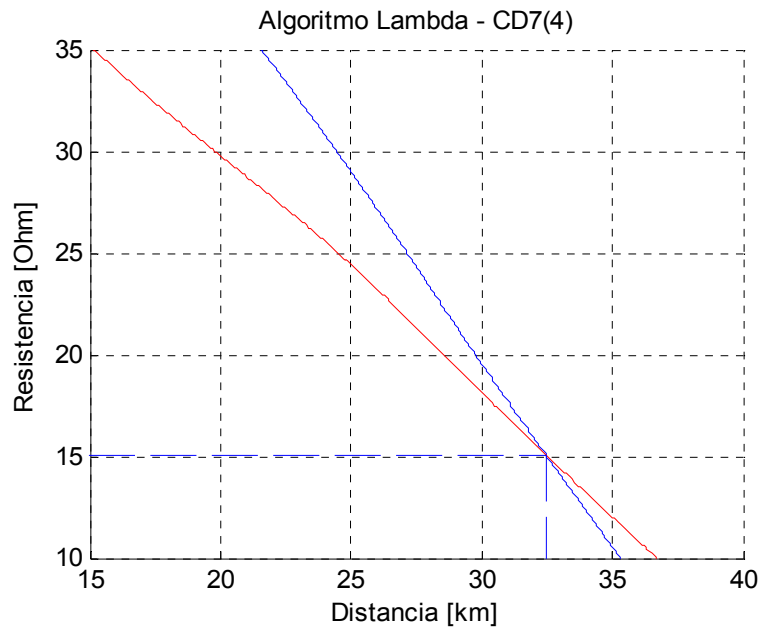


Figura 4.6 Obtención de distancia y resistencia de falla usando Lambda – CD7(4).

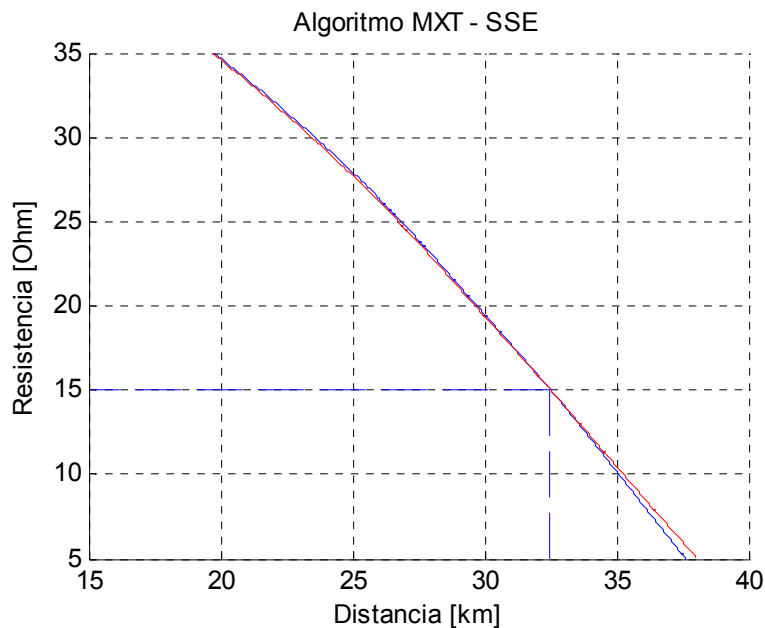


Figura 4.7 Obtención de distancia y resistencia de falla usando MXT – SSE.

4.2.5 Algoritmo MXT – CD7(4)

En la figura 4.8 se muestra la intersección de las curvas de “Distancia vs Resistencia” para los descriptores MXT y CD7(4). Se obtuvo una distancia de 32,5 km y una resistencia de 15 Ohm. Este resultado se considera satisfactorio.

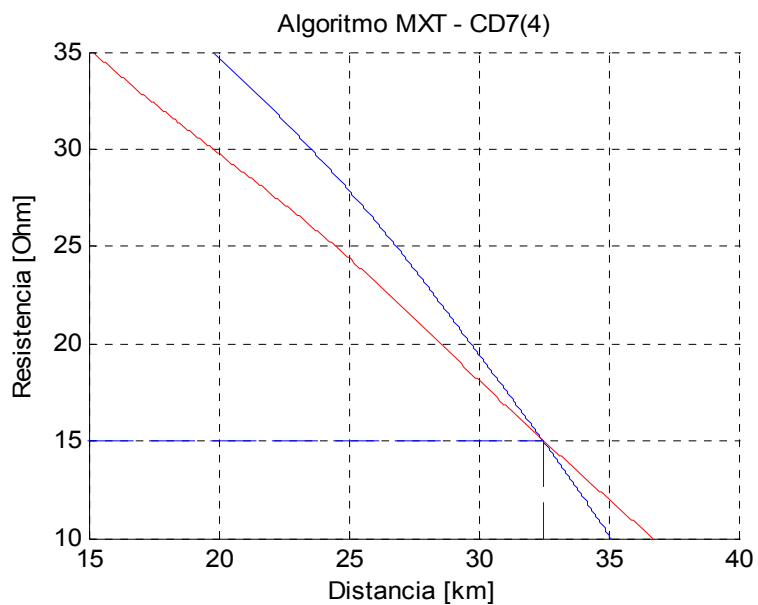


Figura 4.8 Obtención de distancia y resistencia de falla usando MXT – CD7(4).

4.2.6 Algoritmo SSE – CD7(4)

En la figura 4.9 se muestra la intersección de las curvas de “Distancia vs Resistencia” para los descriptores SSE y CD7(4). Se obtuvo una distancia de 32,5 km y una resistencia de 15 Ohm. Este resultado se considera satisfactorio.

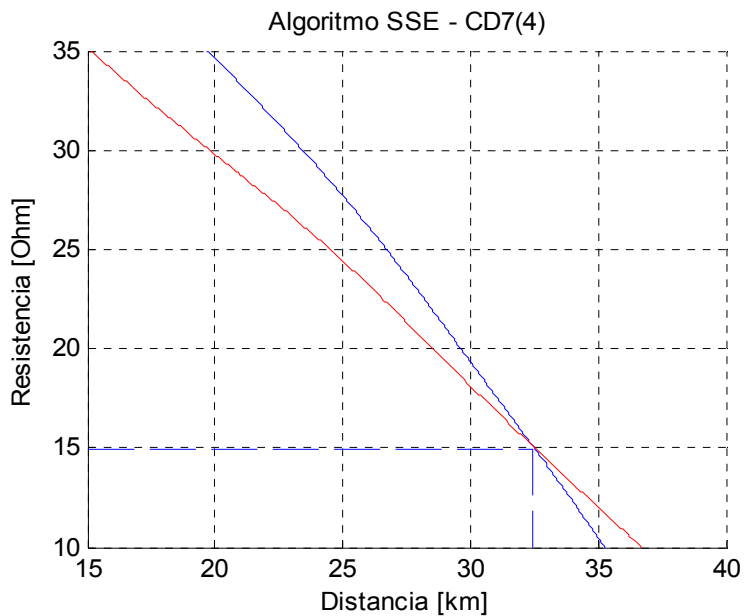


Figura 4.9 Obtención de distancia y resistencia de falla usando SSE – CD7(4).

Como se pudo observar se obtuvieron seis respuestas iguales, lo que confirma la eficiencia de estos algoritmos. Adicionalmente se pueden sacar algunas conclusiones al comparar las curvas “Distancia vs Resistencia” producidas por los diferentes descriptores.

Finalmente se considera necesario recordar la relación entre los descriptores y las características del transitorio. Estas relaciones se encuentran resumidas en la tabla 4.1.

Descriptor	Componente Relacionado en Serie de Tiempo	Equivalente en Componente del Transitorio
Lambda	Variabilidad	Constante de Tiempo
MXT	Tendencia	Magnitud
SSE	Tendencia y Variabilidad	Constante de Tiempo y Magnitud
CD7(4)	Estacionalidad	Oscilaciones de Ims (Constante de tiempo de I(t))

Tabla 4.1 Relación entre los descriptores y los componentes del transitorio.

Analizando la información de la tabla se observa que los descriptores lambda y SSE están relacionados de cierta forma con la constante de tiempo, lo cual concuerda con lo mostrado en la figura 4.5, donde el comportamiento de las curvas es parecido.

De igual manera los descriptores MXT y SSE están relacionados con la magnitud del transitorio, esto se comprueba al observar la figura 4.7, donde el comportamiento de las curvas es muy parecido. Adicionalmente se observa que la curva de SSE es mas parecida a la de MXT, que a la de lambda lo que significa que la tendencia es el componente más influyente en el descriptor SSE.

Por otro lado, las curvas de los descriptores cuyos componentes asociados son diferentes, presentan una gran diferencia en su comportamiento. Tal es el caso de los descriptores lambda y CD7(4).

Hasta este momento se cuenta con una estimación para los valores de distancia y resistencia de falla, sin embargo aun es necesario diferenciar entre las zonas del circuito. Con este propósito se integran los seis algoritmos mostrados en un método para estimar la localización de la falla.

4.3 INTEGRACIÓN DE LOS ALGORITMOS EN UN MÉTODO GENERAL

Con los algoritmos propuestos es posible obtener seis valores probables de distancia y resistencia de falla. Para dar una única respuesta se realizaron pruebas para evaluar la eficiencia de cada uno de los algoritmos al calcular la distancia y resistencia de falla. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 4.2.

Falla	Zona	Errores de los algoritmos en %						Respuesta definitiva
		Lambda MXT	Lambda SSE	Lambda CD7(4)	MXT SSE	MXT CD7(4)	SSE CD7(4)	
A-T	1	0.25	0.42	0.87	0.34	0.095	0.14	Promedio de las 6 respuestas
B-T		0.48	0.64	0.72	0.39	0.63	0.25	
C-T		0.52	0.64	0.27	0.37	0.54	0.77	
AB		0.45	0.43	0.51	0.56	0.48	0.55	
BC		0.54	0.39	0.72	0.8	0.59	0.46	
AC		0.38	0.29	0.27	0.31	0.26	0.25	
AB-T		0.75	0.84	0.77	0.68	0.69	0.66	
BC-T		0.49	0.41	0.38	0.6	0.53	0.46	
AC-T		0.83	0.97	0.84	0.78	0.76	0.83	
ABC		0.56	0.68	0.74	0.54	0.69	0.75	
ABC-T		0.98	0.93	0.87	0.94	0.89	0.88	
B-T	2	0.54	0.69	0.52	2.45	0.46	0.58	Promedio de las respuestas excluyendo MXT - SSE
C-T	3	0.36	0.51	0.47	3.65	0.39	0.47	

Tabla 4.2 Cuantificación de errores para los diferentes algoritmos

Según los resultados obtenidos, para la zona 1 el error de los diferentes algoritmos es muy parecido para los diferentes tipos de falla, por lo que se toma el promedio de las seis respuestas para dar una respuesta única para la distancia y resistencia de falla. Sin embargo, para las zonas 2 y 3 el algoritmo MXT – SSE presenta errores considerablemente mayores a los otros algoritmos, por esta razón la respuesta única para la distancia y resistencia de falla se calcula con el promedio de las 5 respuestas de los otros algoritmos, excluyendo MXT – SSE.

Los valores de distancia y resistencia de falla calculados con esta metodología son muy importantes, pero no son suficientes para estimar la localización de la falla, pues es necesario conocer la zona del circuito donde esta ocurre. A continuación se muestra la metodología a seguir para determinar la zona.

Como se mostró en el capítulo anterior es posible obtener curvas por zona, que relacionan los descriptores, con la distancia y resistencia de falla. En la figura 4.10 se muestra un ejemplo de estas curvas para el descriptor lambda.

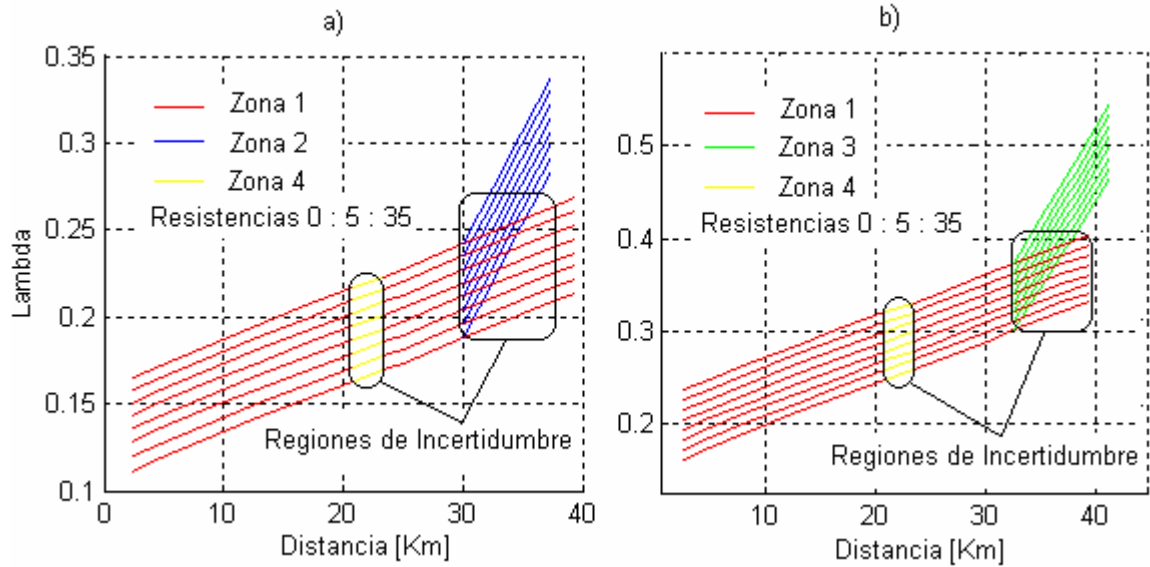


Figura 4.10 Curvas de lambda para las diferentes zonas.

Como se observa en la figura 4.10, las curvas se cruzan sólo para algunos valores del descriptor y de distancia, además en las zonas 2 y 3 sólo se presentan las fallas tipo 2 y 3, respectivamente, lo que delimita el problema de la zonificación a ciertas regiones donde se cruzan las curvas. Estas regiones se llaman regiones de incertidumbre. Y corresponden a las regiones enceradas en óvalos en la figura 4.10.

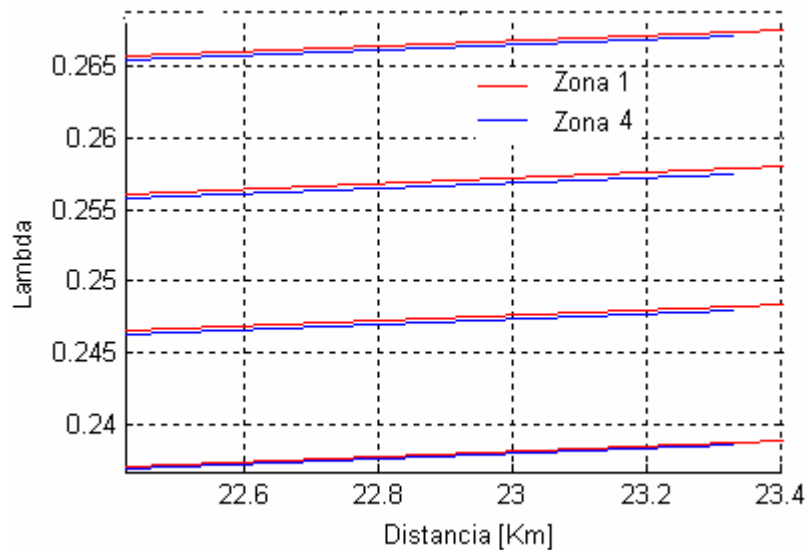


Figura 4.11 Comparación entre zonas 1 y 4.

En la figura 4.11 se muestra más detalladamente el cruce de las zonas 1 y 4, las cuales parecen tener curvas similares, sin embargo existen diferencias entre ellas.

Para solucionar el problema de la zonificación se propone la siguiente metodología, aplicable al circuito en cuestión.

Primero se determina el tipo de falla. Con este dato se sabe si es necesario diferenciar entre las zonas 1 y 2, o 1 y 3. Luego se calcula la distancia de falla usando las curvas de la zona 1, siguiendo el procedimiento mostrado en la figura 4.3.

Con el resultado de la distancia y el valor de los descriptores se usan las curvas similares a las mostradas en la figura 4.10 para saber si la falla está dentro de una región de incertidumbre. En caso de no ser así la localización de la falla será la estimada con las curvas de la zona 1. Si la falla está ubicada en una región de incertidumbre se calculan los seis valores de distancia y resistencia usando las curvas de la zona con la que se presenta la incertidumbre.

En este momento se tendrían dos grupos de valores de distancia y resistencia, de los cuales sólo uno corresponde a la respuesta correcta. Como se vio en la sección 4.2, las seis respuestas arrojadas por los algoritmos en la zona donde ocurre la falla, tenían valores iguales de resistencia y distancia. Sin embargo sería arriesgado suponer que las seis respuestas siempre sean iguales. Por esta razón se calcula la desviación estándar para los dos grupos de respuestas, y se escoge como zona correcta, aquella en la que la desviación estándar de sus respuestas sea menor.

Este procedimiento se explica mejor en el siguiente ejemplo, donde se localiza una falla monofásica en la fase B, ubicada en el nodo 13 que pertenece a la zona 2 del circuito de prueba, a una distancia de 32,507 km y con una resistencia de falla de 20 Ohm.

Primeramente se calcula el descriptor lambda de la señal Irms de falla, por fase y se obtiene:

Fase A: $\lambda = -205,8091$	$\lambda < -1$	Fase no Fallada
Fase B: $\lambda = -0,2514$	$-1 < \lambda < 0$	Fase Fallada
Fase C: $\lambda = -13,9021$	$\lambda < -1$	Fase no Fallada

Según los valores de lambda, se trata de una falla monofásica en la fase B, es decir una falla tipo dos, por lo que es necesario diferenciar entre las zonas 1 y 2. Para ello se calculan las distancias y resistencias de falla usando las curvas de la zona 1. Los resultados se muestran en la tabla 4.3.

Algoritmo	Distancia [km]	Resistencia [Ohm]
Lambda – MXT	33,29	35
Lambda – SSE	33,28	35
Lambda – CD7(4)	33,46	35
MXT – SSE	39,1312	26,1
MXT – CD7(4)	33,46	35
SSE – CD7(4)	33,46	35
Promedio	34,3468	33,516

Tabla 4.3 Resultados zona 1.

La distancia promedio fue de 34,3468 lo que quiere decir que se encuentra en la región de incertidumbre. Entonces se calculan las distancias y resistencias de la zona 2. Los resultados se muestran en la tabla 4.4.

Algoritmo	Distancia [km]	Resistencia [Ohm]
Lambda – MXT	32,51	20
Lambda – SSE	32,51	20
Lambda – CD7(4)	32,51	20
MXT – SSE	32,5	20
MXT – CD7(4)	32,5	20
SSE – CD7(4)	32,51	20
Promedio	32,506	20

Tabla 4.4 Resultados zona 2.

Ahora se calculan las desviaciones estándar de los datos de distancia y resistencia de las dos zonas, obteniendo para la zona uno desviaciones de 2,34 km y 3,6334 Ohm, y para la zona dos 0,0052 km y 0 Ohm. Analizando estos resultados se concluye que la falla ocurrió en la zona 2, a una distancia de 32,506 km, y con una resistencia de falla de 20 Ohm. Lo cual concuerda con los datos planteados en este ejemplo.

Este método también puede ser usado para localizar fallas que se encuentren en regiones de incertidumbre entre las zonas 1 y 3, y 1 y 4.

Como se mostró en el capítulo tres los descriptores encontrados no permiten diferenciar entre una falla trifásica y una trifásica a tierra, para ello se usa un procedimiento similar al usado en la zonificación, es decir, se calculan las distancias y resistencias de falla usando las curvas de los dos tipos de fallas y se escoge como correcta a aquella que presenta menor incertidumbre entre sus respuestas.

El método propuesto integra de manera muy eficiente todos los descriptores encontrados, y arroja una respuesta para la localización de una falla. Sin embargo,

necesita ser probado usando fallas con valores de distancia y resistencia de falla diferentes a los usados en la caracterización, para así evaluar su eficiencia, realizar las mejoras necesarias, cuantificar errores y analizar los resultados.

4.4 VARIACIÓN DEL INSTANTE DE FALLA

Como se mencionó en la sección 3.1 el instante en el que ocurre la falla influye en el transitorio, ya que el tamaño de este depende del valor de la señal $I(t)$ en el instante de falla. En la figura 4.12 se muestran señales $I(t)$ para diferentes instantes de falla, en ella se observa como varía la magnitud del transitorio y la forma de la onda.

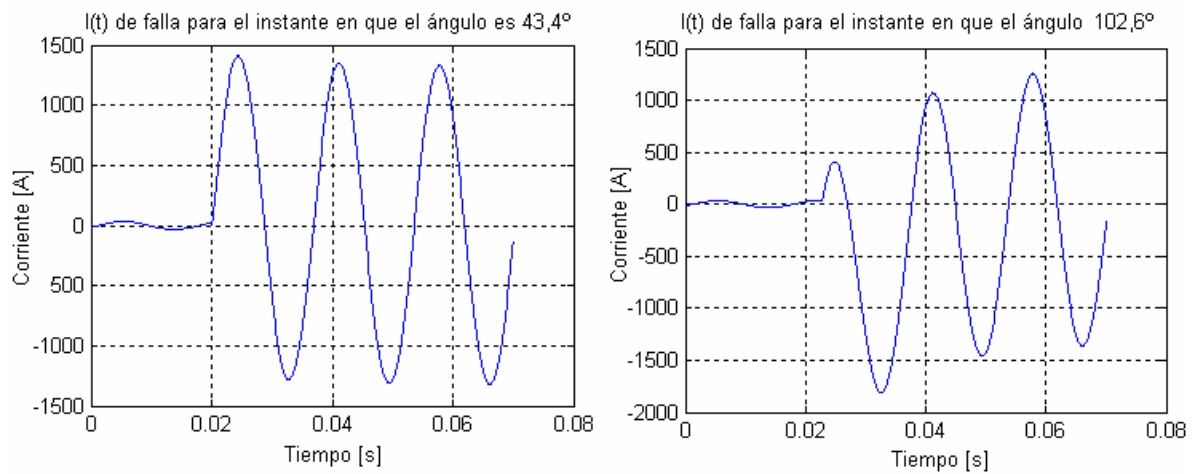


Figura 4.12 $I(t)$ para diferentes instantes de falla.

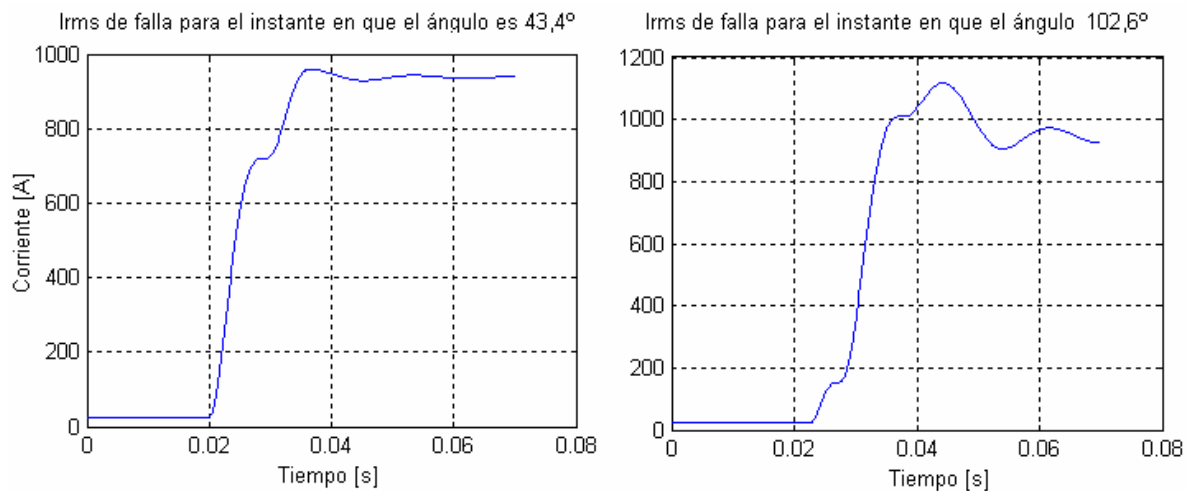


Figura 4.13 I_{rms} para diferentes instantes de falla.

Considerando que para el calculo de los descriptores se usan la señales rms, es necesario mirar su comportamiento para este mismo caso. En la figura 4.13 se muestran las señales Irms para las fallas mostradas en la figura 4.12. En ella se observa un cambio en el pico de corriente y en las oscilaciones de Irms.

Teniendo en cuenta que los descriptores encontrados están estrechamente relacionados con la magnitud y las oscilaciones de la señal Irms, es necesario evaluar su comportamiento para diferentes instantes de falla. Para ello se simularon diferentes fallas, manteniendo constante el tipo, la distancia y la resistencia de falla, y variando el instante de falla. En la figura 4.14 se muestran los valores del descriptor lambda para los diferentes ángulos de la señal Irms donde se presenta la falla.

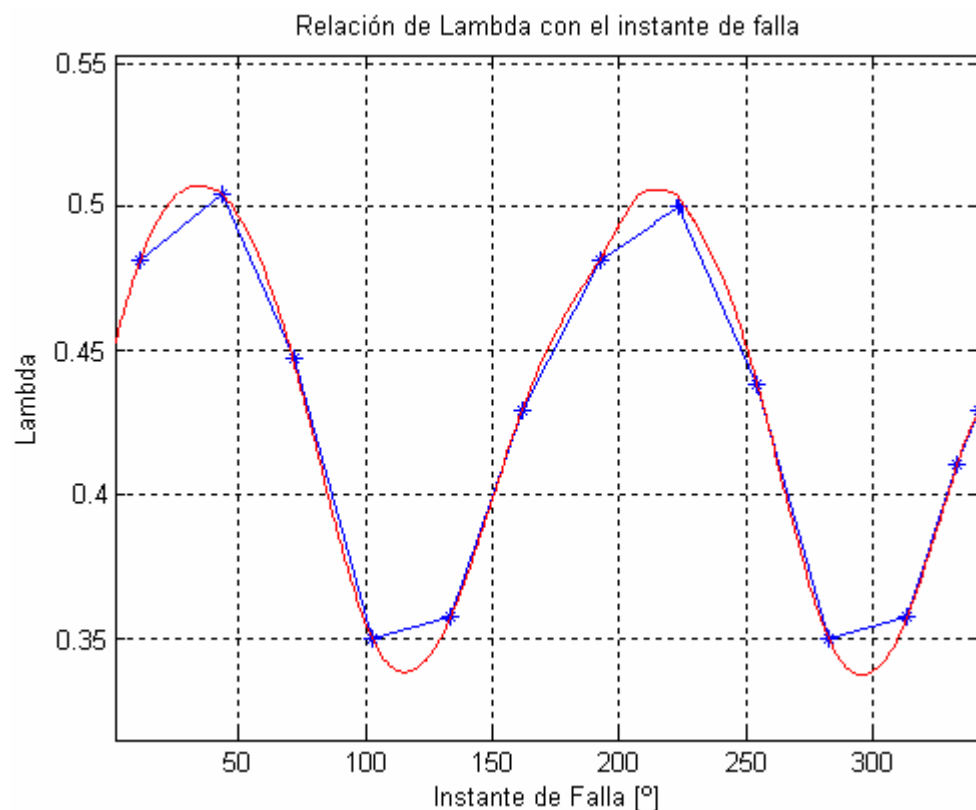


Figura 4.14 Valores del descriptor lambda para diferentes instantes de falla.

Analizando esta gráfica se observa un comportamiento aproximadamente senoidal, donde el valor de lambda oscila al doble de la velocidad que la señal $I(t)$.

Esto se debe a que el transitorio tiene su máxima energía cuando la falla ocurre en los instantes en que la pendiente de la señal en el tiempo es cero, es decir en sus picos, y tiene su mínima energía cuando la pendiente de la señal en el tiempo es máxima, es decir en los cruces por cero.

Se usó la herramienta de caracterización para construir las curvas del descriptor lambda, con respecto a la distancia y resistencia de falla usando diferentes instantes de falla. Se observó que las curvas se desplazan hacia arriba y hacia abajo siguiendo las oscilaciones mostradas en la figura 4.14. En la figura 4.15 se comparan las curvas para dos instantes de falla diferentes.

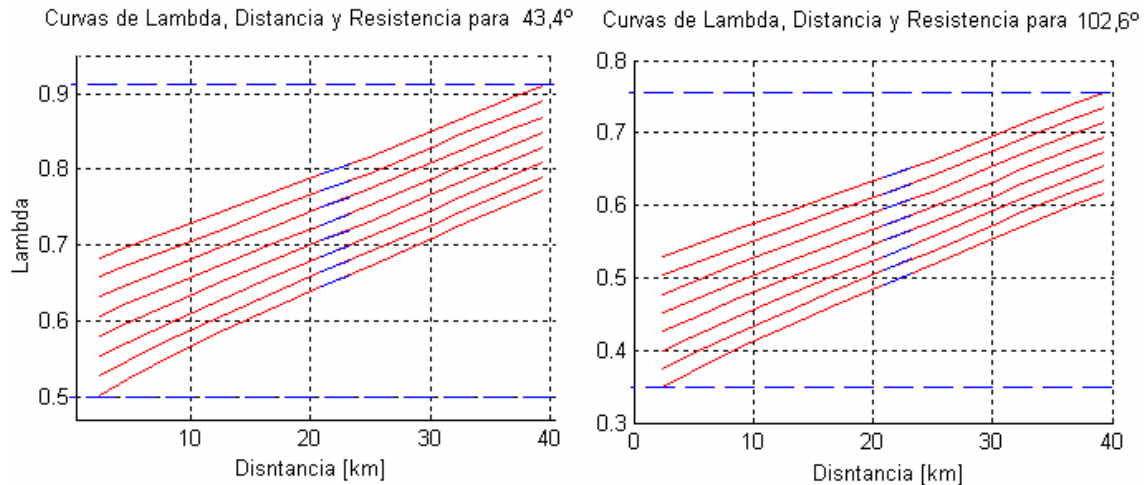


Figura 4.15 Curvas de lambda vs distancia para diferentes instantes de falla.

Este mismo comportamiento se presenta para los otros descriptores. Como resultado de este análisis es posible usar la metodología planteada para localizar fallas ocurridas en cualquier instante de tiempo, ajustando el valor de los descriptores de la falla de acuerdo al instante de falla.

4.5 PRUEBAS REALIZADAS AL MÉTODO

Como se mencionó en el capítulo uno el circuito de prueba es el de Ratandas, el cual se muestra en la figura 1.15.

Las pruebas se realizaron para fallas con resistencias y distancias diferentes a las del entrenamiento, para todos los tipos de fallas y para las diferentes zonas del circuito. Los resultados se muestran en la tabla 4.5. En la que se comparan los valores reales del tipo de falla, la zona, la distancia y la resistencia de falla, contra los estimados por el método.

En términos generales se obtuvieron buenos resultados en la localización de las fallas simuladas, pues se determinó exitosamente en todos los casos el tipo de falla y la zona del circuito donde ocurre. En cuanto a los valores de distancia y resistencia de falla se logró una muy buena aproximación. En la tabla 4.6 se muestra el cálculo de los errores de la prueba.

#	Tipo de Falla		Zona		Distancia [km]		Resistencia [Ohm]	
	Real	Est	Real	Est	Real	Est	Real	Est
1	A-T	A-T	1	1	2,414	2,425	3	2,9
2	B-T	B-T	1	1	4,828	4,811	12	11,825
3	C-T	C-T	1	1	8,851	8,858	17	16,983
4	AB	AB	1	1	12,874	12,884	23	22,983
5	BC	BC	1	1	16,897	16,889	33	33
6	AC	AC	1	1	20,920	20,890	2	2,066
7	ABT	ABT	1	1	24,943	25,008	33	32,75
8	BCT	BCT	1	1	30,093	30,104	23	23,008
9	ACT	ACT	1	1	32,507	32,504	17	16,941
10	ABC	ABC	1	1	37,013	36,972	12	12,3
11	B-T	B-T	2	2	32,507	32,569	23	22,5
12	B-T	B-T	2	2	34,921	34,895	33	33,25
13	B-T	B-T	2	2	37,335	37,323	17	17,15
14	C-T	C-T	3	3	34,921	34,928	3	2,96
15	C-T	C-T	3	3	37,335	37,368	12	11,76
16	C-T	C-T	3	3	38,14	38,081	23	23,5
17	C-T	C-T	3	3	41,359	41,321	33	33,35
18	A-T	A-T	4	4	23,334	23,409	17	16,9
19	AB	AB	4	4	23,334	23,371	23	22,9

Tabla 4.5 Resultados de las pruebas realizadas al método.

Falla	Error Dist [m]	Error Dist %	Error Res [Ω]	Error Res %
1	11	0,455	-0,1	-3,33
2	-17	-0,352	-0,175	-1,1
3	7	0,079	-0,017	-0,1
4	10	0,077	-0,017	-0,07
5	-8	-0,046	0	0
6	-30	-0,143	0,066	3,3
7	65	0,26	-0,25	-0,657
8	11	0,036	0,008	0,0034
9	-3	-0,009	-0,059	-0,34
10	-41	-0,111	0,3	2,5
11	62	0,19	-0,5	-2,17
12	-26	-0,48	0,25	0,75
13	-12	-0,032	0,15	0,882
14	7	0,018	-0,04	-1,039
15	33	0,079	-0,24	-2,08
16	-59	-0,154	0,5	2,17
17	-38	-0,092	0,35	1,06
18	75	0,321	-0,1	-0,525
19	37	0,158	-0,1	-0,457

Tabla 4.6 Errores de distancia y resistencia.

Según los valores de esta tabla el error en la localización de la falla, es muy pequeño, lo que deja ver que el modelo propuesto es una buena herramienta para la localización de la falla.

Este circuito fue caracterizado con 8 valores de resistencias comprendidas entre 0 y 35 Ohm, si se desea mejorar la eficiencia del método o ampliar el rango de resistencias de falla, basta con introducir mas resistencias de falla en la caracterización.

A continuación se muestra la gráfica del descriptor λ vs distancia para los valores de resistencia usados en la caracterización y dos valores adicionales que son 2 y 50 Ohm. Ver figura 4.16.

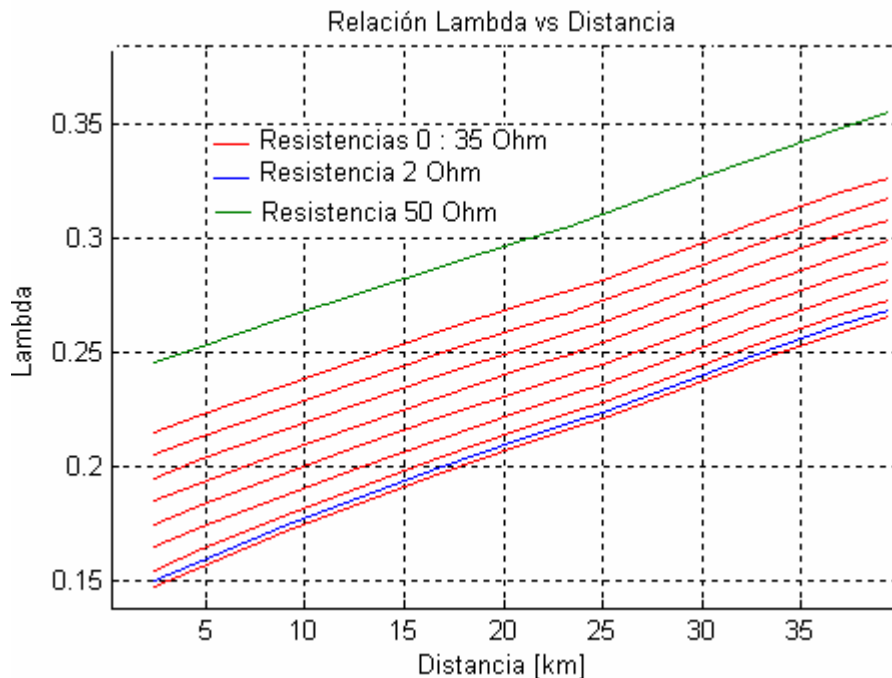


Figura 4.16 Relación Lambda vs. Distancia para valores de resistencia adicionales.

En la figura 4.16 las curvas rojas hacen referencia a los valores de resistencia usados en la caracterización del circuito de prueba, mientras que las curvas azul y verde corresponden a resistencias de 2 y 50 Ohm respectivamente.

El introducir curvas para valores de resistencia entre 0 y 35, mejora la resolución y disminuye el error del método, tal es el caso de la curva de 2 Ohm. Mientras que al introducir curvas para valores mayores a 35 Ohm se amplía el rango de funcionamiento del método, como se aprecia con la curva de 50 Ohm. Se observa que para las curvas introducidas se mantiene el mismo comportamiento lineal.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un método para caracterizar el transitorio producido por una falla en un sistema de distribución y estimar su localización. El método permite diferenciar el tipo de falla, la zona del circuito y la distancia a la cual ocurre, y la resistencia de falla. Para esto se analizó el transitorio como una Serie de Tiempo, utilizando las transformadas de Box-Cox y Wavelet.

Se determinó la relación que existe entre las componentes de un transitorio como son magnitud, frecuencia y constante de tiempo, y la localización de la falla.

La magnitud de un transitorio está relacionada con la distancia y la resistencia de falla, pues disminuye a medida que la falla se aleja de la fuente, y aumenta conforme disminuye la resistencia de falla. De igual manera la frecuencia y la constante de tiempo disminuyen con el aumento de la distancia y la resistencia de falla.

En este trabajo se analizaron los transitorios electromagnéticos como Series de Tiempo, encontrando una gran relación entre los componentes de una serie de tiempo como son estacionalidad, tendencia, variabilidad y error aleatorio, y los componentes de un transitorio.

La estacionalidad puede asociarse a la frecuencia natural del transitorio, mientras que la tendencia y la variabilidad se relacionan con la magnitud y la constante de tiempo respectivamente. El error aleatorio puede asociarse con el contenido de alta frecuencia del transitorio

Bajo esta consideración, se usaron transformadas de Series de Tiempo como herramientas para caracterizar los transitorios y obtener información sobre sus componentes. Estas transformadas fueron "Box-Cox" y "Wavelet".

La transformada "Box-Cox" suaviza la señal del transitorio, lo que permite calcular su tendencia, y arroja un parámetro llamado "lambda" que está ligado a la variabilidad de la señal y por consiguiente a la constante de tiempo del transitorio.

La transformada "Wavelet" separa la señal del transitorio en sus componentes de frecuencia, lo que permite encontrar el rango de frecuencias donde está la mayor energía del transitorio. De esta manera se relacionaron los componentes de baja y alta frecuencia arrojados por esta transformada, con la estacionalidad y el error aleatorio de la serie de tiempo asociada a un transitorio.

Se usó la “wavelet” madre “db4” y se obtuvo que el detalle 7 tiene los coeficientes con los valores mas altos, lo que significa que la mayor energía del transitorio se encuentra en el rango de las bajas frecuencias, asociada a la frecuencia natural.

Para caracterizar el circuito se tomaron las señales de tensión y corriente en sus valores “rms”, lo que elimina el problema de conocer los valores iniciales de la onda senoidal al instante de la falla. Además se trabajaron la señales en “pu”, donde la corriente y tensión nominales son los valores antes de ocurrida la falla. Esto para minimizar el efecto de la carga sobre el transitorio.

De la aplicación de las transformadas “Box-Cox” y “Wavelet”, se obtuvieron cuatro descriptores, los cuales se emplean en la caracterización del circuito y de las fallas. Estos descriptores son: el parámetro “lambda”, el máximo de la “TBC”, la Sumatoria del Error Cuadrático (parámetro interno de la “TBC”) y el coeficiente 4 del detalle 7 de la TWD.

Con estos descriptores es posible diferenciar el tipo de falla y obtener relaciones lineales con respecto a la distancia y a la resistencia. También se encontró que estas relaciones varían de acuerdo con la zona del circuito, lo que permite diferenciar entre una zona y otra.

Se encontró que es posible caracterizar un circuito calculando los valores de los descriptores para diferentes tipos de falla, zonas, distancias y resistencia. Generando con ellos curvas que relacionan la distancia y la resistencia, por zona y tipo de falla.

Estas curvas se integraron en un método que permite localizar una falla a cualquier distancia dentro del circuito y con cualquier resistencia de falla dentro del rango usado en la caracterización.

Con la metodología planteada es posible estimar la localización de una falla sin importar el instante en el que ocurra, ajustando el valor de los descriptores de esta en función del instante de falla.

Se realizaron pruebas de este método en el circuito de [DAS], donde se localizaron diferentes tipos de falla variando la zona, la distancia y la resistencia de falla. Se obtuvieron resultados exitosos con errores inferiores al 1%.

Para mejorar la eficiencia del método o ampliar el rango de resistencia, se pueden introducir mas valores de resistencia en la caracterización. En este trabajo se usaron 8 valores de resistencia comprendidos entre 0 y 35 Ohm, para la caracterización y las pruebas realizadas, sin embargo se construyeron curvas con resistencias de hasta 50 Ohm, obteniéndose resultados satisfactorios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Greenwood, Allan; *Electrical Transients in Power Systems*, 2ª edición, John Willey & Sons, Inc. USA 1991.
- [2] NTC 5000, 02. Norma Técnica Colombiana 5000: “Calidad de la potencia eléctrica (CPE): Definiciones y términos fundamentales”, Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), 2002.
- [3] Chatfield, Chris; *The Analysis of Time Series an Introduction*, 2ª edición, Mc Graw Hill, 1996.
- [4] Checa, Luis Maria; *Lineas de Transporte de Energía*, 3ª edición, Alfa Omega, 2000.
- [5] Vega García, Valdomiro; *Aplicación de la Transformada Wavelet Discreta (dwt) en la Detección e Identificación Eventos de la Calidad de la Energía Eléctrica*, Tesis de pregrado, dirigida por Cesar Duarte Gualdrón, UIS, 2004.
- [6] IEEE Std 1159 – 1995, CEI 61000-4-7 Compatibilidad Electromagnética CEM
- [7] Michel, Misiti; *Wavelet Toolbox*. Inc. The MathWorks.2002
- [8] Inc. The MathWorks. *Finalcial Time Series Toolbox*, 2002
- [9] M.S. Das, R.Sachdev and T.S. Shidhu. A fault locator for radial subtrasmisión and distribution lines. 1998.
- [10] Jaimes Florez, Felix; *Caracterizacion de Circuitos de Distribución para Estudios de Calidad en Sistemas de Energia Electrica* , Tesis de grado. UIS, 2006.
- [11] Inc. The MathWorks. Matlab Help, 2002.

APÉNDICE

GUÍA PARA EL USO DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

La metodología propuesta fue probada en el circuito de [Das], para estas pruebas se implementó una herramienta en el software Matlab. Esta herramienta esta compuesta por tres programas de caracterización, uno para cada zona del circuito, y un programa de localización. Para su uso se deben seguir los siguientes pasos.

1. Seleccione la herramienta a usar de acuerdo a la versión de Matlab que este disponible, abriendo la carpeta “version 6p5” ó “version 7”, para las versiones “Matlab 6.5” ó “Matlab 7” respectivamente.
2. Copie el contenido de la carpeta en la dirección “C:\Matlab6p5\work” ó “C:\Matlab7\work”.
3. Antes de ejecutar los programas asegúrese que los archivos .mat correspondientes a la simulación de las fallas estén en la dirección “C:\Matlab6p5\work\DATOS FALLAS” ó “C:\Matlab7\work\DATOS FALLAS”. Los archivos deben tener la siguiente nomenclatura: 'Falla01_B01_RF01.mat', donde Falla01 hace referencia al tipo de falla, B01 al número de la barra donde ocurre la falla, y R01 corresponde al número de la resistencia de falla.
4. Ejecute los programas “caracterizacionZ1.m”, “caracterizacionZ2.m” y “caracterizacionZ3.m”, para caracterizar el sistema y crear las matrices de los descriptores. Este procedimiento se realiza una sola vez.
5. Abra el programa “localizacion.m”, diríjase a la línea 4 e indique el nombre de la falla que desea localizar:

```
fil=['Falla02_B09_RF03.mat'];
```

6. Ejecute el programa para obtener la localización de la falla. Los resultados arrojados son en su orden:
 - Tipo de falla
 - Tabla por zona con los valores de distancia y resistencia obtenidos con cada algoritmo, su desviación y promedio.
 - Distancia, resistencia de falla y zona, definitivas.
7. Repita desde el paso número 5 para localizar otras fallas.