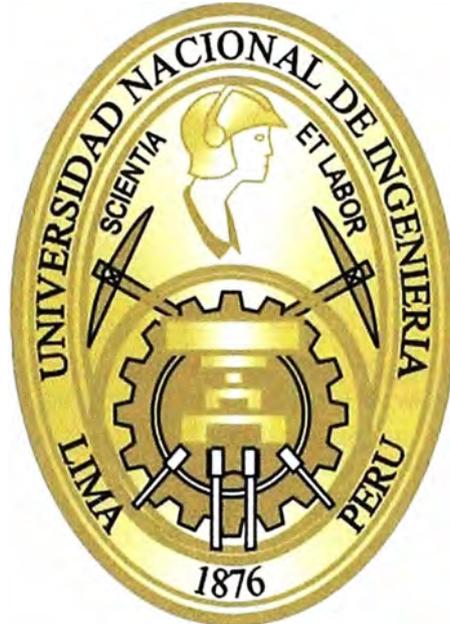


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS AÉREAS
MODELADAS CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

OSCAR FRANCISCO MARCOS CABRERA CHIRRE

**PROMOCIÓN
2010 - I**

**LIMA – PERÚ
2014**

LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS AÉREAS MODELADAS CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

Dedicado a mis padres y hermanos

SUMARIO

Los sistemas de transmisión eléctrica juegan un rol muy importante en los sistemas de energía eléctrica, siendo su función principal llevar energía eléctrica a todos los consumidores finales. Asimismo, el incremento de las líneas de transmisión eléctrica es un indicador y soporte de una economía nacional que está creciendo sólida y velozmente. Sin embargo las fallas eléctricas en las líneas de transmisión son inevitables, básicamente por el variado clima y las condiciones geográficas de nuestro país. Es por ello que la localización precisa y rápida del punto de falla en una línea de transmisión es vital en la restauración de la operación de un sistema de energía eléctrica.

El principal objetivo de este informe es exponer el algoritmo de localización de fallas usando el modelo de parámetros distribuidos en líneas aéreas, tomando en consideración el acoplamiento de impedancia mutua y la capacitancia de la línea.

Entre los más importantes conceptos que se dan a conocer en el presente informe están el modelamiento de líneas de transmisión con parámetros distribuidos, los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero para fallas en sistemas de transmisión y el uso de los archivos de registro oscilográficos en formato comtrade. El programa Digsilent Power Factory ha sido utilizado para generar casos de fallas bajo diversas condiciones de fallas como tipo de fallas, localización de falla y resistencia de falla. Luego el algoritmo es evaluado usando los registros simulados y los registros de fallas reales. Los resultados demostraron que el algoritmo expuesto da resultados de gran precisión (bajo error) tanto para fallas simuladas como para fallas reales.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I	
INFORMACION GENERAL	
1.1 Relator	2
1.2 Preparación del informe	2
1.3 Motivación.....	2
1.4 Principal logro	2
CAPITULO II	
M ATERIA DEL INFORME	
2.1 Modelamiento matemático	4
2.1.1 Esquema general	4
2.1.2 Aplicación del Modelo de Parámetros Distribuidos para Cálculos de Distanciade Falla	5
2.1.3 Modelo de parámetros distribuidos para el cálculo dedistancia de fallas en las redes de secuencias positiva y negativa.	8
2.2 Aplicación del Análisis Multi-resolución en la Sincronización de Registros Oscilográficos	9
2.3 Aplicación del Modelo de Parámetros Distribuidos en el Cálculo de Resistencia de Falla	12
2.3.1 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla monofásica fase A.....	12
2.3.2 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla monofásica fase B.....	16
2.3.3 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla monofásica fase C.	19
2.3.4 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica fase B y C a tierra.	22
2.3.5 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica fase C y A a tierra.	24
2.3.6 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica fase B y A a tierra.	26
2.3.7 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica entre fases B y C	28

2.3.8	Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica entre fases C y A ...	29
2.3.9	Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica entre fases B y A ...	31
2.3.10	Calculo de la resistencia de falla para el caso de una falla trifásica.....	32
2.4	Literatura revisada.....	33
CAPITULO III		
DESARROLLO DEL PROGRAMA		
3.1	Desarrollo del programa.....	35
3.1.1	Implementación del programa.....	35
3.1.2	Proceso de entrada de datos: Rutina "Entrada.m".....	35
3.1.3	Proceso de sincronización de señales: Rutina "Sincronizacion.m".....	39
3.1.4	Proceso de filtrado: Rutina "Filtro.m".....	39
3.1.5	Proceso de Cálculo de la Distancia de Falla y Resistencia de Falla.....	40
CAPITULO IV		
RESULTADOS		
4.1	Resultados.....	45
4.1.1	Resultados en una falla simulada: Caso de una línea simple.....	46
4.1.2	Resultados en una falla simulada: Caso de una línea paralela.....	52
4.1.3	Impacto de la de-sincronización de señales en el error de calculo.....	58
4.1.4	Resultado en una falla real: Caso de una línea simple.....	58
4.1.5	Resultado en una falla real: Caso de una línea paralela.....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		65
ANEXO A		
LISTADO DE SIMBOLOS.....		67
ANEXO B		
ROTACION DE LA FASE "b" EN 120 GRADOS.....		69
ANEXO C		
ROTACIÓN DE LA FASE "C" EN 240 GRADOS.....		72
ANEXO D		
ELABORACIÓN DE ARCHIVOS COMTRADE PARA EL CASO DE ESTUDIO DE LÍNEA SIMPLE.....		75
ANEXO E		
ELABORACIÓN DE ARCHIVOS COMTRADE PARA EL CASO DE ESTUDIO DE LÍNEA PARALELA.....		79
BIBLIOGRAFÍA.....		84

INTRODUCCION

La localización de fallas en líneas de transmisión ha sido tema de gran estudio en los últimos años. Una localización robusta, precisa y confiable permite al operador de un sistema eléctrico restablecer la operación y eventuales pérdidas de suministros, así como mejorar el análisis post-operativo y es de gran valor en la gestión del activo línea de transmisión.

El programa de cálculo de distancia de falla expuesto en el presente informe se basa en el método propuesto inicialmente por Jamali y Jhons [1], el cual muestra entre otras bondades una alta precisión para configuraciones de líneas no transpuestas y no necesita información de impedancia thevenin de los extremos de la línea. Este método usa los valores de corriente y tensión en un instante de tiempo siendo dichos valores sincronizados, pues son valores simulados.

La intención del programa expuesto en el presente informe es ampliar la aplicación del método mencionado a todo el tiempo de duración de la falla. El programa tiene como datos de entrada los registros oscilográficos en formato comtrade [2]. Asimismo, en caso los registros oscilográficos estén de-sincronizados, el programa tiene la opción de sincronizar dichos registros como parte del cálculo.

El programa de cálculo de falla será desarrollado de la siguiente manera: En el punto 2.1.1 se presentará el esquema general, en el cual se dará a conocer el esquema básico a tener en cuenta en el desarrollo del modelo, luego en los puntos 2.1.1 y 2.1.3 se desarrollan los procesos de cálculo de distancia de falla y resistencia de falla. Finalmente, en el capítulo III el modelo será evaluado para los distintos casos de estudio.

CAPITULO I INFORMACION GENERAL

1.1 Relator

El presente informe fue redactado por mi persona. En este informe se expone y evalúa el programa de localización de fallas que desarrolle durante mi trabajo como Analista de Protecciones en Red de Energía del Perú.

1.2 Preparación del informe

El informe se preparó desde el mes de mayo del año 2013, siendo la duración de su preparación de 5 meses. Cabe señalar que el programa fue desarrollado por iniciativa propia y fue mejorado continuamente durante los 2 años de labores en Red de Energía del Perú como Analista de Protecciones.

1.3 Motivación

Mi principal motivación fue la necesidad de desarrollar un programa que permita aprovechar de la mejor forma la información disponible para calcular la distancia y resistencia de falla en líneas de transmisión aéreas (registros oscilográficos, inspección por fallas en la línea y disponibilidad del programa Matlab).

Cabe señalar que el algoritmo de localización de fallas usado en el presente informe ya existía y fue usado en el programa desarrollado. Se realizaron dos aportes importantes. El primer aporte es la sincronización automática de registros oscilográficos a través del análisis multi-resolución, desarrollado con el Toolbox Wavelet del programa Matlab. El segundo aporte es el cálculo de la resistencia de fallas mediante la aplicación del modelo de parámetros distribuidos en líneas de transmisión. Ambos aportes fueron evaluados a través de la aplicación del modelo en fallas simuladas y fallas reales.

1.4 Principal logro

Académicamente con el desarrollo del programa expuesto en el presente informe logré afianzar mis conocimientos en el manejo del programa Digsilent Power Factory y Matlab, así como lo relacionado al análisis de cortocircuitos en sistemas eléctricos. Por otro lado aprendí, mediante la investigación y estudios propios, la aplicación de la transformada wavelet en el análisis multi-resolución de señales, mediante el uso del Toolbox Wavelet de Matlab.

Laboralmente, el principal logro del programa de localización de fallas fue su

validación en fallas reales en líneas de transmisión. Este logro se dio mediante la comparación entre la distancia calculada y la distancia de falla real, la cual se obtenía a través de la inspección en la línea fallada.

Los buenos resultados del programa de localización de fallas contribuyeron en la mejora de la inspección y mantenimiento en las líneas de transmisión de REP durante mis labores como Analista de Protecciones.

CAPITULO II MATERIA DEL INFORME

2.1 Modelamiento matemático

A continuación se detalla la aplicación del modelo de parámetros distribuidos en el cálculo de distancia de falla y resistencia de falla, así como la aplicación del análisis multi-resolución en la sincronización de señales. Para esto se debe considerar a lo largo del presente capítulo el listado de símbolos del anexo A.

2.1.1 Esquema general

El modelo usado para la localización de fallas en dos terminales de la línea de transmisión es presentado en la figura 2.1:

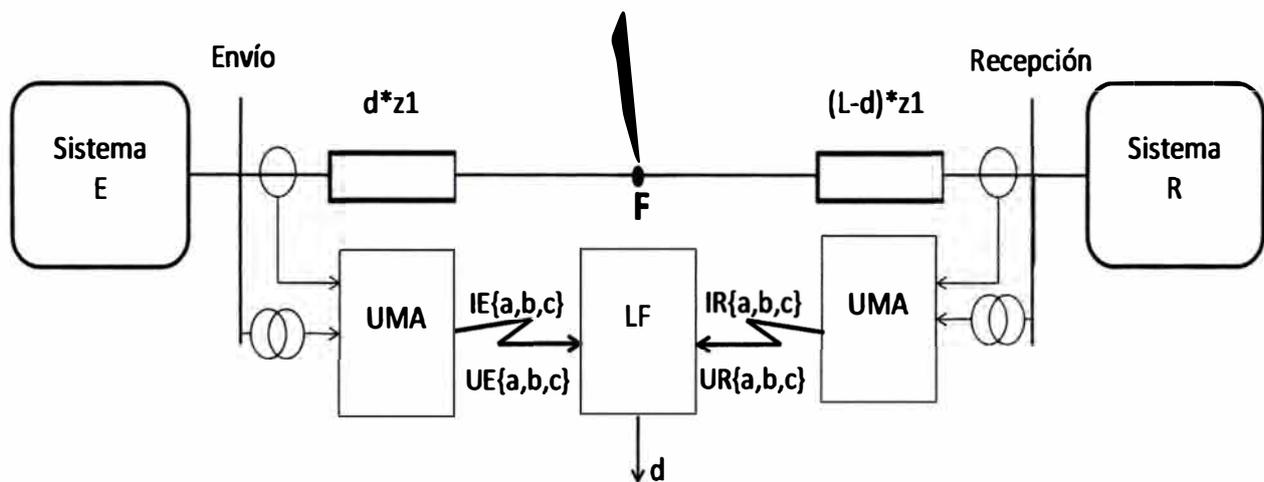


Figura 2.1 Diagrama esquemático del modelo de localización de fallas

Como se puede ver el localizador de fallas está relacionado con las señales de medición proporcionadas por el sistema de medición en ambos extremos: UMA y UMB. La función de registro de medición está dada por la función de registro de falla de los relés numéricos instalados en cada lado de la línea. Las mediciones son corrientes en las tres fases : $IE\{a,b,c\}$ e $IR\{a,b,c\}$, y tensiones $UE\{a,b,c\}$ y $UR\{a,b,c\}$.

Las señales analógicas son procesadas por el relé y convertidas en señales digitales (discretas) a fin de obtener las señales de fasores de corrientes $IE\{a,b,c\}$ y $IR\{a,b,c\}$, y tensiones $UE\{a,b,c\}$ y $UR\{a,b,c\}$ [3].

Las señales de medición son sincronizadas mediante el uso de GPS, y en caso falle se tendrán señales de medición de-sincronizadas. El programa presentado es diseñado para localizar fallas en líneas de transmisión transpuestas, por lo que el modelo de

componentes simétricas puede ser usado. El uso de las componentes simétricas durante una falla eléctrica es posible desde que la red puede ser descompuesta en redes de secuencia positiva, negativa y cero. Sin embargo el uso de la secuencia de secuencia cero no es ventajoso desde que en el cálculo para casos de líneas en paralelo se tiene que considerar la impedancia de secuencia cero de la línea y la impedancia de acoplamiento. El programa también realiza el cálculo de resistencia de falla, en el cual se utiliza necesariamente la tensión de secuencia cero para fallas desbalanceadas. El modelo de componentes simétricas utiliza los parámetros de impedancias y admitancias en secuencia positiva y cero en líneas de transmisión y se considerará que los parámetros de impedancias y admitancias no varían tanto en falla como en pre – falla

2.1.2 Aplicación del Modelo de Parámetros Distribuidos para Cálculos de Distancia de Falla

El modelo de parámetros distribuidos se realizará usando las ecuaciones de componentes simétricas de las corrientes y voltajes en ambos extremos de la línea durante una falla eléctrica. Debido a que en una falla eléctrica las corrientes y tensiones son por lo general desbalanceadas, las ecuaciones de parámetros distribuidos no pueden ser aplicadas directamente. Por dicho motivo se usará las redes de secuencias, las cuales no poseen acoplamiento mutuo entre ellas [4], asimismo por motivos prácticos se asume que la impedancia característica Z_{c1L} y la constante de propagación γ_1 es la misma tanto para las secuencias positivas y negativa. Los casos a analizar en el presente informe son la localización en líneas simples y líneas paralelas. En el caso de líneas simples, las redes a utilizar son la positiva y la negativa; sin embargo en el caso de líneas paralelas es necesario además modelar la red de secuencia cero.

a. Modelamiento de línea simple

Las redes de secuencia positiva, negativa, cero e incremental positiva se muestran en la figura 2.2. Aplicamos el modelo de parámetros distribuidos en las redes de secuencia positiva ($i=1$) y negativa ($i=2$), con el fin de calcular la tensión y corriente en el punto de falla (F) desde el extremo de envío (E) y de recepción (E):

$$U_{Fi} = \cosh(\gamma_i * d) * U_{Ei} - Z_{ci} * \sinh(\gamma_i * d) * I_{Ei} \quad (2.1)$$

$$I_{Fi} = Z_{ci}^{-1} * \sinh(\gamma_i * d) * U_{Ei} - \cosh(\gamma_i * d) * I_{Ei} \quad (2.2)$$

$$U_{Fi} = \cosh(\gamma_i * (L - d)) * U_{Ri} - Z_{ci} * \sinh(\gamma_i * (L - d)) * I_{Ri} \quad (2.3)$$

$$I_{Fi} = Z_{ci}^{-1} * \sinh(\gamma_i * (L - d)) * U_{Ri} - \cosh(\gamma_i * (L - d)) * I_{Ri} \quad (2.4)$$

b. Modelamiento de líneas paralelas:

Tanto en el caso de línea simple y de línea paralela las redes de secuencia positiva, negativa e incremental positiva permanecen iguales debido a que no son afectadas por el aporte homopolar de la línea paralela, siendo entonces las ecuaciones del modelamiento

por parámetros distribuidos las mismas que el caso anterior.

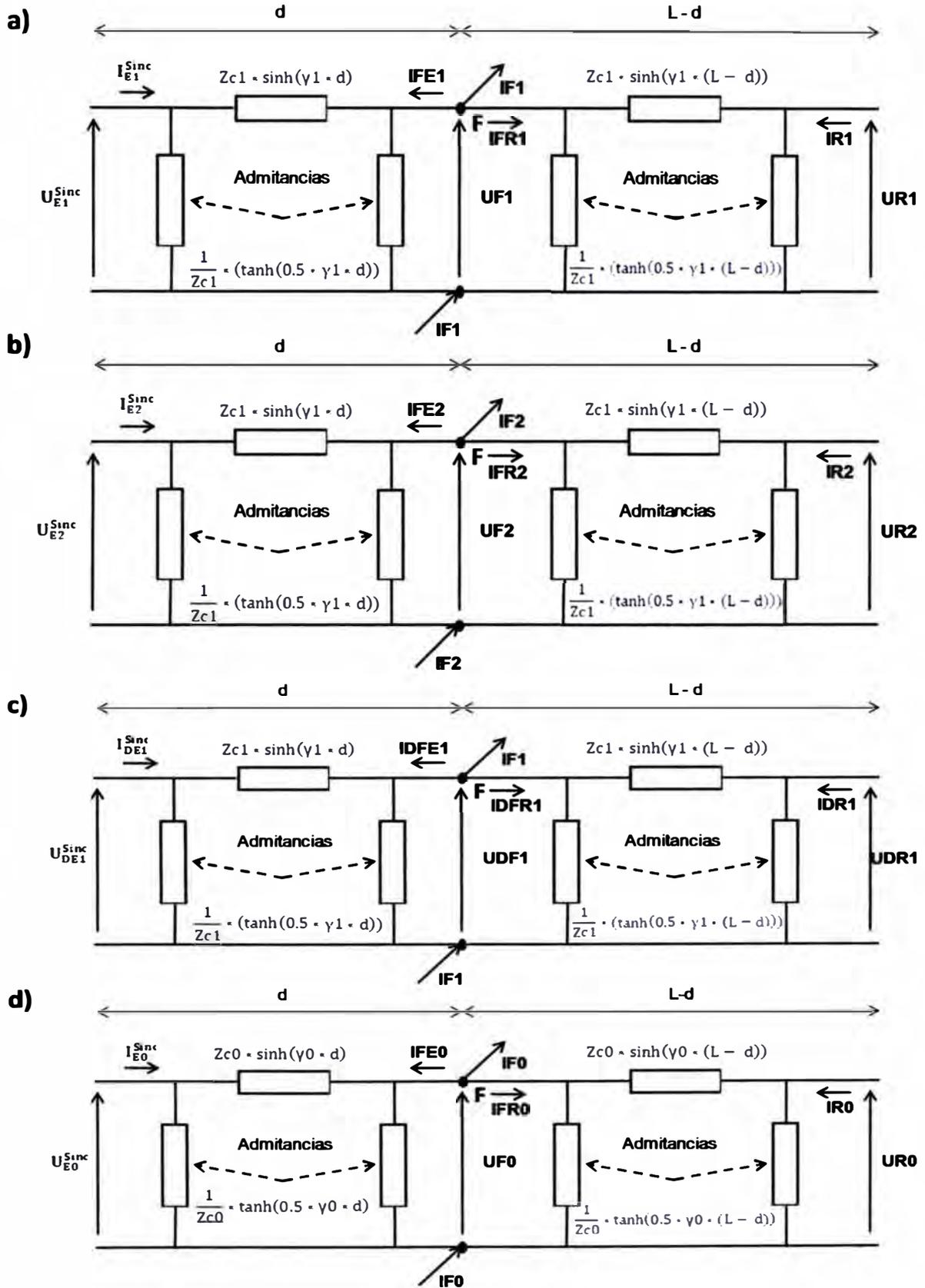


Figura 2.2 Circuitos equivalentes de una línea para: a) Secuencia positiva, b) Secuencia negativa c) Secuencia positiva incremental y d) Secuencia cero líneas simples.

Por otro lado la red de secuencia cero si es afectada por el aporte homopolar de la línea paralela. Aplicando el modelo de parámetros distribuidos a la red de secuencia cero se obtiene el siguiente modelo de red [5]:

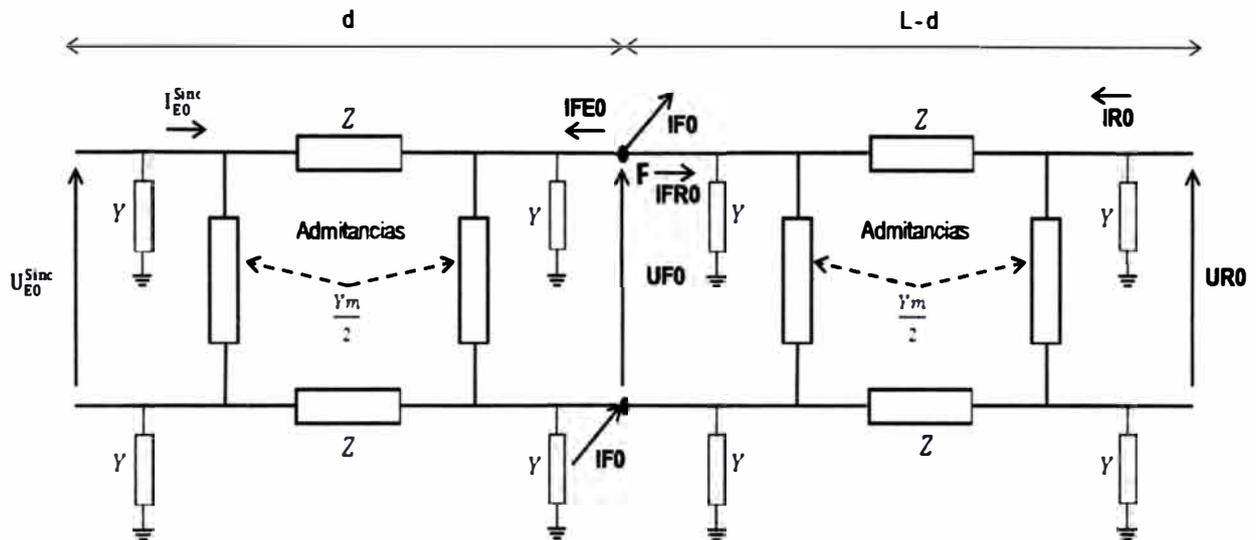


Figura 2.3 Circuito equivalente de la red de secuencia cero para el caso de una línea paralela.

La aplicación del modelo de parámetros distribuidos a la red de secuencia cero para el caso de líneas paralelas indica que las corrientes y tensiones de envío (E) y recepción (R) se vinculan según las siguientes formulas:

$$IE0 = \frac{UF0}{2} * \left(\frac{\sinh(\gamma m2 * d)}{Z_{cm2}} + \frac{\sinh(\gamma m1 * d)}{Z_{cm1}} \right) + \frac{U2F0}{2} * \left(\frac{\sinh(\gamma m2 * d)}{Z_{cm2}} - \frac{\sinh(\gamma m1 * d)}{Z_{cm1}} \right) + \frac{IF0}{2} * (\cosh(\gamma m2 * d) + \cosh(\gamma m1 * d)) + \frac{I2F0}{2} * (\cosh(\gamma m2 * d) - \cosh(\gamma m1 * d)) \quad (2.5)$$

$$UE0 = \frac{UF0}{2} * (\cosh(\gamma m2 * d) + \cosh(\gamma m1 * d)) + \frac{U2F0}{2} * (\cosh(\gamma m2 * d) - \cosh(\gamma m1 * d)) + \frac{IF0}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma m2 * d) + Z_{cm1} * \sinh(\gamma m1 * d)) + \frac{I2F0}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma m2 * d) - Z_{cm1} * \sinh(\gamma m1 * d)) \quad (2.6)$$

Siendo:

$$Z = \frac{1}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma m2 * d) + Z_{cm1} * \sinh(\gamma m1 * d))$$

$$Z_m = \frac{1}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma m2 * d) - Z_{cm1} * \sinh(\gamma m1 * d))$$

$$Z_{cm1} = \sqrt{\frac{z0 - z0m}{y0 + 2 * y0m}}$$

$$Z_{cm2} = \sqrt{\frac{z0 + z0m}{y0}}$$

$$Y = \frac{2 * \tanh(\gamma m2 * \frac{d}{2})}{Z_{cm2}}$$

$$\gamma_{m1} = \sqrt{(z_0 - z_{0m}) * (y_0 + 2 * y_{0m})}$$

$$\gamma_{m2} = \sqrt{(z_0 + z_{0m}) * y_0}$$

$$Y_m = \frac{\tanh\left(\gamma_{m1} * \frac{d}{2}\right)}{Z_{cm1}} - \frac{\tanh\left(\gamma_{m2} * \frac{d}{2}\right)}{Z_{cm2}}$$

2.1.3 Modelo de parámetros distribuidos para el cálculo de distancia de fallas en las redes de secuencias positiva y negativa.

Sea una falla eléctrica en una línea:

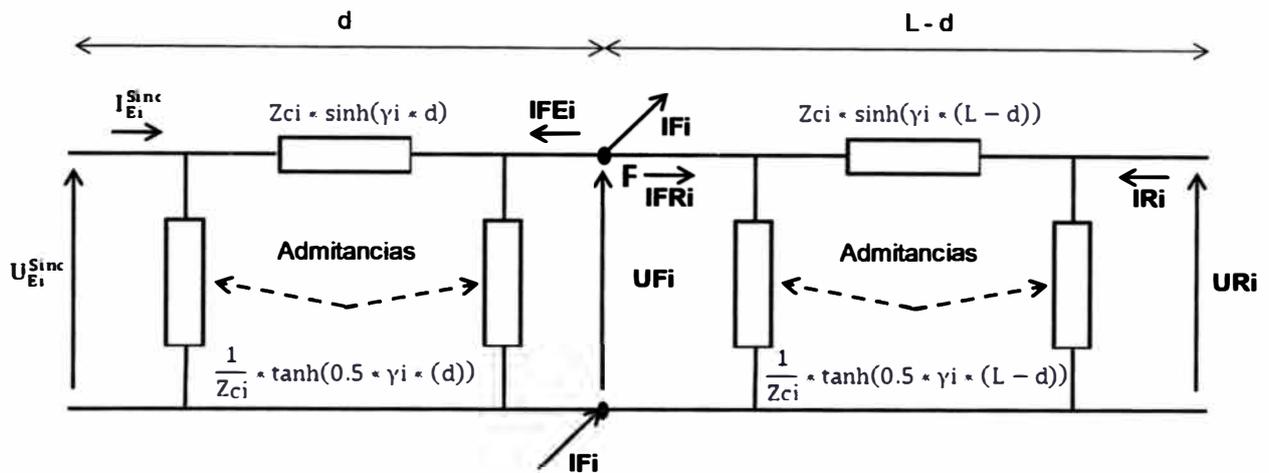


Figura 2.4 Representación unifilar de una línea de transmisión en alta tensión: i=1 secuencia positiva, i=2 secuencia negativa

Según lo expuesto en el punto 2.1.2, se puede calcular la tensión en el punto de falla usando las ecuaciones de parámetros distribuidos de la línea en sus respectivas redes de secuencia, tanto desde el extremo de envío (E) y del extremo de recepción (R). Como la tensión en el punto de falla es única, se pueden igualar las ecuaciones (2.1) y (2.3). De esta forma se puede hallar la distancia "d" desde el extremo de envío (E) hacia el punto de falla (F). [1, 6].

$$d = \frac{1}{\gamma_i * L} * \operatorname{atanh}\left(\frac{U_{Ei} - U_{Ri} * \cosh(\gamma_i * L) + Z_{ci} * I_{Ri} * \sinh(\gamma_i * L)}{Z_{ci} * I_{Ei} - U_{Ri} * \sinh(\gamma_i * L) + Z_{ci} * I_{Ri} * \cosh(\gamma_i * L)}\right) \quad (2.7)$$

Entonces el cálculo de distancia de falla se puede realizar conociendo los fasores de corriente y tensión de falla en ambos lados de una línea y sus parámetros. Este cálculo se realizara tanto para la secuencia positiva y negativa en fallas desbalanceadas. En el caso específico de una falla trifásica balanceada se usara las redes de secuencia positiva e incremental positiva. [1,6, 7].

$$d_1 = \frac{1}{\gamma_1 * L} * \operatorname{atanh}\left(\frac{U_{E1} - U_{R1} * \cosh(\gamma_1 * d) + Z_{c1} * I_{R1} * \sinh(\gamma_1 * d)}{Z_{c1} * I_{E1} - U_{R1} * \sinh(\gamma_1 * d) + Z_{c1} * I_{R1} * \cosh(\gamma_1 * d)}\right) \quad (2.8)$$

$$d_2 = \frac{1}{\gamma_1 * L} * \operatorname{atanh}\left(\frac{U_{E2} - U_{R2} * \cosh(\gamma_1 * d) + Z_{c1} * I_{R2} * \sinh(\gamma_1 * d)}{Z_{c2} * I_{E2} - U_{R2} * \sinh(\gamma_1 * d) + Z_{c1} * I_{R2} * \cosh(\gamma_1 * d)}\right) \quad (2.9)$$

$$dD = \frac{1}{\gamma_1 * L} * \operatorname{atanh} \left(\frac{UDE1 - UDR1 * \cosh(\gamma_1 * d) + Zc1 * IDR1 * \sinh(\gamma_1 * d)}{Zc1 * IDE1 - UDR1 * \sinh(\gamma_1 * d) + Zc1 * IDR1 * \cosh(\gamma_1 * d)} \right) \quad (2.10)$$

2.2 Aplicación del Análisis Multi-resolución en la Sincronización de Registros Oscilográficos

La sincronización de los registros oscilográficos es muy importante en el cálculo de distancia de falla. Existen diversos métodos de sincronización, sin embargo son métodos usados para solo un instante de tiempo [6,8]. A fin de aprovechar todo el tiempo que dura el registro oscilográfico se ha implementado un proceso de sincronización automática de señales basados en el análisis multi-resolución.

El proceso de sincronización inicia aplicando la Transformada de Park a las señales de corriente de envío y de recepción, a fin de obtener sus respectivas señales alpha (ioc), beta (ib) y gamma (ir).

$$\begin{bmatrix} ioc_Envio \\ ib_Envio \\ ir_Envio \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} iL1_Envio \\ iL2_Envio \\ iL3_Envio \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} ioc_Rec \\ ib_Rec \\ ir_Rec \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} iL1_Rec \\ iL2_Rec \\ iL3_Rec \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Para fallas monofásicas o bifásicas a tierra, se aplicará la transformada discreta wavelet a la señal gamma de envío y recepción. Mientras que para fallas trifásicas y bifásicas entre fases se usaran las señales alpha y beta respectivamente [9,10,11].

La transformada wavelet discreta, está basada en el análisis multi-resolución [11,12,13]. El análisis multi-resolución aplicado a una señal discreta $x(n)$ usa las siguientes expresiones aplicadas a la señal $x(n)$:

$$A_{2^j}^d . x(n) = \sum_k h_k . A_{2^{j-1}}^d . x(n - 2^{j-1} . k) \quad (2.13)$$

$$D_{2^j}^d . x(n) = \sum_k g_k . A_{2^{j-1}}^d . x(n - 2^{j-1} . k) \quad (2.14)$$

Donde j y k son enteros, y representan el factor de escala y el factor de desplazamiento respectivamente; $A_{2^j}^d . x(n)$ es una aproximación discreta de la señal $x(n)$ en un nivel de resolución 2^j mientras que $D_{2^j}^d . x(n)$ es la señal discreta detallada

(transformada wavelet) a un nivel de resolución 2^j . Tanto h_k y g_k son los coeficiente que dependen que tipo de la familia de transformada wavelet elegida [11]. En la figura 2.5 se ilustra la descomposición de una señal en tres niveles usando la TWD.

El análisis multi-resolución se usa para dividir una señal en sus diferentes componentes de frecuencias, con ello se puede estudiar cada componente con mayor precisión. Al descomponer la señal original en señales de alta y baja frecuencia se originan dos señales en cada banda de frecuencia o nivel. En las bandas de alta frecuencia se producirán señales con pobre resolución en el dominio del tiempo mientras que en las bandas de baja frecuencia se darán señales de alta resolución en el dominio del tiempo.

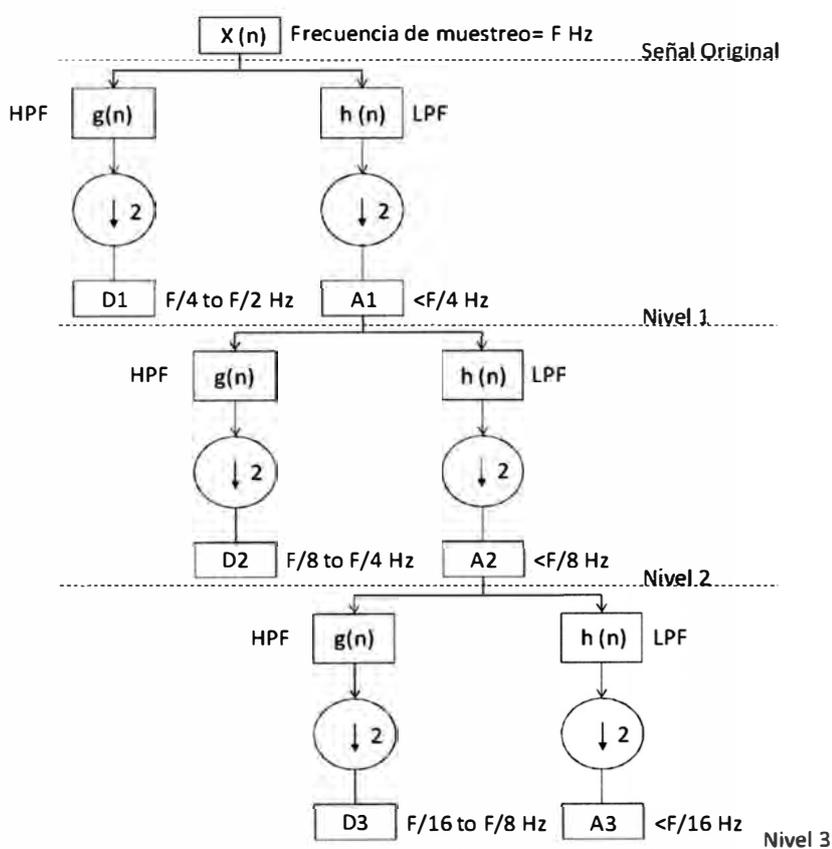


Figura 2.5 Diagrama esquemático del análisis multi-resolución.

Donde:

- $(\downarrow 2)$ = Muestreo de data dividido por 2.
- LPF = Filtro pasa bajas.
- HPF: Filtro pasa altas.
- A= Señal de aproximación.
- D= Señal detalle.

Para la sincronización de señales se usaran las señales detalle de los niveles más bajos pudiendo ser el nivel 1 o 2, y las familias wavelet biorthogonal o debichiev [10].

En un determinado nivel de resolución, la señal resultante de aplicar la

transformada de wavelet expondrá de manera exacta la discontinuidad debido a un transitorio. Usando esta propiedad se aplicará la transformada a las señales elegidas para detectar los puntos en los cuales empieza la falla exactamente tanto en envío y recepción.

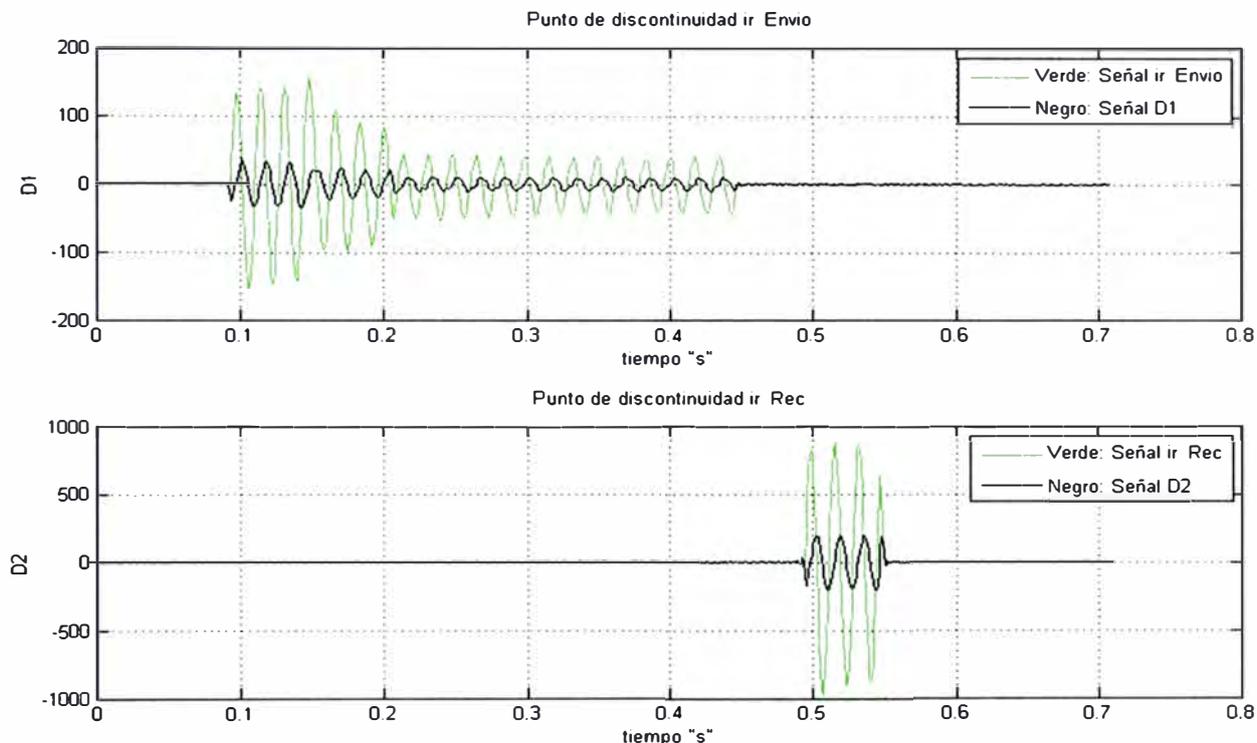


Figura 2.6Señales gamma y su señal detalle interpolada

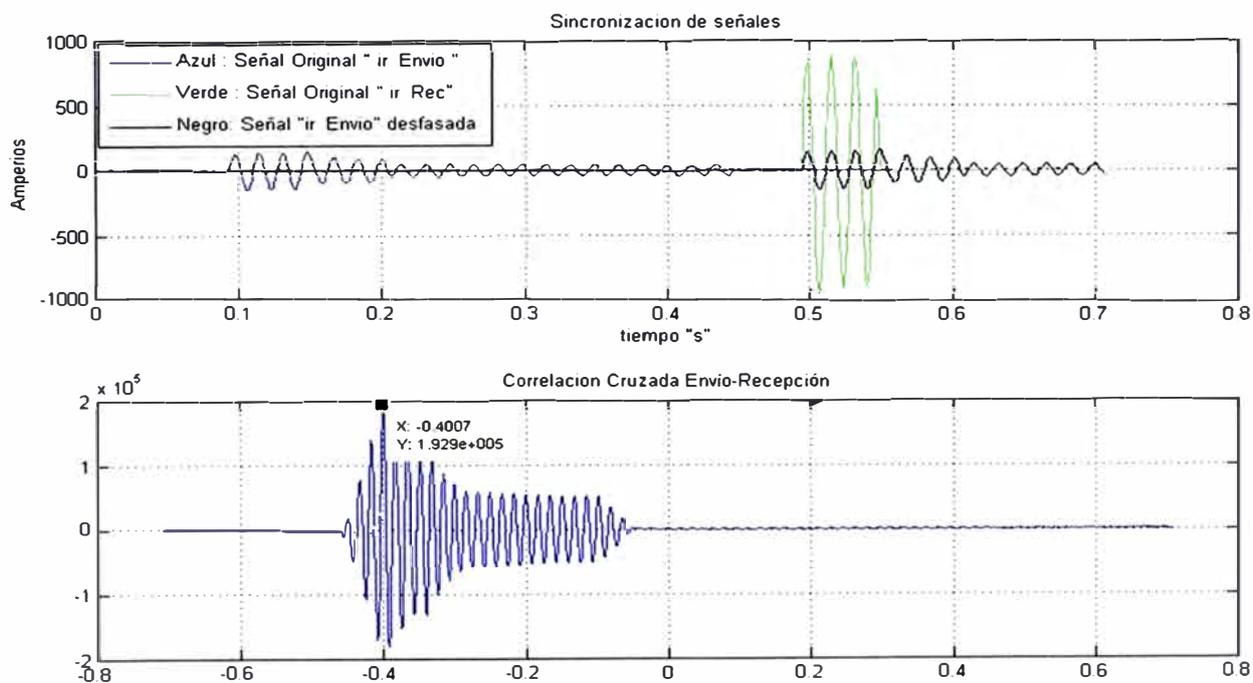


Figura 2.7Correlación Cruzada entre las señales de envío y recepción.

Una vez obtenida las señales “detalle” (figura 2.6) se procederá a calcular su función de correlación cruzada, siendo el tiempo de desfase entre el envío y recepción

el correspondiente al punto de máximo valor. La correlación cruzada es una forma de medir la similitud entre dos señales, la máxima similitud de las señales transformadas se dará cuando ambas tengan un cambio significativo.

$$t_{\text{desfasaje}} = t \parallel f_{\text{correlacion}}(t) = f_{\text{correlacion máxima}}$$

Como se puede ver la señal producto de la correlación cruzada entre el envío y recepción presenta su máximo en el punto $X = -0.4007$ e $Y = 192900$ (figura 2.7), siendo entonces el tiempo de desfase igual a -0.4007 segundos entre envío y recepción. De esta forma las señales de envío y recepción son sincronizadas.

2.3 Aplicación del Modelo de Parámetros Distribuidos en el Cálculo de Resistencia de Falla

El modelo de parámetros distribuidos será usado también en el cálculo de la resistencia de falla. A diferencia del cálculo de distancia de falla, en el cálculo de resistencia de falla es necesario usar las distintas redes de secuencia dispuestas según su respectiva configuración la cual varía dependiendo el tipo de falla y si la línea es simple o paralela [14].

2.3.1 Cálculo de la resistencia de falla para el caso de falla monofásica fase A.

Una falla monofásica se puede representar según la figura 2.8, en donde R_f es la impedancia de falla. Asimismo la configuración de las redes de secuencia para este tipo de falla se detalla en la figura 2.9.

Las redes de secuencia positiva y negativa no varían si la línea es simple o paralela. Sin embargo la red de secuencia cero sí varía de acuerdo a lo expuesto en el punto 2.1.2.

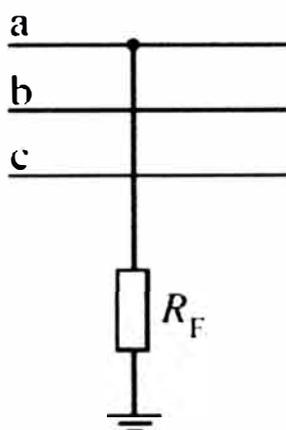


Figura 2.8 Falla monofásica fase "A"

Calculando la impedancia en la figura 2.9 tenemos que la impedancia de falla para el caso de una falla monofásica fase A (R_{fa}) es:

$$R_{fa} = \frac{VF1 + VF2 + VF0}{3 * IF1} \quad (2.15)$$

a. Caso: Falla monofásica fase A en líneas simples.

En la red de secuencia positiva de la figura 2.8 se calculará la tensión en el punto de falla **UF1** para una distancia de falla "d" desde el extremo de envío, mientras que la corriente de falla **IF** será la suma de la corriente de falla desde el extremo de envío **IFE1** y del extremo de recepción **IFR1**.

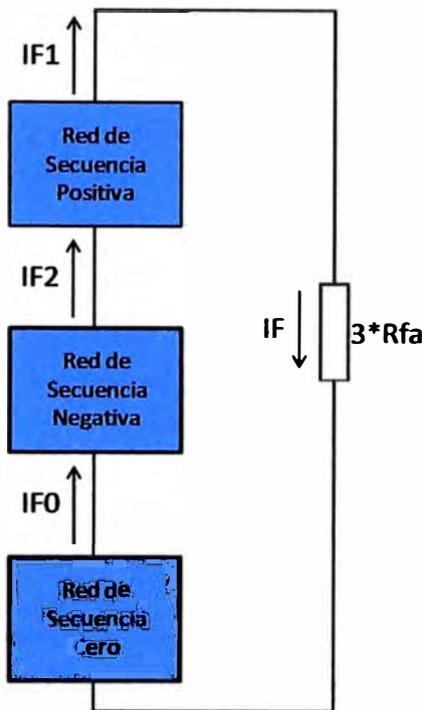


Figura 2.9 Conexión de redes de secuencia - falla monofásica fase "A"

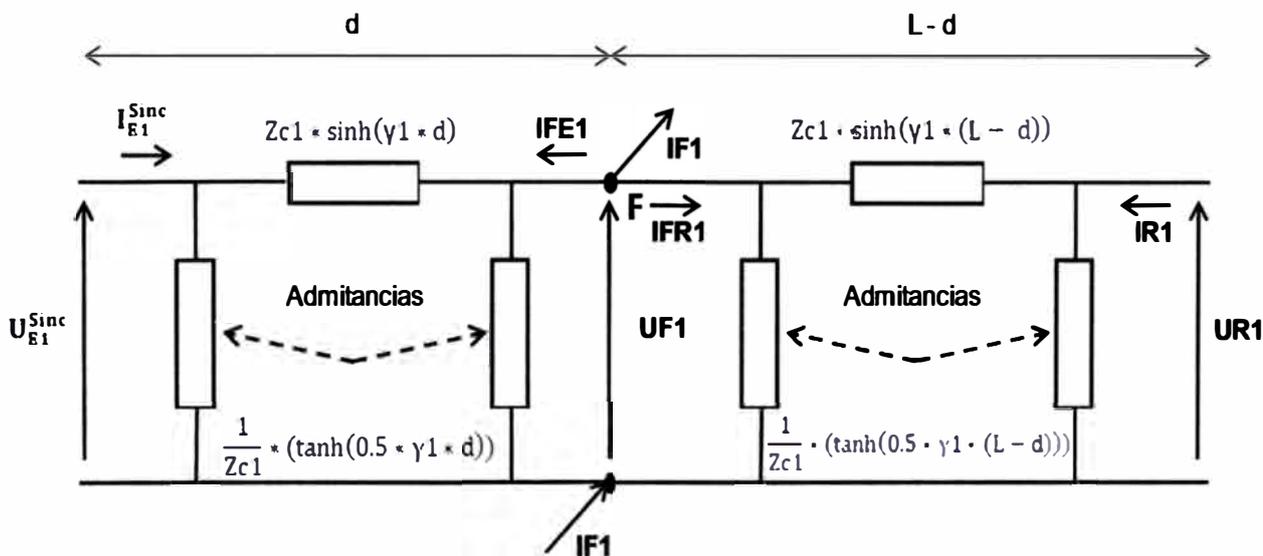


Figura 2.10 Red de secuencia positiva.

De la ecuación (2.1), se tiene que la tensión en el punto de falla **UF1** es:

$$U_{F1} = \cosh(\gamma_1 * d) * U_{E1} - Z_{c1} * \sinh(\gamma_1 * d) * I_{E1} \tag{2.16}$$

La corriente en el punto de falla **IF1** es la suma fasorial de las corriente **IFE1** y **IFR1**.

Entonces de las ecuaciones (2.2) y (2.4), se tiene:

$$IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR1) \quad (2.17)$$

Análogamente, en la red de secuencia negativa, se calculará la tensión en el punto de falla **UF2**:

$$UF2 = \cosh(\gamma1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE2 \quad (2.18)$$

La corriente en el punto de falla **IF2** es la suma fasorial de las corriente **IFE2** e **IFR2**.

Entonces de las ecuaciones (2.2) y (2.4), se tiene:

$$IF2 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma1 * d) * IE2 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR2 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR2) \quad (2.19)$$

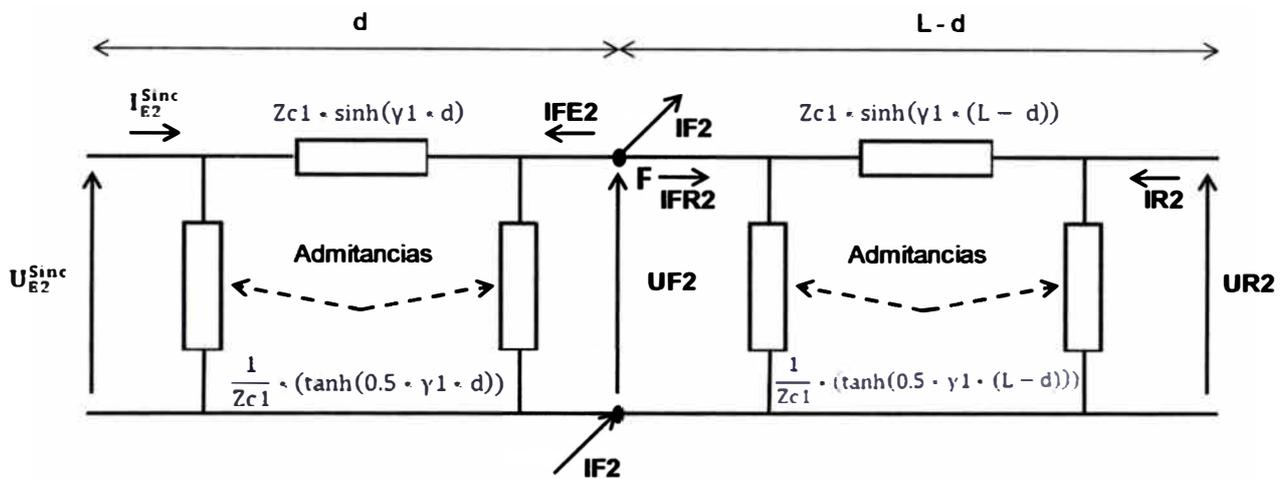


Figura 2.11 Red de secuencia negativa.

Cabe resaltar que por estar los circuitos en serie, la corriente **IF1** es igual a la **IF2**. Se usará la corriente de falla de secuencia positiva **IF1** en el punto de falla. La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero **UF0**, se calculará usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas simples (punto 2.1.2 - a). En la red de secuencia cero se tienen:

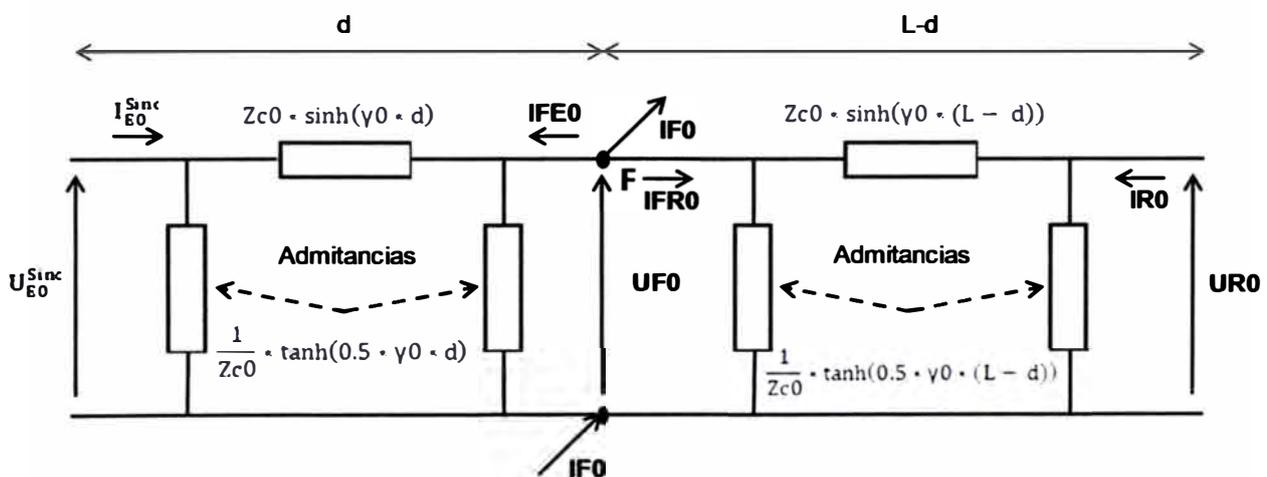


Figura 2.12 Red de secuencia cero

Según la figura 2.12 en la red de secuencia cero cumple:

$$UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * \tanh(0.5 * \gamma_0 * d) * \sinh(\gamma_0 * d)\right) * UE0 - Zc0 * \sinh(\gamma_0 * d) * IE0 \quad (2.20)$$

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16), (2.18), (2.20) y (2.17) en la ecuación (2.15) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fa} = \frac{UF1 + UF2 + UF0}{3 * IF1} \quad (2.21)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF2 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE2$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * \tanh(0.5 * \gamma_0 * d) * \sinh(\gamma_0 * d)\right) * UE0 - Zc0 * \sinh(\gamma_0 * d) * IE0$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$

b. Caso: Falla monofásica fase A en líneas paralelas.

Para los casos de línea simple y línea paralela el modelamiento de las redes de secuencia positiva y negativa son iguales, siendo la red de secuencia cero la única que varía. Por lo tanto las ecuaciones de la corriente $IF1$ y de las tensiones $UF1$ y $UF2$ siguen siendo válidas para este caso.

La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero $UF0$, se calculará usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas paralelas (punto 2.1.2 -b).

Para este caso la red de secuencia cero tiene la siguiente configuración:

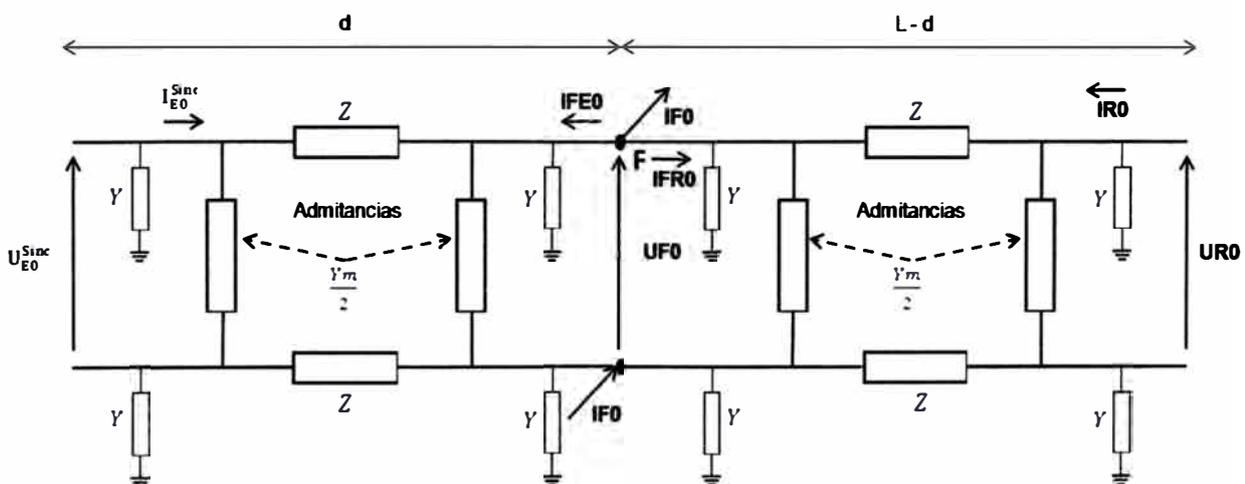


Figura 2.13 Red de secuencia cero

Según la figura 2.13 se tiene que en la red de secuencia cero se cumple:

$$UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * Y * Z\right) * UE0 - Z * IE0 \quad (2.22)$$

Siendo:

- $Y = \tanh\left(\gamma m_2 * \frac{1}{2} * d\right) * \frac{2}{Z_{cm2}}$
- $Z = \frac{1}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma m_2 * d) + Z_{cm1} * \sinh(\gamma m_1 * d))$

Reemplazando las ecuaciones(2.16), (2.18) ,

(2.22) y (2.17) en la ecuación (2.15) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fa} = \frac{UF1 + UF2 + UF0}{3 * IF1} \quad (2.23)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Z_{c1} * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF2 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE2 - Z_{c1} * \sinh(\gamma_1 * d) * IE2$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * Y * Z\right) * UE0 - Z * IE0$
- $IF1 = -1 * (Z_{c1}^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Z_{c1}^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$

2.3.2 Cálculo de la resistencia de falla para el caso de falla monofásica fase B.

En el cálculo de resistencia de falla para fallas monofásicas en la fase B (R_{fb}), se realizará la equivalencia en el cálculo hecho para fallas monofásicas en la fase A. Esto se consigue desfasando los fasores corriente y tensión fase B 120° en sentido horario hacia la posición de los fasores de referencia de corriente o tensión de la fase A' del sistema equivalente. Al realizar esto se tendrá que desfasar los fasores A y C en la misma dirección como se muestra en la figura 2.14. Matemáticamente esto se expresa así:

$$\begin{aligned} IA' &= a * IB \\ IB' &= a * IC \\ IC' &= a * IA \end{aligned} \quad (2.24)$$

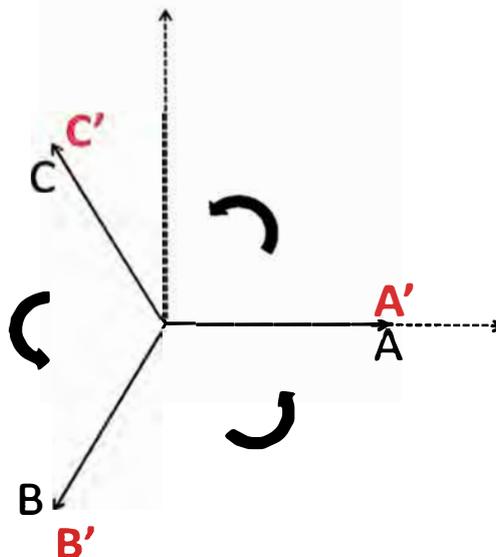


Figura 2.14 Traslado de la referencia - Caso falla monofásica fase B.

En el sistema inicial una falla monofásica fase B implica que en el punto de falla:

$$I_A = I_C = 0 \quad (2.25)$$

Entonces de las ecuaciones en se tiene que en el nuevo sistema:

$$I_{C'} = I_{B'} = 0 \quad (2.26)$$

Asimismo dado que los fasores de corriente y tensión fase B han sido trasladados a la nueva posición de referencia (fase A') se tiene que la resistencia de falla para el sistema equivalente es:

$$R_{fb} = R_{fA'} = \frac{U_{A'}}{3 * I_{A'}} \quad (2.27)$$

Como sabemos en el **punto de falla** del sistema equivalente se tiene que:

$$\begin{bmatrix} I_{A'} \\ I_{B'} \\ I_{C'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{F0'} \\ I_{F1'} \\ I_{F2'} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} U_{A'} \\ U_{B'} \\ U_{C'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_{F0'} \\ U_{F1'} \\ U_{F2'} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Entonces:

$$U_{A'} = U_{F0'} + U_{F1'} + U_{F2'} \quad (2.30)$$

$$I_{A'} = I_{F0'} + I_{F1'} + I_{F2'} \quad (2.31)$$

Asimismo en el punto de falla del sistema inicial se tiene que:

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_A = 0 \\ I_B \\ I_C = 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Entonces:

$$I_{A0} = I_{F0} = \frac{1}{3} * I_B \quad (2.33)$$

$$I_{A1} = I_{F1} = \frac{a}{3} * I_B \quad (2.34)$$

$$I_{A2} = I_{F2} = \frac{a^2}{3} * I_B \quad (2.35)$$

Por otro lado en el anexo Bse explica el desarrollo matemático del traslado de la fase B hacia la posición de la fase A' en el sistema equivalente. Como resultado tenemos que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son:

$$\begin{bmatrix} U_{F0'} \\ U_{F1'} \\ U_{F2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_{F0} \\ U_{F1} \\ U_{F2} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\begin{bmatrix} I_{F0'} \\ I_{F1'} \\ I_{F2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \\ I_{F2} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Reemplazando la ecuación (2.36) en la ecuación (2.30) para la tensión $U_{A'}$ tenemos:

$$UA' = a * UF0 + UF1 + a^2 * UF2 \quad (2.38)$$

Y reemplazando la ecuación (2.37) en la ecuación (2.31) para la corriente IA' tenemos:

$$IA' = a * IF0 + IF1 + a^2 * IF2 \quad (2.39)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.33), (2.34) y (2.35) en la ecuación (2.39) tendremos:

$$IA' = 3 * IF1 \quad (2.40)$$

A fin de hallar la resistencia de falla en fallas monofásicas fase "B" (R_{fb}) reemplazo las ecuaciones (2.38) y (2.40) en la ecuación (2.27):

$$R_{fb} = R_{fA'} = \frac{a * UF0 + UF1 + a^2 * UF2}{3 * IF1} \quad (2.41)$$

a. Caso: Falla monofásica fase B en línea simple.

Dado que solo se ha realizado una rotación en el sistema de referencia las ecuaciones de corrientes $IF1$ e $IF2$ y de las tensiones $UF1$ y $UF2$ siguen siendo válidas.

El modelamiento de la red de secuencia de secuencia cero es el único que varía dependiendo del caso de línea simple o línea paralela. Para el caso de línea simple, la red de secuencia cero está modelada en el (punto 2.1.2- a) según las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.20), y expuesta en la figura 2.2

Luego aplicando estas ecuaciones en la ecuación (2.41) tenemos:

$$R_{fb} = \frac{a * UF0 + UF1 + a^2 * UF2}{3 * IF1} \quad (2.42)$$

Siendo:

- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF1 = \cosh(\gamma1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE1$
- $UF2 = \cosh(\gamma1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE2$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * \tanh(0.5 * \gamma0 * d) * \sinh(\gamma0 * d)\right) * UE0 - Zc0 * \sinh(\gamma0 * d) * IE0$

b. Caso: Falla monofásica fase B en líneas paralelas.

Dado que solo se ha realizado una rotación en el sistema de referencia las ecuaciones de corrientes $IF1$ e $IF2$ y de las tensiones $UF1$ y $UF2$ siguen siendo válidas.

El modelamiento de la red de secuencia de secuencia cero es el único que varía dependiendo del caso de línea simple o línea paralela. Para el caso de línea paralela la red de secuencia cero está modelada en el (punto 2.1.2- b) según las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.22) y expuesta en la figura 2.3.

Luego aplicando estas ecuaciones en la ecuación (2.41) tenemos:

$$R_{fb} = \frac{a * UF0 + UF1 + a^2 * UF2}{3 * IF1} \quad (2.43)$$

Siendo:

- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF1 = \cosh(\gamma1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE1$
- $UF2 = \cosh(\gamma1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE2$
- $UF0 = (1 + 1/2 * Y * Z) * UE0 - Z * IE0$
- $Y = \tanh\left(\gamma m2 * \frac{1}{2} * d\right) * \frac{2}{Z_{cm2}}$
- $Z = \frac{1}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma m2 * d) + Z_{cm1} * \sinh(\gamma m1 * d))$

2.3.3 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla monofásica fase C.

Para el cálculo de resistencia de falla para fallas monofásicas en la fase C (R_{fc}), se realizará la equivalencia en el cálculo hecho para fallas monofásica en la fase A. Esto se consigue desfasando los fasores corriente y tensión fase C 120° en sentido anti horario o 240° en sentido horario hacia la posición de los fasores de referencia de corriente o tensión fase A' del sistema equivalente. Al realizar esto se tendrá que desfasar los fasores A y B en la misma dirección: Matemáticamente esto se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} IA' &= a^2 * IC \\ IB' &= a^2 * IA \\ IC' &= a^2 * IB \end{aligned} \quad (2.44)$$

En el sistema inicial una falla monofásica fase C implica que en el punto de falla se tenga:

$$IA = IB = 0 \quad (2.45)$$

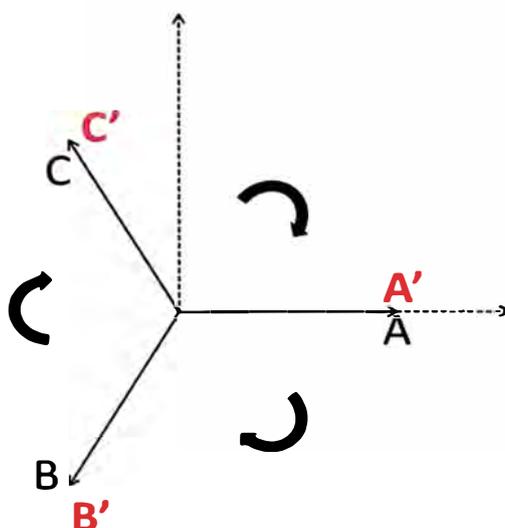


Figura 2.15 Traslado de la referencia – Caso falla monofásica fase C.

Entonces de las ecuaciones (2.45) y (2.44) se tiene que para el nuevo sistema:

$$IC' = IB' = 0 \quad (2.46)$$

Asimismo dado que los fasores de corriente y tensión fase C han sido trasladados a la nueva posición de referencia (fase A') se tiene que la resistencia de falla para el sistema equivalente es:

$$R_{fc} = R_{fA'} = \frac{UA'}{3 * IA'} \quad (2.47)$$

Como sabemos en el **punto de falla** del sistema equivalente se tiene que:

$$\begin{bmatrix} IA' \\ IB' \\ IC' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$\begin{bmatrix} UA' \\ UB' \\ UC' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UF0' \\ UF1' \\ UF2' \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Entonces:

$$UA' = UF0' + UF1' + UF2' \quad (2.50)$$

$$IA' = IF0' + IF1' + IF2' \quad (2.51)$$

Asimismo en el **punto de falla** del sistema inicial se tiene que:

$$\begin{bmatrix} IA0 \\ IA1 \\ IA2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA = 0 \\ IB = 0 \\ IC \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Entonces:

$$IA0 = IF0 = \frac{1}{3} * IC \quad (2.53)$$

$$IA1 = IF1 = \frac{a^2}{3} * IC \quad (2.54)$$

$$IA2 = IF2 = \frac{a}{3} * IC \quad (2.55)$$

Por otro lado en el anexo C se explica el desarrollo matemático del traslado de la fase C hacia la posición de la fase A' en el sistema equivalente. Como resultado tenemos que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son:

$$\begin{bmatrix} UF0' \\ UF1' \\ UF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UF0 \\ UF1 \\ UF2 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Reemplazando la ecuación (2.56) en la ecuación (2.50) para la tensión UA' tenemos:

$$UA' = a^2 * UF0 + UF1 + a * UF2 \quad (2.58)$$

Reemplazando la ecuación (2.57) en la ecuación (2.51) tenemos:

$$IA' = a^2 * IF0 + IF1 + a * IF2 \quad (2.59)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.53), (2.54) y (2.55) en la ecuación (2.59):

$$IA' = 3 * IF1 \quad (2.60)$$

A fin de hallar la resistencia de falla en fallas monofásicas fase "C" (Rfc) reemplazo las ecuaciones (2.58) y (2.60) en la ecuación (2.47):

$$R_{fc} = R_{fA'} = \frac{a^2 * UF0 + UF1 + a * UF2}{3 * IF1} \quad (2.61)$$

a. Caso: Falla monofásica fase C en línea simple.

Dado que solo se ha realizado una rotación en el sistema de referencia las ecuaciones de corrientes **IF1** e **IF2** y de las tensiones **UF1** y **UF2** siguen siendo válidas. El modelamiento de la red de secuencia de secuencia cero es el único que varía dependiendo del caso de línea simple o línea paralela. Para el caso de línea simple la red de secuencia cero está modelada en el (punto 2.1.2- a) según las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.20), y expuesta en la figura 2.2 Luego aplicando estas ecuaciones en la ecuación (2.61) tenemos:

$$R_{fc} = R_{fA'} = \frac{a^2 * UF0 + UF1 + a * UF2}{3 * IF1} \quad (2.62)$$

Siendo

- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF1 = \cosh(\gamma1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE1$
- $UF2 = \cosh(\gamma1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE2$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * \tanh(0.5 * \gamma0 * d) * \sinh(\gamma0 * d)\right) * UE0 - Zc0 * \sinh(\gamma0 * d) * IE0$

b. Caso: Falla monofásica fase C en líneas paralelas.

Dado que solo se ha realizado una rotación en el sistema de referencia las ecuaciones de corrientes **IF1** e **IF2** y de las tensiones **UF1** y **UF2** siguen siendo válidas. El modelamiento de la red de secuencia de secuencia cero es el único que varía dependiendo del caso de línea simple o línea paralela. Para el caso de línea paralela la red de secuencia cero está modelada en el (punto 2.1.2- b) según las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.22) y expuesta en la figura 2.3. Luego aplicando estas ecuaciones en la ecuación (2.61) tenemos:

$$R_{fc} = R_{fA'} = \frac{a^2 * UF0 + UF1 + a * UF2}{3 * IF1} \quad (2.63)$$

Siendo

- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF1 = \cosh(\gamma1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE1$
- $UF2 = \cosh(\gamma1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma1 * d) * IE2$
- $UF0 = (1 + \frac{1}{2} * Y * Z) * UE0 - Z * IE0$
- $Y = \tanh(\gamma m2 * \frac{1}{2} * d) * \frac{2}{Zcm2}$
- $Z = \frac{1}{2} * (Zcm2 * \sinh(\gamma m2 * d) + Zcm1 * \sinh(\gamma m1 * d))$

2.3.4 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica fase B y C a tierra.

La configuración de las redes de secuencia positiva y negativa para este tipo de falla no varían si la línea es simple o paralela. Sin embargo la red de secuencia cero si varía de acuerdo a lo expuesto en el punto 2.1.2.

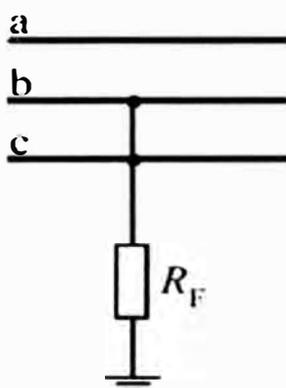


Figura 2.16Falla bifásica fases “B” y “C” a tierra

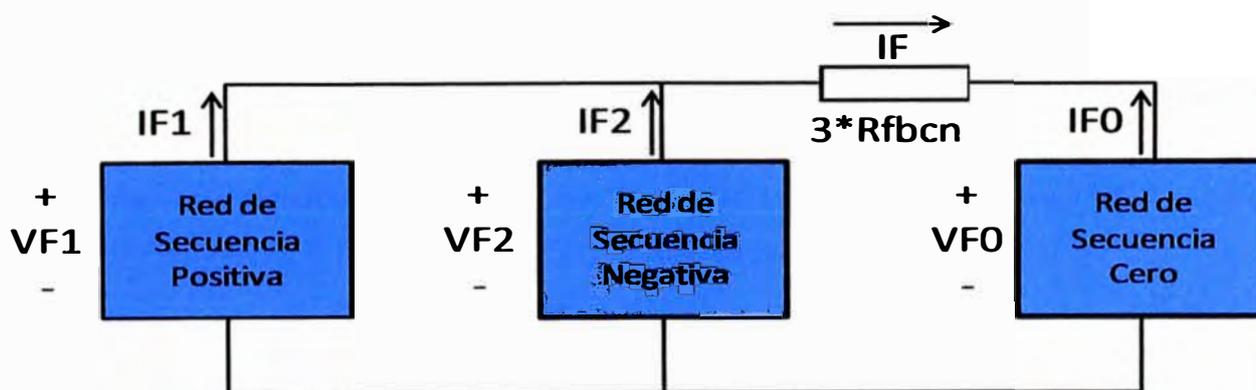


Figura 2.17Conexión de redes de secuencia –Caso falla bifásica “B” y “C” a tierra

Calculando la impedancia R_{fbcn} en la figura 2.17tenemos que la impedancia de falla para el caso de una falla bifásica fases “B” y “C” a tierra (R_{fbcn}) es:

$$R_{fbcn} = \frac{UF1 - UF0}{3 * (IF1 + IF2)} \quad (2.64)$$

a. Caso: Falla bifásica fases B y C a tierra en líneas simples.

Las ecuaciones desarrolladas para las tensiones de secuencia positiva **UF1**, negativa **UF2** y cero **UF0** así como las corrientes positiva **IF1** y negativa **IF2** se mantienen, debido a que lo único que ha cambiado es la disposición entre las secuencias por el tiempo de falla. La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero **UF0**, se calculó usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas simples según el punto 2.1.2 - a.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16), (2.19), (2.20) y (2.17) en la ecuación (2.15) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fbcn} = \frac{UF1 - UF0}{3 * (IF1 + IF2)} \quad (2.65)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * \tanh(0.5 * \gamma_0 * d) * \sinh(\gamma_0 * d)\right) * UE0 - Zc0 * \sinh(\gamma_0 * d) * IE0$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d))) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1$
- $IF2 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE2 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d))) * UR2 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR2$

b. Caso: Falla bifásica fases B y C a tierra en líneas paralelas.

En este caso se tiene que la red de secuencia cero es la única que varía, mientras que el modelamiento de las redes de secuencia positiva y negativa se mantienen invariables. Por lo tanto las ecuaciones de las corrientes **IF1**, **IF2** y de las tensiones **UF1** y **UF2** siguen siendo válidas para este caso.

La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero **UF0**, se calculó usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas paralelas según el punto 2.1.2 - b.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16), (2.19), (2.22) y (2.17) en la ecuación (2.15) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fbcn} = \frac{UF1 - UF0}{3 * (IF1 + IF2)} \quad (2.66)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * Y * Z\right) * UE0 - Z * IE0$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d))) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1$

- $$IF2 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma1 * d) * IE2 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma1 * (L - d)) * UR2 - \cosh(\gamma1 * (L - d)) * IR2)$$

2.3.5 Cálculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica fase C y A a tierra.

Para el cálculo de resistencia de falla para fallas bifásicas fases C y A a tierra (R_{fcan}), se realizará la equivalencia en el cálculo hecho para fallas bifásicas fases B y C a tierra. Esto se consigue trasladando los fasores corriente y tensión fase B 120° en sentido anti horario hacia la posición de los fasores de referencia de corriente o tensión de la fase A' del sistema equivalente. Al realizar esto se tendrá que desfazar los fasores A y C en la misma dirección como se muestra en la figura 2.18. Matemáticamente esto se expresa así:

$$\begin{aligned} IA' &= a * IB \\ IB' &= a * IC \\ IC' &= a * IA \end{aligned} \quad (2.67)$$

En el sistema inicial una falla bifásica fases C y A a tierra implica que en el punto de falla se tenga:

$$IB = 0 \quad (2.68)$$

Entonces reemplazando la ecuación (2.67) en la ecuación (2.68), se tiene que en el nuevo sistema:

$$IA' = 0 \quad (2.69)$$

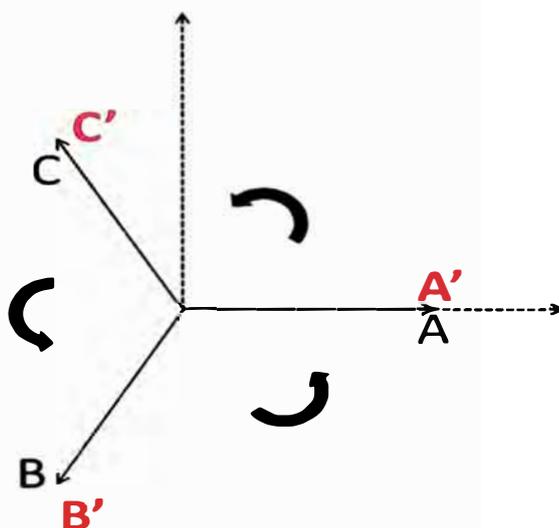


Figura 2.18 Traslado del fador B -Caso falla bifásica fases C y A a tierra.

Asimismo dado que los fasores de corriente y tensión fase B han sido trasladados a la nueva posición de referencia (fase A') se tiene que la resistencia de falla para el sistema equivalente es:

$$R_{fcan} = R_{fcbn'} = \frac{UF1' - UF0'}{3 * (IF1' + IF2')} \quad (2.70)$$

Por otro lado en el anexo B se explica el desarrollo matemático del traslado de la fase B hacia la posición de la fase A' en el sistema equivalente. Como resultado tenemos que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son:

$$\begin{bmatrix} UF0' \\ UF1' \\ UF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UF0 \\ UF1 \\ UF2 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

A fin de hallar la resistencia de falla en fallas bifásicas fase C y A a tierra (R_{fcan}) reemplazo las ecuaciones

(2.71) y

(2.72) en la ecuación

(2.70):

$$R_{fcan} = R_{fcbn}' = \frac{UF1 - a * UF0}{3 * (IF1 + a^2 * IF2)} \quad (2.73)$$

a. Caso: Falla bifásica fase C y A a tierra en línea simple.

Las ecuaciones desarrolladas para las tensiones de secuencia positiva $UF1$, negativa $UF2$ y cero $UF0$ así como las corrientes positiva $IF1$ y negativa $IF2$ se mantienen, debido a que lo único que ha cambiado es la disposición entre las secuencias por el tiempo de falla. La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero $UF0$, se calculó usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas simples según el punto 2.1.2 - a.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16),(2.19),(2.20) y (2.17) en la ecuación (2.73)

$$R_{fcan} = \frac{UF1 - a * UF0}{3 * (IF1 + a^2 * IF2)} \quad (2.74)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * \tanh(0.5 * \gamma_0 * d) * \sinh(\gamma_0 * d)\right) * UE0 - Zc0 * \sinh(\gamma_0 * d) * IE0$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $IF2 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE2 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR2 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR2)$

b. Caso: Falla bifásica fase C y A a tierra en línea paralela.

En este caso se tiene que la red de secuencia cero es la única que varía, mientras

que el modelamiento de las redes de secuencia positiva y negativa se mantienen invariables. Por lo tanto las ecuaciones de las corrientes **IF1**, **IF2** y de las tensiones **UF1** y **UF2** siguen siendo válidas para este caso. La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero **UF0**, se calculó usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas paralelas según el punto 2.1.2 - b.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16), (2.19), (2.22) y (2.17) en la ecuación (2.73) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fcan} = \frac{UF1 - a * UF0}{3 * (IF1 + a^2 * IF2)} \quad (2.75)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Z_{c1} * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF0 = \left(1 + \frac{1}{2} * Y * Z\right) * UE0 - Z * IE0$
- $IF1 = -1 * (Z_{c1}^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Z_{c1}^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $IF2 = -1 * (Z_{c1}^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE2 + Z_{c1}^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR2 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR2)$
- $Y = \tanh\left(\gamma_{m2} * \frac{1}{2} * d\right) * \frac{2}{Z_{cm2}}$
- $Z = \frac{1}{2} * (Z_{cm2} * \sinh(\gamma_{m2} * d) + Z_{cm1} * \sinh(\gamma_{m1} * d))$

2.3.6 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica fase B y A a tierra.

Para el cálculo de resistencia de falla para fallas bifásicas fases B y A a tierra (R_{fban}), se realizará la equivalencia en el cálculo hecho para fallas bifásicas fases B y C a tierra. Esto se consigue desfasando los fasores corriente y tensión fase C 120° en sentido horario o 240° en sentido anti horario hacia la posición de los fasores de referencia de corriente o tensión fase A' del sistema equivalente. Al realizar esto se tendrá que desfasar los fasores A y B en la misma dirección como se muestra en la figura 2.19. Matemáticamente esto se expresa así:

$$\begin{aligned} IA' &= a^2 * IC \\ IB' &= a^2 * IA \\ IC' &= a^2 * IB \end{aligned} \quad (2.76)$$

En el sistema inicial una falla bifásica fases B y A a tierra implica que en el punto de falla se tenga:

$$IC = 0 \quad (2.77)$$

Entonces reemplazando las ecuaciones (2.77) y (2.76) en la ecuación (2.76), se tiene que en el nuevo sistema:

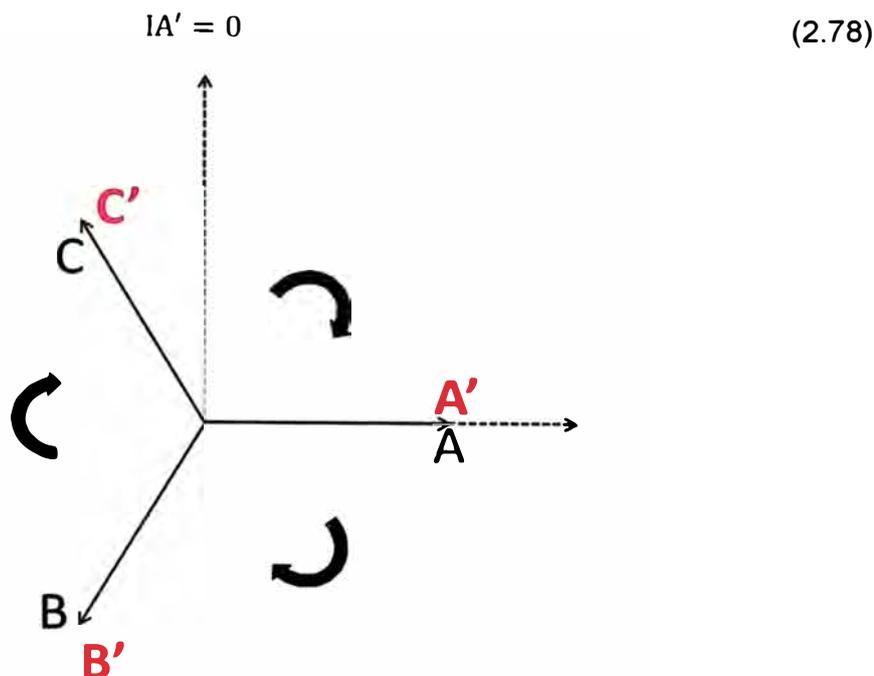


Figura 2.19 Traslado del fasor C - Caso de falla bifásica fases B y A a tierra.

Asimismo dado que los fasores de corriente y tensión fase B han sido trasladados a la nueva posición de referencia (fase A') se tiene que la resistencia de falla para el sistema equivalente es:

$$R_{fban} = R'_{fcbn} = \frac{UF1' - UF0'}{3 * (IF1' + IF2')} \quad (2.79)$$

Por otro lado en el anexo C se explica el desarrollo matemático del traslado de la fase C hacia la posición de la fase A' en el sistema equivalente. Como resultado tenemos que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son:

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

$$\begin{bmatrix} UF0' \\ UF1' \\ UF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UF0 \\ UF1 \\ UF2 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

A fin de hallar la resistencia de falla en fallas bifásicas fase B y A a tierra (R_{fban}) reemplazo las ecuaciones (2.80) y (2.81) en la ecuación (2.79).

$$R_{fban} = \frac{UF1 - a^{-1} * UF0}{3 * (IF1 + a * IF2)} \quad (2.82)$$

a. Caso: Falla bifásica fase B y A a tierra en línea simple.

Las ecuaciones desarrolladas para las tensiones de secuencia positiva $UF1$, negativa $UF2$ y cero $UF0$ así como las corrientes positiva $IF1$ y negativa $IF2$ se mantienen, debido a que lo único que ha cambiado es la disposición entre las secuencias

por el tiempo de falla. La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero **UF0**, se calculó usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas simples según el punto 2.1.2 - a.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16),(2.19),(2.20) y (2.17) en la ecuación (2.82).

$$R_{fban} = \frac{UF1 - a^{-1} * UF0}{3 * (IF1 + a * IF2)} \quad (2.83)$$

Siendo:

- $UVF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF0 = (1 + \frac{1}{2} * Y * Z) * UE0 - Z * IE0$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $IF2 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE2 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR2 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR2)$

b. Caso: Falla bifásica fase B y A a tierra en línea paralela.

En este caso se tiene que la red de secuencia cero es la única que varía, mientras que el modelamiento de las redes de secuencia positiva y negativa se mantienen invariables. Por lo tanto las ecuaciones de las corrientes **IF1**, **IF2** y de las tensiones **UF1** y **UF2** siguen siendo válidas para este caso. La tensión en el punto de falla en la red de secuencia cero **UF0**, se calculó usando el modelamiento de parámetros distribuidos para el caso de líneas paralelas según el punto 2.1.2 - b.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16),(2.19),(2.22) y (2.17) en la ecuación (2.82) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fban} = \frac{UF1 - a^{-1} * UF0}{3 * (IF1 + a * IF2)} \quad (2.84)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $UF0 = (1 + \frac{1}{2} * Y * Z) * UE0 - Z * IE0$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $IF2 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE2 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE2 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR2 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR2) Y = \tanh(\gamma_{m2} * \frac{1}{2} * d) * \frac{2}{Z_{cm2}}$

2.3.7 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica entre fases B y C

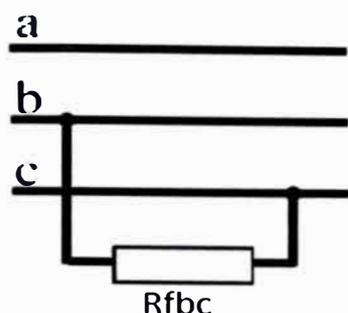


Figura 2.20 Falla bifásica entre fases “B” y “C”

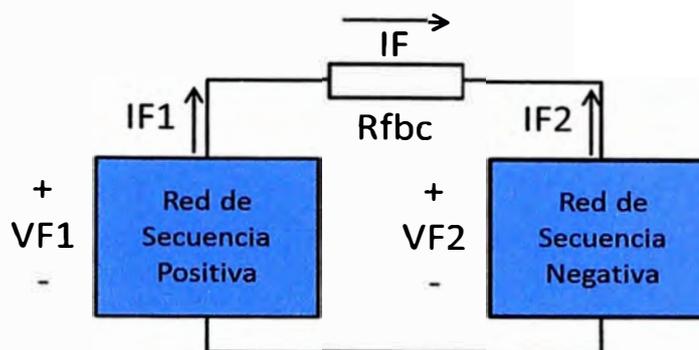


Figura 2.21 Conexión de redes de secuencia para una falla bifásica entre fases “B” y “C”.

Para este tipo de falla las únicas redes de secuencia que intervienen en el cálculo son las positiva y negativa, las cuales no varían si la línea es simple o paralela.

Calculando la impedancia en la figura 2.21 tenemos que la impedancia de falla para el caso de una falla bifásica entre fases B y C (R_{fbc}) es:

$$R_{fbc} = \frac{UF1 - UF2}{IF1} \quad (2.85)$$

Las ecuaciones desarrolladas para las tensiones de secuencia positiva $UF1$, negativa $UF2$ y cero $UF0$; así como las corrientes positiva $IF1$, negativa $IF2$ se mantienen, debido a que lo único que ha cambiado es la disposición entre las secuencias por el tiempo de falla.

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16), (2.18) y (2.17) en la ecuación (2.85) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{fbc} = \frac{UF1 - UF2}{IF1} \quad (2.86)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF2 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE2$

2.3.8 Cálculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica entre fases C y A

Para el cálculo de resistencia de falla para fallas bifásicas entre fases C y A (R_{fca}), se realizará la equivalencia en el cálculo hecho para fallas bifásicas entre fases B y C. Esto se consigue trasladando los fasores corriente y tensión fase B 120° en sentido anti horario hacia la posición de los fasores de referencia de corriente o tensión de la fase A' del sistema equivalente. Al realizar esto se tendrá que desfazar los fasores A y C en la

misma dirección:

Matemáticamente esto se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} IA' &= a * IB \\ IB' &= a * IC \\ IC' &= a * IA \end{aligned} \quad (2.87)$$

En el sistema inicial una falla bifásica entre fases C y A implica que en el punto de falla se tenga:

$$IB = 0 \quad (2.88)$$

Entonces reemplazando la ecuación (2.88) en la ecuación (2.87), se tiene que en el nuevo sistema:

$$IA' = 0 \quad (2.89)$$

Asimismo dado que los fasores de corriente y tensión fase B han sido trasladados a la nueva posición de referencia (fase A') se tiene que la resistencia de falla para el sistema equivalente es:

$$R_{fca} = R_{fbc}' = \frac{UF1' - UF2'}{IF1'} \quad (2.90)$$

Por otro lado en el anexo B se explica el desarrollo matemático del traslado de la fase B hacia la posición de la fase A' en el sistema equivalente. Como resultado tenemos que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son:

$$\begin{bmatrix} UF0' \\ UF1' \\ UF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UF0 \\ UF1 \\ UF2 \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

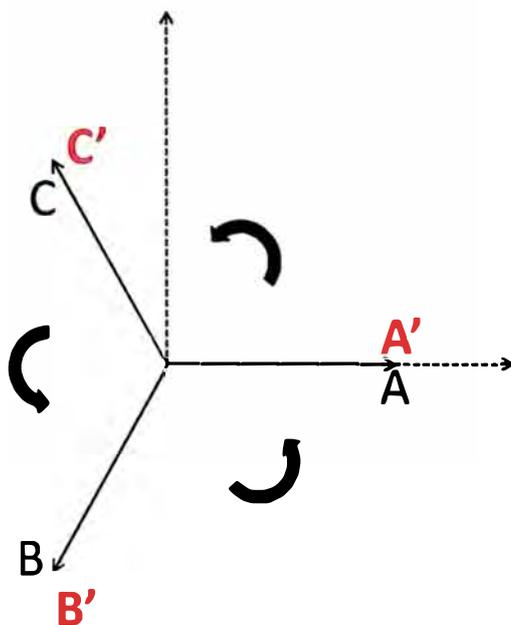


Figura 2.22 Traslado del fasor B - de falla bifásica fases C y A a tierra.

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (2.92)$$

A fin de hallar la resistencia de falla en fallas bifásicas entre fases C y A (R_{fca}) reemplazo las ecuaciones (2.91) y (2.92) en la ecuación (2.90):

$$R_{fca} = \frac{UF1 - a^2 * UF2}{IF1} \quad (2.93)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF2 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE2$

2.3.9 Calculo de la resistencia de falla para el caso de falla bifásica entre fases B y A

Para el cálculo de resistencia de falla para fallas bifásicas entre fases B y A (R_{fba}), se realizará la equivalencia en el cálculo hecho para fallas bifásicas entre fases B y C. Esto se consigue trasladando los fasores corriente y tensión fase C 120° en sentido horario hacia la posición de los fasores de referencia de corriente o tensión de la fase A' del sistema equivalente. Al realizar esto se tendrá que desfasar los fasores A y C en la misma dirección como se muestra en la figura 2.23. Matemáticamente esto se expresa así:

$$\begin{aligned} IA' &= a * IB \\ IB' &= a * IC \\ IC' &= a * IA \end{aligned} \quad (2.94)$$

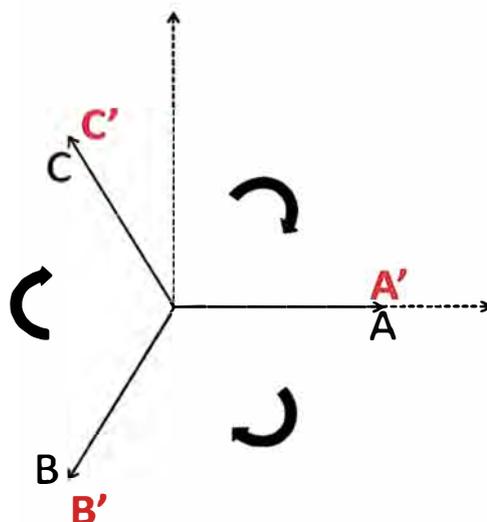


Figura 2.23 Traslado del fasor B - falla bifásica entre fases B y A

En el sistema inicial una falla bifásica entre fases C y A implica que en el punto de falla se tenga:

$$IB = 0. \quad (2.95)$$

Entonces para el nuevo sistema de las ecuaciones(2.94) y(2.95).

$$IA' = 0 \quad (2.96)$$

Asimismo dado que los fasores de corriente y tensión fase B han sido trasladados a la nueva posición de referencia (fase A') se tiene que la resistencia de falla para el sistema equivalente es:

$$R_{fba} = R_{fbc}' = \frac{UF1'-UF2'}{IF1'}. \quad (2.97)$$

Por otro lado en el anexo B se explica el desarrollo matemático del traslado de la fase B hacia la posición de la fase A' en el sistema equivalente. Como resultado tenemos que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son:

$$\begin{bmatrix} UF0' \\ UF1' \\ UF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UF0 \\ UF1 \\ UF2 \end{bmatrix} \quad (2.98)$$

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (2.99)$$

A fin de hallar la resistencia de falla en fallas bifásicas entre fases C y A (R_{fca}) reemplazo las ecuaciones

(2.98) y (2.99) en la ecuación (2.97):

$$R_{fba} = \frac{UF1 - a * UF2}{IF1} \quad (2.100)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$
- $UF2 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE2 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE2$

2.3.10 Calculo de la resistencia de falla para el caso de una falla trifásica.

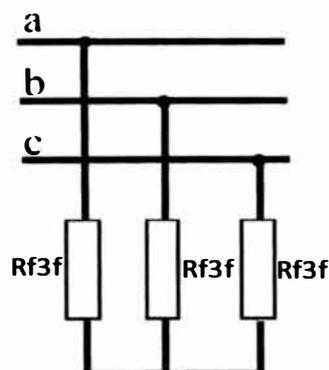


Figura 2.24 Falla trifásica

La configuración de las redes de secuencia para esta falla es:

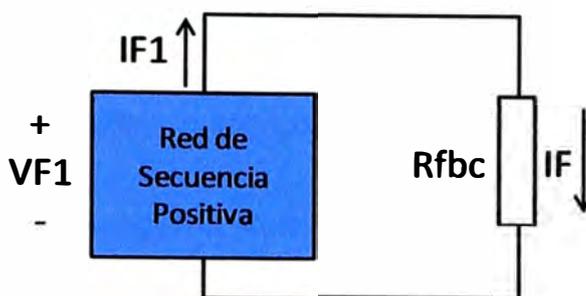


Figura 2.25 Conexión de redes de secuencia para una falla trifásica

Para este tipo de falla la única red de secuencia que interviene en el cálculo es la positiva, la cual no varía si la línea es simple o paralela. Calculando la impedancia en la figura 2.25 tenemos que la impedancia de falla para el caso de una falla bifásica entre fases B y C (R_{f3f}) es:

$$R_{f3f} = \frac{UF1}{IF1} \quad (2.101)$$

Las ecuaciones desarrolladas para la tensión de secuencia positiva $UF1$ y la corriente positiva $IF1$ se mantienen. Entonces reemplazando las ecuaciones (2.16) y (2.17) en la ecuación (2.101) tendremos que la resistencia de falla para esta configuración es:

$$R_{f3f} = \frac{F1}{IF1} \quad (2.102)$$

Siendo:

- $UF1 = \cosh(\gamma_1 * d) * UE1 - Zc1 * \sinh(\gamma_1 * d) * IE1$
- $IF1 = -1 * (Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * d) * UE1 - \cosh(\gamma_1 * d) * IE1 + Zc1^{-1} * \sinh(\gamma_1 * (L - d)) * UR1 - \cosh(\gamma_1 * (L - d)) * IR1)$

2.4 Literatura revisada

A fin de utilizar la más adecuada información posible se buscó distintas literaturas en donde se exponga el método de cálculo de distancia expuesto.

En [1] se expone por primera vez el método de cálculo de distancia de falla usado en este informe, en dicho artículo se expone la ecuación principal de cálculo y el uso de los componentes de modo aéreo (aerial mode) en la aplicación del método a sistemas trifásicos. Un punto a resaltar es que el método se realizó tanto para líneas simples y paralelas obteniendo un error máximo de 1.5%, asimismo se expone el uso de parámetros de líneas perfectamente transpuestas en líneas sin transposición lo cual produce un error de 1% a lo mucho.

En [6] se expone el método expuesto en [1], sin embargo en la aplicación del método a sistemas trifásicos se usó las redes de secuencia positiva, negativa e

incremental positiva [7] en vez de los componentes de modo aéreo (aerialmode). Asimismo se expone un método de sincronización de las señales de corriente y tensión para un instante de tiempo. En dicho artículo se tuvo un error de cálculo de distancia de falla máximo de 0.15%, sin embargo cabe resaltar que el análisis solo fue para casos simulados.

El método de sincronización de señales implementado en este informe no se encontró en ninguna literatura. Es por ello que lo expuesto en el punto 2.2 es un desarrollo propio de sincronización de señales mediante la aplicación del análisis multi-resolución.

La aplicación de la Transformada de Park a las señales de tensión y corriente como paso previo al análisis multi-resolución es expuesta en [9] y [10]. En [9] se expone la aplicación académica del análisis multi-resolución en encontrar patrones que distingan las fallas en líneas de operaciones de cierre y apertura de cargas y capacitores, mientras que en [10] la aplicación es para la detección de fallas de alta impedancia en líneas de extra alta tensión (EHV) con compensación serie. En ambos artículos los resultados de la aplicación del análisis multi-resolución son satisfactorios.

Por otro lado el enlace [12] expone claramente el uso del Toolbox Wavelet de Matlab en el análisis multi-resolución, siguiendo este procedimiento se programo la transformada wavelet discreta (DWT) en la rutina "sincronización.m" en lenguaje M [11].

Finalmente la aplicación del modelo de parámetros distribuidos en líneas de transmisión al cálculo de resistencia de falla no se encontró en ninguna literatura, en su defecto se desarrollo el método expuesto en el punto 2.3.

En [14] se expone claramente el modelo de redes de secuencias para las distintas fallas eléctricas, mientras que en [8] se expone las redes de secuencia usando el modelo de parámetros distribuidos en una línea de transmisión. Usando ambas fuentes se desarrollo el método de cálculo de falla implementado en el presente informe con resultados satisfactorios. Cabe resaltar que el caso de líneas paralelas exigía un modelamiento adicional en la red de secuencia cero, lo cual es expuesto de una manera muy didáctica en [5] y usado en el presente informe.

CAPITULO III DESARROLLO DEL PROGRAMA

3.1 Desarrollo del programa

En el presente capítulo se expondrá el desarrollo del programa.

3.1.1 Implementación del programa

El método propuesto es sintetizado en el programa "Localizador de Fallas" desarrollado en Matlab. El programa sigue la secuencia expuesta en la figura 3.2.

3.1.2 Proceso de entrada de datos: Rutina "Entrada.m"

El proceso de entrada de datos se desarrolló usando el lenguaje Matlab, este proceso toma como dato de entrada el formato de archivo estándar llamado COMTRADE, el cual es usado para el registro de señales análogas y digitales en sistemas eléctricos de potencia y está compuesto de un conjunto de archivos, que en conjunto contienen la información del evento registrado [2]. Los archivos tienen las siguientes extensiones:

- Archivo ".DAT", es el archivo data.
- Archivo ".CFG", es el archivo de configuración.
- Archivo ".HDR", es el archivo de encabezado (opcional).

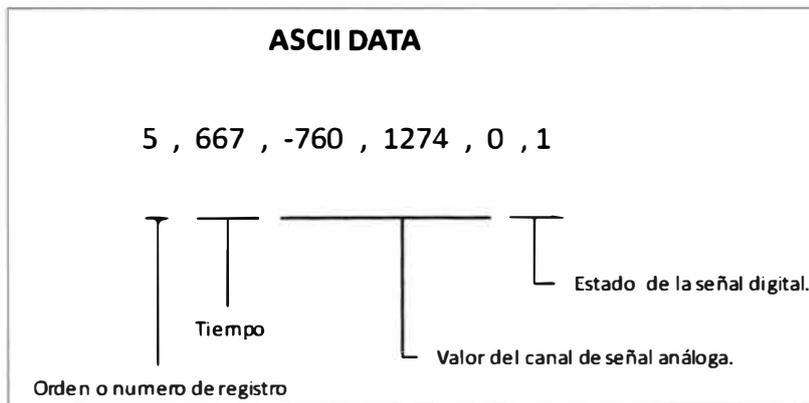


Figura 3.1 Archivo data en formato ASCII

El archivo data generalmente almacena información en formato ASCII, siendo el orden de la información para un determinado instante de registro el mostrado en la figura 3.1.

El archivo data (.DAT) contiene la información registrada según la frecuencia de muestreo del relé. La información es tanto información de señales análogas que por lo general son corrientes y tensiones, así como digitales que típicamente es el estado de las

diferentes funciones del relé. Las señales digitales tienen solo dos estados: activo (1) o inactivo (0).

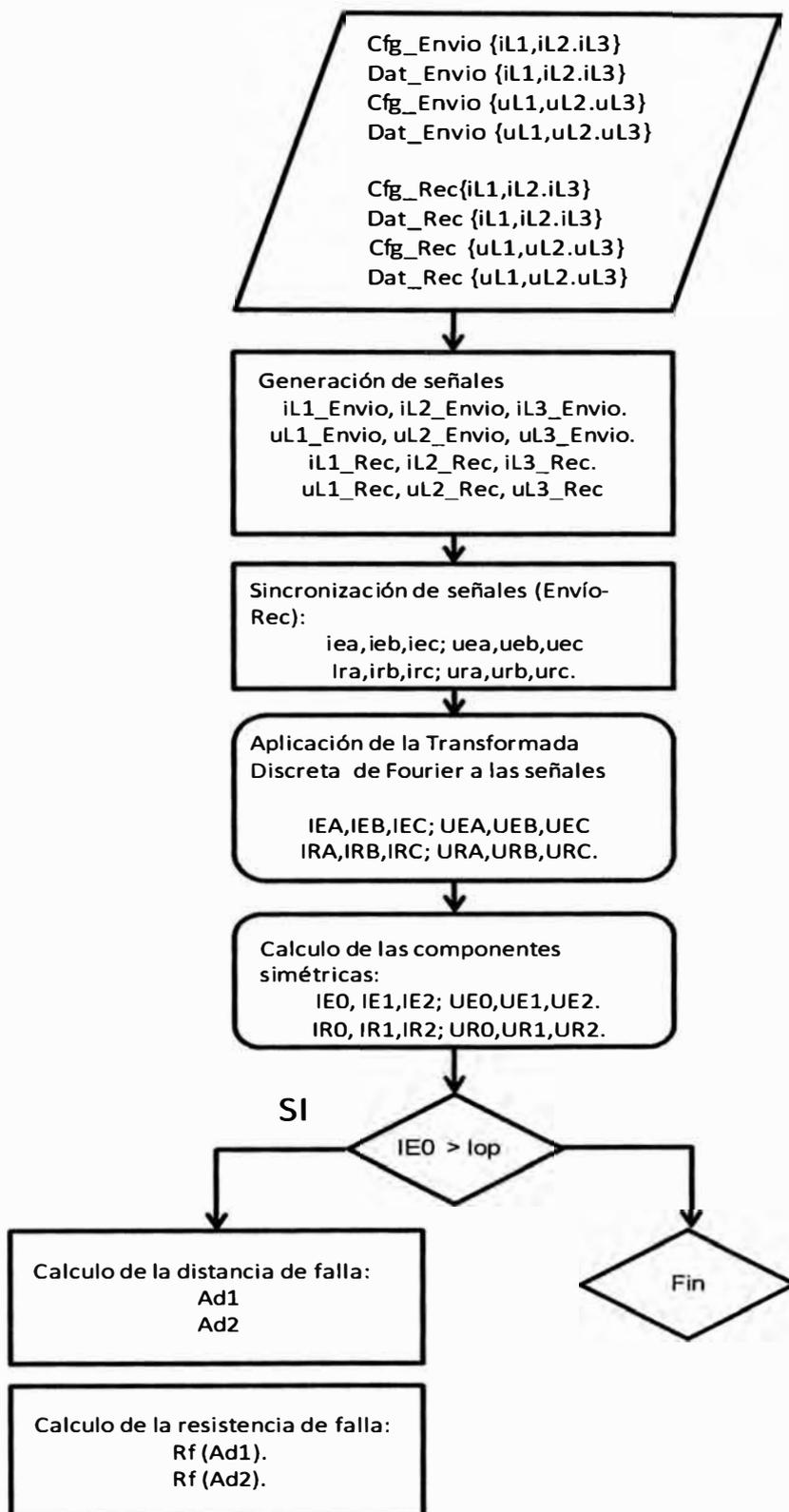


Figura 3.2 Diagrama de flujo del programa Localizador de Fallas

La estructura de un archivo data es una serie de filas y columnas, similares a un archivo Excel. Cada fila representa una muestra en un determinado instante de tiempo y su cantidad depende de la frecuencia de muestreo y la longitud del registro, mientras que

las columnas indican el tipo de señal según su orden.

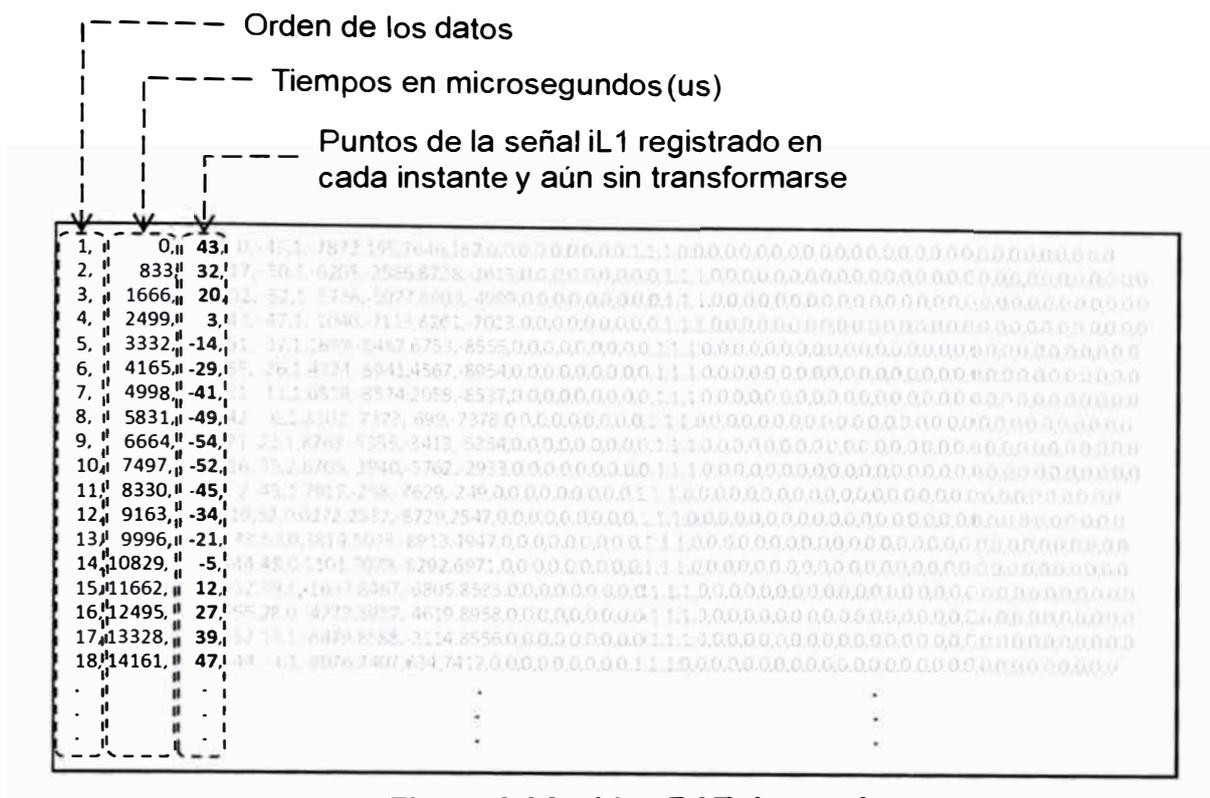


Figura 3.3 Archivo DAT de prueba

Un archivo de configuración típico se puede ver en la siguiente figura:

```

CONFIGURATION FILE

Sample data,1
2, 1 A , 1 D
1, Current, IA, L2, A, 0.0069061927, -28.28427, 0.0, 0.8191
1, Cycle Signal, 0
60
1
2.160000E+05, 7200
02/24/98, 08:15:22.000000
02/24/98, 08:15:22.100000
ASCII
  
```

Figura 3.4 Archivo data en formato ASCII

El archivo de configuración (.CFG), como lo menciona su nombre, configura los registros del archivo data. Este archivo está en formato ASCII y contiene la siguiente información:

- Nombre de la subestación y su identificación.
- Numero de los canales análogos.
- Numero de los canales digitales.
- Información para cada canal análogo en líneas separadas.
- Información para cada canal digital en líneas separadas.

- Frecuencia del sistema.
- Frecuencia de muestro y numero de muestras totales.
- Fecha y hora del primer registro.
- Fecha y hora del registro del relé.

El canal de datos análogos contiene información para formar las señales análogas. La información que contiene para cada señal análoga es:

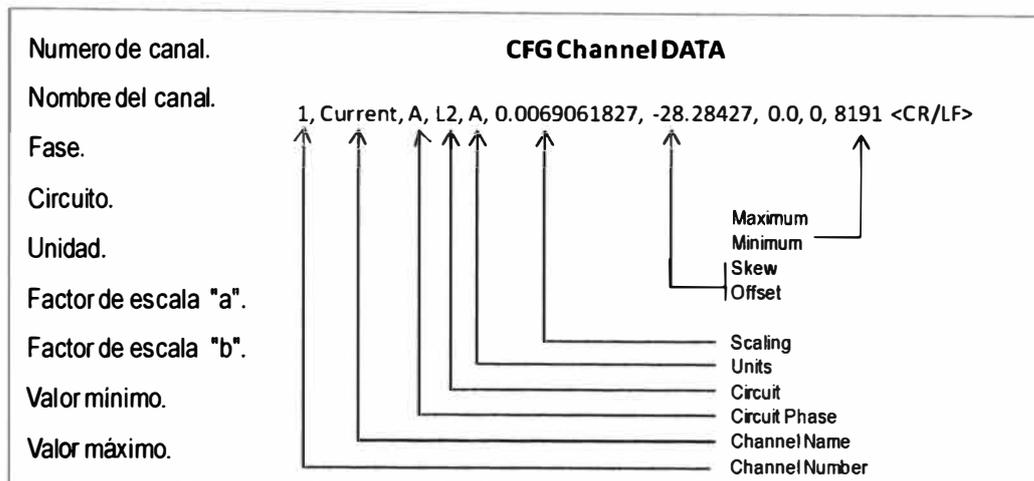


Figura 3.5 Información de una señal análoga en formato ASCII

Mientras que para un conjunto de señales:

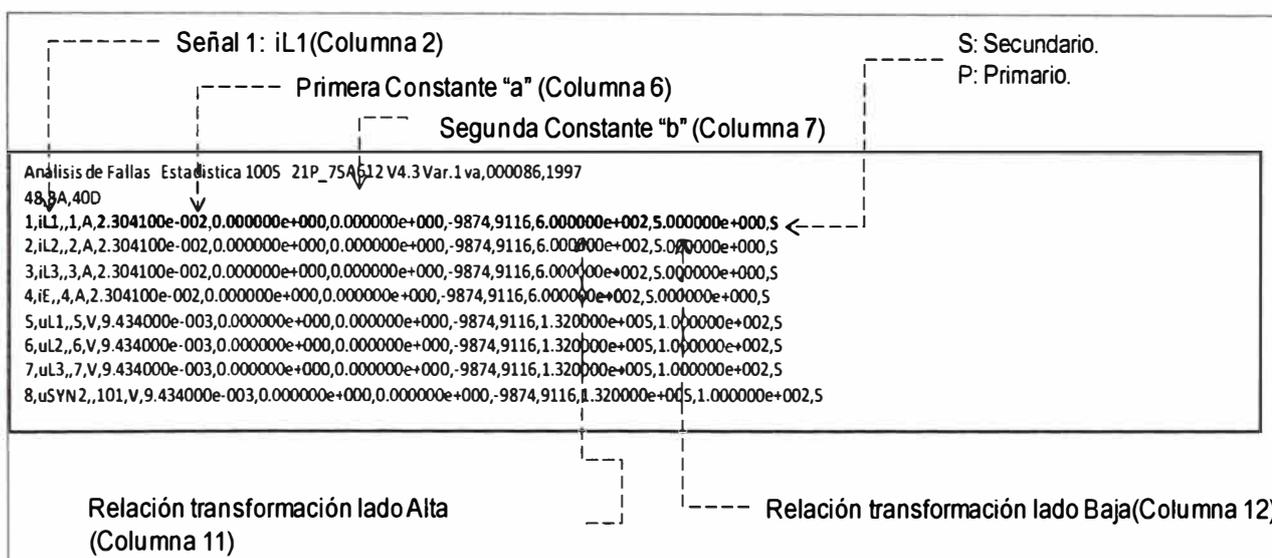


Figura 3.6 Archivo CFG de prueba

Aplicando los factores de escala "a" y "b", el punto "i – esimo" del archivo data correspondiente a la señal "current":

$$\text{current} = a * \text{current}(i) + b \quad (3.1)$$

Para construir las señales se usan los archivos CFG y DAT. El archivo de extensión CFG indica las constantes de transformación de las señales, las relaciones de los transformadores de tensión y corriente, y si las señales están en primario o secundario. Por otro lado el archivo de extensión DAT indica todos los puntos registrados en el evento

sin transformarse.

Cabe resaltar que las señales pueden ser registradas en primarios o secundarios. Esto se puede ver en la columna 13 del archivo CFG. La relación de transformación de primario a secundario se ve en las columnas 11 y 12.

Aplicando lo expuesto a los archivos comtrade (archivo de extensión CFG y DAT) a través del programa **Entrada.m** tanto a los archivos de envío y recepción se obtendrán las señales de corriente y tensión.

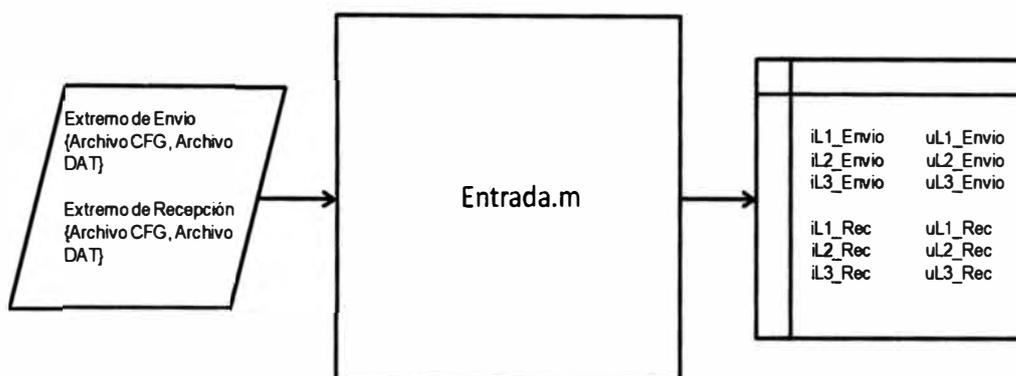


Figura 3.7Proceso de entrada de datos

3.1.3 Proceso de sincronización de señales: Rutina “Sincronizacion.m”

El objetivo del proceso de sincronización, detallado en el punto 2.2, es calcular el tiempo de desfase entre la señal de envío y la señal de recepción en caso las señales no estén sincronizadas.

Esta rutina será usada solamente si las señales oscilográficas de envío y recepción están desfasadas. El tiempo de desfase calculado será en segundos.

3.1.4 Proceso de filtrado: Rutina“Filtro.m”

Debido a que el modelo de localización de fallas expuesto en el presente trabajo usa las señales de corriente y tensión en el dominio de la frecuencia (Fasores) se aplicará la transformada de Fourier (TDF) tanto a las señales de corriente y tensión [3].

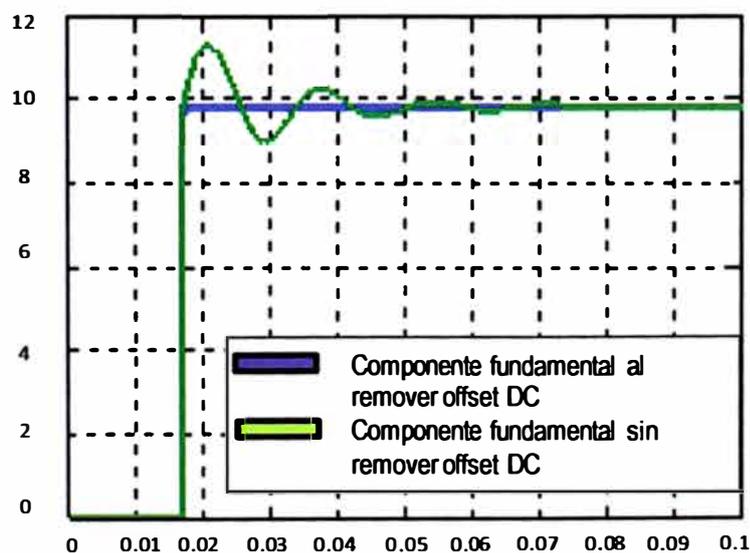


Figura 3.8 Aplicación de la TDF a una señal de corriente.

Entonces aplicando lo expuesto a las señales de corriente de envío y recepción a través del programa **Filtro.mse** obtendrán las señales de corriente filtradas y corregidas:

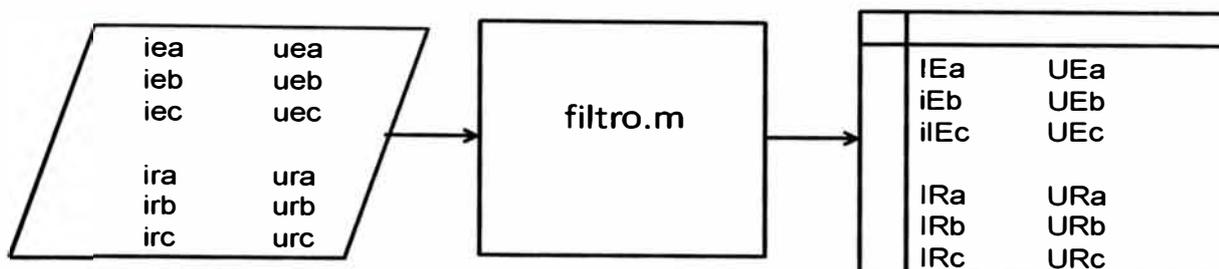


Figura 3.9 Proceso de filtro de datos.

La transformada discreta de Fourier es aplicada a las señales de corriente y tensión, con el fin de transformar dichas señales que están en el dominio del tiempo en señales fasoriales en el dominio de la frecuencia (fasores).

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi j}{N} k \cdot n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.2)$$

3.1.5 Proceso de Cálculo de la Distancia de Falla y Resistencia de Falla

Antes de iniciar el cálculo de distancia y resistencia de falla se calcularán las componentes simétricas en envío y recepción.

En el punto 2.1.3 se expone las ecuaciones que se usarán para calcular la distancia de falla tanto en las redes de secuencia positiva (2.8), negativa (2.9) e incremental positiva (2.10). Asimismo en el punto 2.3 se expusieron las diferentes relaciones para el cálculo de resistencia de falla para cada tipo de falla en líneas simples y paralelas. El cálculo de distancia de falla usa las rutinas "LF_FallaDesbalanceada" y "LF_FallaTrifásica" pues no depende si la falla tiene componente homopolar dado que solo usa las redes de secuencia positiva y negativa.

Las rutinas se exponen a continuación:

- Rutina "LF_FallaDesbalanceada", esta rutina calcula la distancia de falla desde el extremo de envío para cada punto del registro oscilográfico durante la falla; el cálculo se da tanto en la red de secuencia positiva y negativa. Es usada para fallas monofásicas, bifásicas a tierra y bifásicas entre fases.
- Rutina "LF_FallaTrifásica", esta rutina calcula la distancia de falla desde el extremo de envío para cada punto del registro oscilográfico durante la falla; el cálculo se da tanto en la red de secuencia positiva e incremental positiva. Solo es usada para fallas trifásicas.

La distancia de falla será la parte real del resultado, siendo la parte imaginaria idealmente cero pues la distancia de falla es un número real. Luego se graficará la parte real e imaginaria en un plano donde el eje de las abscisas coincide con la longitud de la

línea, siendo Ad1 el resultado del cálculo de distancia de falla usando la red de secuencia positiva y Ad2 el cálculo usando la red de secuencia negativa (figura 3.11).

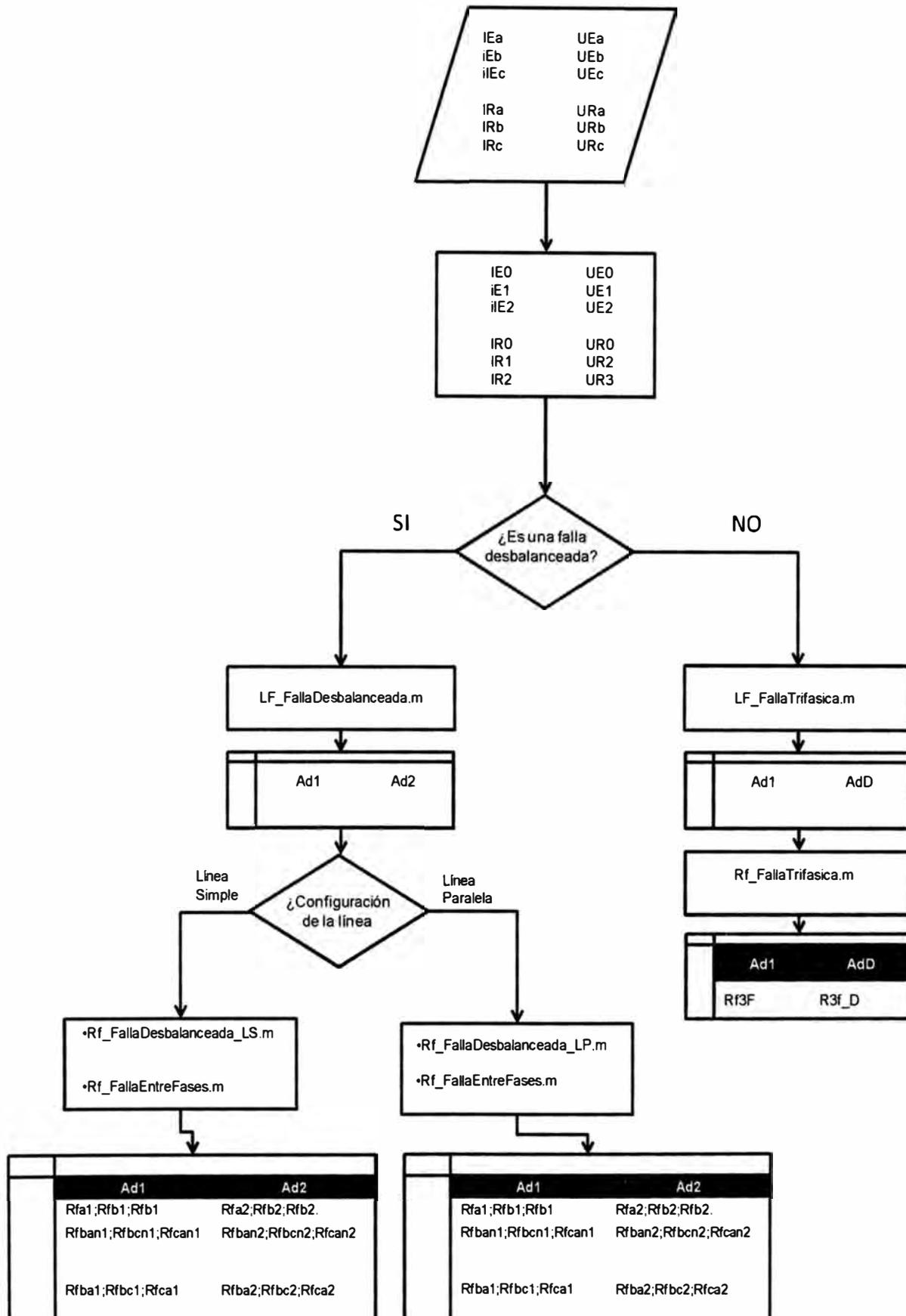


Figura 3.10Proceso de Cálculo de distancia y Resistencia de Falla.

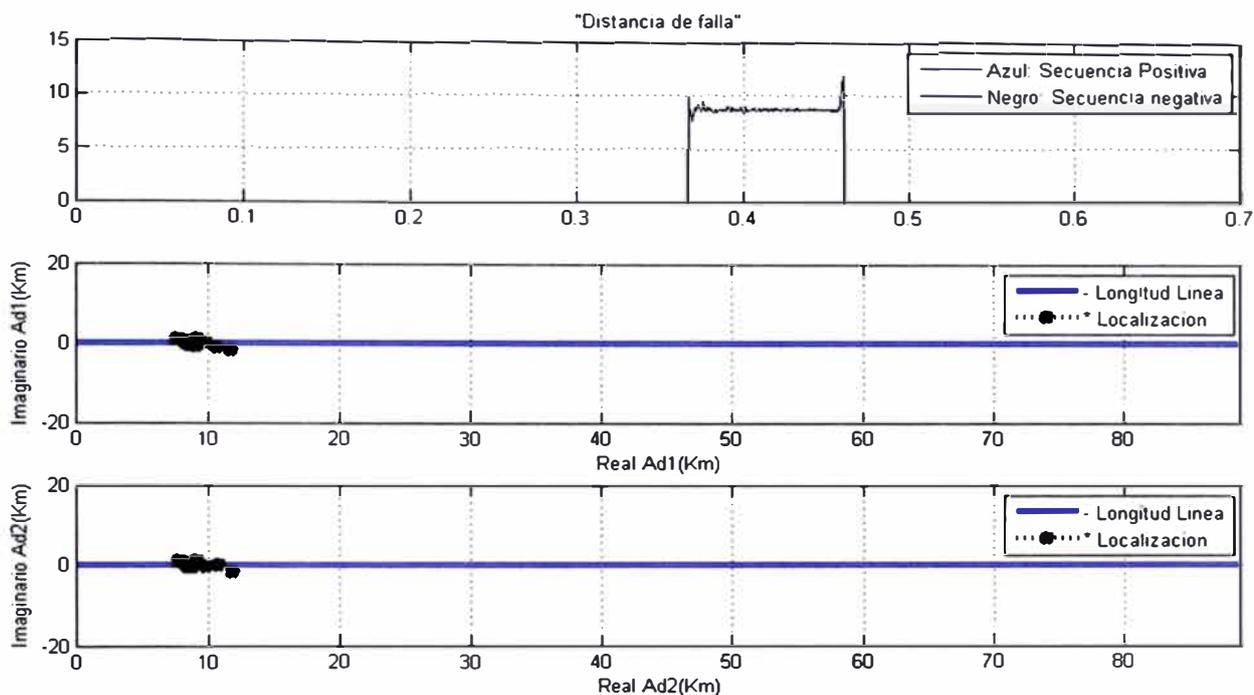


Figura 3.11 Conjunto de resultados de distancia de falla del Caso Teórico 1.

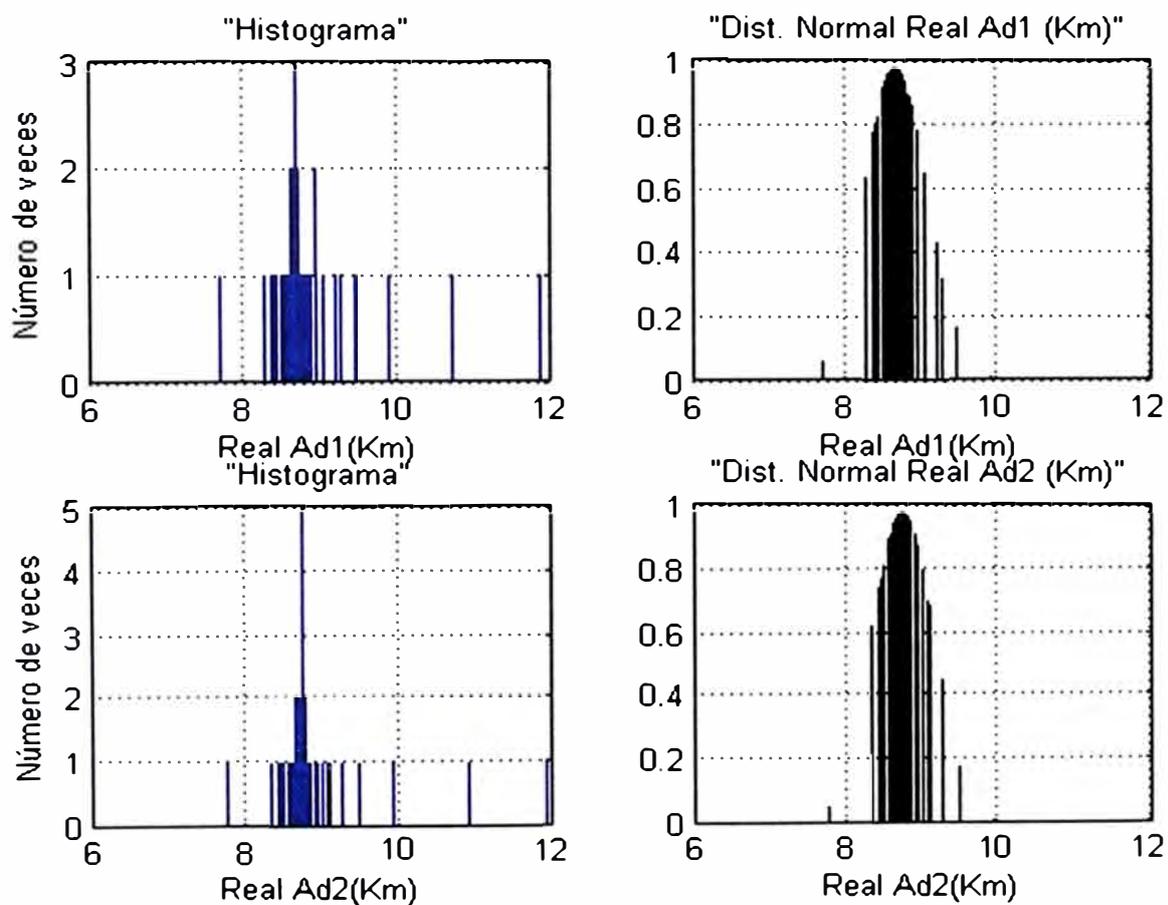


Figura 3.12 Histograma y Distribución normal empírica de resultados. Caso Teórico 1

Luego el conjunto de resultados es ordenado en un histograma, con lo que se

puede ver que siguen un patrón empírico de distribución normal. La distancia de falla más representativa del conjunto de resultados será la mediana, siendo esta el resultado de distancia de falla calculada.

Asimismo, a fin de observar el grado de dispersión del conjunto de resultados con respecto a su mediana, se puede graficar su función de distribución empírica (figura 3.13).

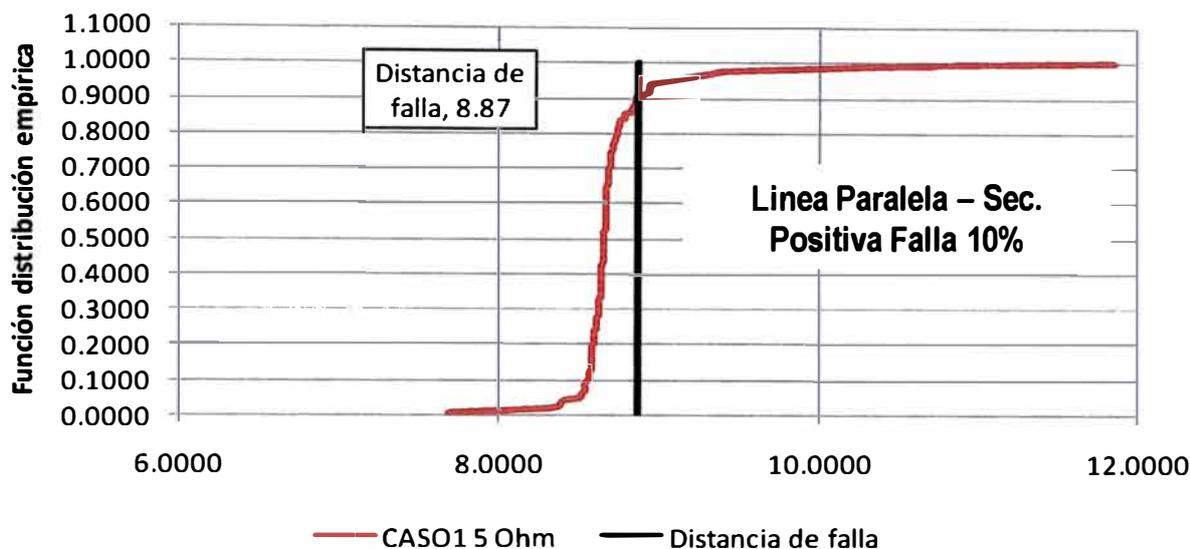


Figura 3.13 Función de distribución empírica. Caso Teórico 1

Por otro lado en el cálculo de resistencia de falla si se usa la red de secuencia cero, por ello esta si depende si la falla tiene o no aporte homopolar; las rutinas usadas son "Rf_FallaDesbalanceada_LP" y "Rf_FallaDesbalanceada_LS" para las fallas con aporte homopolar en líneas paralelas y líneas simples respectivamente; mientras que para las fallas trifásicas y bifásicas entre fases se usan las rutinas "Rf_FallaTrifásica" y "Rf_FallaEntreFases" respectivamente.

- Rutina "Rf_FallaDesbalanceada_LP", esta rutina calcula la resistencia de falla desde el extremo de envío para cada punto del registro oscilográfico durante la falla; el cálculo se hace usando tanto la distancia de falla según la secuencia positiva y negativa. Es usada para fallas monofásicas y bifásicas a tierra en líneas paralelas.
- Rutina "Rf_FallaDesbalanceada_LS", esta rutina calcula la resistencia de falla desde el extremo de envío para cada punto del registro oscilográfico durante la falla; el cálculo se hace usando tanto la distancia de falla según la secuencia positiva y negativa. Es usada para fallas monofásicas y bifásicas a tierra en líneas simples
- Rutina "Rf_FallaTrifásica", esta rutina calcula la resistencia de falla desde el

extremo de envío para cada punto del registro oscilográfico durante la falla; el cálculo se hace usando tanto la distancia de falla según la secuencia positiva e incremental positiva. Es usada solo para fallas trifásicas tanto para líneas paralelas y simples.

- Rutina "Rf_FallaEntreFases", esta rutina calcula la resistencia de falla desde el extremo de envío para cada punto del registro oscilográfico durante la falla; el cálculo se hace usando tanto la distancia de falla según la secuencia positiva y negativa. Es usada para fallas bifásicas entre fases tanto para líneas paralelas y simples.

Luego el conjunto de resultados es ordenado en un histograma. La resistencia de falla más representativa del conjunto de resultados será la que se repita más (moda), siendo esta el resultado de resistencia de falla calculada

CAPITULO IV RESULTADOS

4.1 Resultados

El programa "Localizador de Fallas" cubre las configuraciones de líneas simple y paralela, siendo estas las configuraciones más comunes en un sistema eléctrico.

La evaluación del desempeño del programa se divide en dos partes: Evaluación para fallas simuladas y evaluación para fallas reales, y ambos casos la evaluación tiene por objetivo ver la influencia en el error del cálculo por la resistencia de falla, la cercanía o lejanía del punto de falla, la transposición de la línea y la sincronización de señal de envío y recepción.

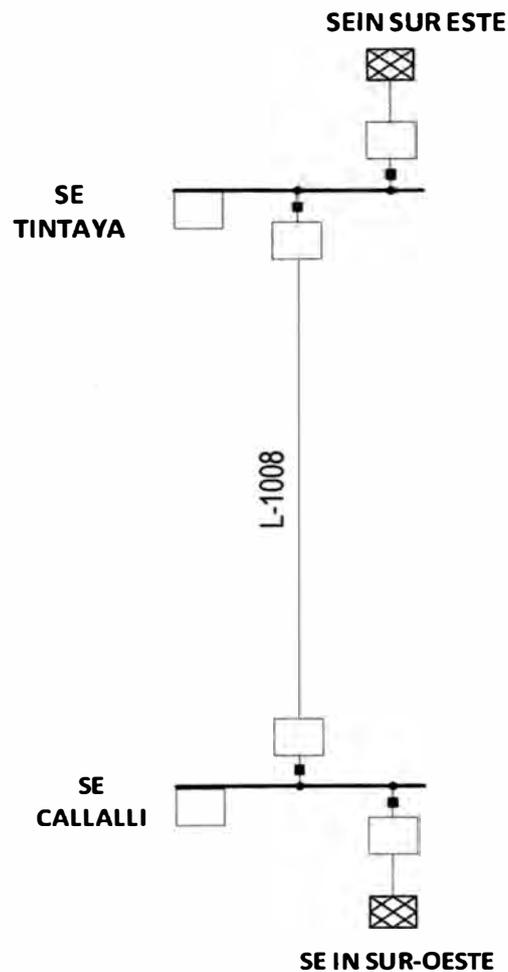


Figura 4.1 Unifilar Red Eléctrica

A fin de evaluar el programa para fallas simuladas se han generado archivos

comtrade para ambas configuraciones variando el tipo de falla, distancia de falla, correcta o deficiente transposición de la línea y la sincronización de las señales de envío y recepción.

Una vez expuesta la exactitud del programa del programa para el caso de fallas simuladas se expone los resultados de usar el programa en el cálculo de distancia de fallas reales. La distancia de falla real se puede conocer como resultado de la inspección de la línea luego de un evento, la cual indica la torre o vano afectado.

4.1.1 Resultados en una falla simulada: Caso de una línea simple

El anexo D se expone la elaboración de archivos comtrade para el caso de líneas simples y las condiciones asumidas para su creación. Estos archivos son usados como datos de entrada para evaluar el programa “Localizador de Falla”. La tabla 4.1 resume los casos de prueba:

Tabla 4.1 Casos de prueba línea simple

LINEA	Ubicación desde Tintaya (%)	Ubicación desde Tintaya (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Tiempo prefalla (ms)	Tiempo Simulación (ms)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Nombre de archivo
L-1008	10%	9.63	A-N	5	250	500	1200	CASO1.cfg
L-1008	50%	48.16	A-N	5	250	500	1200	CASO2.cfg
L-1008	90%	86.69	A-N	5	250	500	1200	CASO3.cfg
L-1008	10%	9.63	A-N	50	250	500	1200	CASO4.cfg
L-1008	50%	48.16	A-N	50	250	500	1200	CASO5.cfg
L-1008	90%	86.69	A-N	50	250	500	1200	CASO6.cfg
L-1008	10%	9.63	A-N	100	250	500	1200	CASO7.cfg
L-1008	50%	48.16	A-N	100	250	500	1200	CASO8.cfg
L-1008	90%	86.69	A-N	100	250	500	1200	CASO9.cfg
L-1008	10%	9.63	A-B-C	5	250	500	1200	CASO10.cfg
L-1008	50%	48.16	A-B-C	50	250	500	1200	CASO11.cfg
L-1008	90%	86.69	A-B-C	100	250	500	1200	CASO12.cfg
L-1008	10%	9.63	B-C	5	250	500	1200	CASO13.cfg
L-1008	50%	48.16	B-C	50	250	500	1200	CASO14.cfg
L-1008	90%	86.69	B-C	100	250	500	1200	CASO15.cfg
L-1008	10%	9.63	B-C-N	5	250	500	1200	CASO16.cfg
L-1008	50%	48.16	B-C-N	50	250	500	1200	CASO17.cfg
L-1008	90%	86.69	B-C-N	100	250	500	1200	CASO18.cfg

a. Evaluación de distancia de punto de falla

Para visualizar solo la influencia de la distancia del punto de falla en el cálculo se generó archivos comtrades para los distintos casos. Cabe señalar que no hay desincronización entre los archivos comtrades de envío y recepción creados. Las rutinas “LF_FallaDesbalanceada” y “LF_FallaTrifásica” son usadas según el tipo de falla. El cálculo del conjunto de resultados de distancia de falla se detalla en el punto 3.1.5.

Luego las distancias de fallas calculadas se compararán con la distancia de falla teórica a fin de hallar el error según la siguiente fórmula:

$$\text{error} = \frac{|d_{\text{teórica}} - d_{\text{calculada}}|}{\text{Longitud de la línea}} \quad (4.1)$$

Los resultados de las pruebas son:

Tabla 4.2 Resultados línea perfectamente transpuesta

Tipo de falla	Ubicación desde Tintaya (%)	R de falla (Ohm)	Nombre de archivo	Ubicación teórica desde Tintaya (Km)	real Ad1 (Km)	img Ad1 (Km)	Error % (Ad1)	real Ad2 (Km)	img Ad2 (Km)	Error % (Ad2)
R-N	10%	5	CASO1	9,6323	9,6122	0,0225	0,0209%	9,5624	0,5488	0,0726%
R-N	50%	5	CASO2	48,1616	48,2085	0,0408	0,0487%	48,1547	0,0417	0,0072%
R-N	90%	5	CASO3	86,6908	86,9092	1,1910	0,2267%	87,0557	1,1415	0,3788%
R-N	10%	50	CASO4	9,6323	9,6251	0,4974	0,0075%	9,5500	0,5245	0,0855%
R-N	50%	50	CASO5	48,1616	48,2008	0,0673	0,0407%	48,1599	0,0648	0,0017%
R-N	90%	50	CASO6	86,6908	87,2509	0,4158	0,5814%	87,3627	0,4017	0,6976%
R-N	10%	100	CASO7	9,6323	9,6438	0,3073	0,0120%	9,5134	0,2731	0,1235%
R-N	50%	100	CASO8	48,1616	48,2121	0,0821	0,0524%	48,1605	0,0528	0,0011%
R-N	90%	100	CASO9	86,6908	87,5444	0,2319	0,8861%	88,0178	0,1952	1,3776%
R-S-T	10%	5	CASO10	9,6323	9,6221	0,0198	0,0106%	9,5954	0,0159	0,0384%
R-S-T	50%	50	CASO11	48,1616	48,1570	0,0160	0,0048%	48,1432	0,0115	0,0190%
R-S-T	90%	100	CASO12	86,6908	86,8062	0,0452	0,1197%	86,7596	0,0440	0,0714%
S-T	10%	5	CASO13	9,6323	9,6287	0,0251	0,0038%	9,5695	0,0182	0,0652%
S-T	50%	50	CASO14	48,1616	48,1816	0,0156	0,0208%	48,1615	0,0008	0,0001%
S-T	90%	100	CASO15	86,6908	86,8220	0,0296	0,1362%	86,7569	0,0273	0,0686%
S-T-N	10%	5	CASO16	9,6323	9,6768	0,0059	0,0462%	9,4744	0,0059	0,1640%
S-T-N	50%	50	CASO17	48,1616	48,1680	0,0174	0,0067%	48,1598	0,0090	0,0019%
S-T-N	90%	100	CASO18	86,6908	86,8052	0,0454	0,1188%	86,7760	0,0170	0,0884%

Tabla 4.3 Resultados línea sin transposición

Tipo de falla	Ubicación desde Tintaya (%)	R de falla (Ohm)	Nombre de archivo	Ubicación teórica desde Tintaya (Km)	real Ad1 (Km)	img Ad1 (Km)	Error % (Ad1)	real Ad2 (Km)	img Ad2 (Km)	Error % (Ad2)
R-N	10%	5	CASO1	9,6323	9,7947	0,8544	0,1686%	9,2595	0,6026	0,3870%
R-N	50%	5	CASO2	48,1616	48,2293	0,2023	0,0703%	46,8263	0,2832	1,3862%
R-N	90%	5	CASO3	86,6908	86,5403	0,4398	0,1563%	84,7991	1,7175	1,9639%
R-N	10%	50	CASO4	9,6323	9,6946	0,7779	0,0647%	8,9343	0,7080	0,7247%
R-N	50%	50	CASO5	48,1616	48,2051	0,2358	0,0452%	46,5760	1,5496	1,6461%
R-N	90%	50	CASO6	86,6908	86,7291	0,7843	0,0397%	84,7003	2,5385	2,0665%
R-N	10%	100	CASO7	9,6323	9,7395	0,6592	0,1113%	8,8064	2,0816	0,8574%
R-N	50%	100	CASO8	48,1616	48,1983	0,2587	0,0381%	46,2888	2,9350	1,9443%
R-N	90%	100	CASO9	86,6908	86,9584	1,0400	0,2778%	84,5391	3,7692	2,2339%
R-S-T	10%	5	CASO10	9,6323	9,6241	0,0208	0,0085%	9,6268	0,0129	0,0057%
R-S-T	50%	50	CASO11	48,1616	48,1492	0,0208	0,0128%	48,1446	0,0205	0,0176%
R-S-T	90%	100	CASO12	86,6908	86,7787	0,0592	0,0912%	86,7326	0,0946	0,0434%
S-T	10%	5	CASO13	9,6323	9,4313	0,7542	0,2087%	9,6569	0,5135	0,0255%
S-T	50%	50	CASO14	48,1616	48,2164	0,0985	0,0569%	49,0796	0,5482	0,9531%
S-T	90%	100	CASO15	86,6908	87,0899	0,9795	0,4143%	88,5077	1,6397	1,8862%
S-T-N	10%	5	CASO16	9,6323	9,5841	0,4015	0,0501%	9,4160	0,9350	0,2246%
S-T-N	50%	50	CASO17	48,1616	48,1452	0,0781	0,0170%	49,6277	1,4869	1,5221%
S-T-N	90%	100	CASO18	86,6908	86,7661	0,5912	0,0781%	90,2498	4,0259	3,6948%

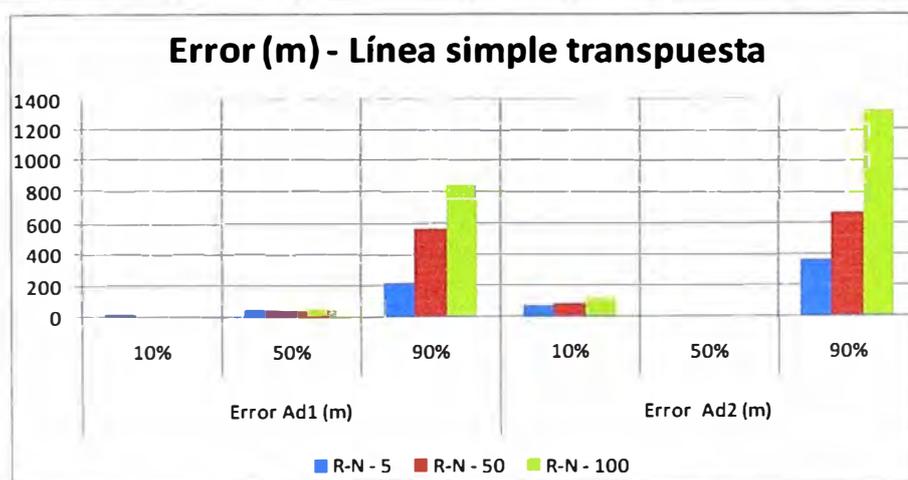


Figura 4.2 Error en metros línea simple con transposición perfecta - Falla R-N.

En configuraciones de línea simple, el error en el cálculo de distancia de falla para fallas monofásicas sigue un comportamiento marcadamente creciente para fallas lejanas del extremo de envío y de alta impedancia, como se puede ver en la figura 4.2 y figura 3. Asimismo se ve que en todos los casos, los cálculos por secuencia positiva presentan menores errores en comparación al cálculo por secuencia negativa.

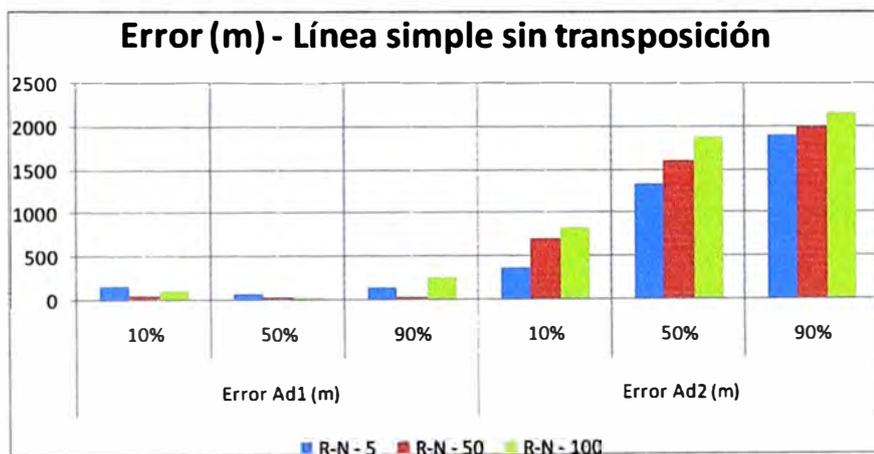


Figura 4.3 Error en metros para línea simple sin transposición - Falla R-N.

En el caso de fallas trifásicas, bifásicas a tierra y bifásicas entre fases, los errores son bajos y generalmente presentan su mínimo para fallas a la mitad de la línea

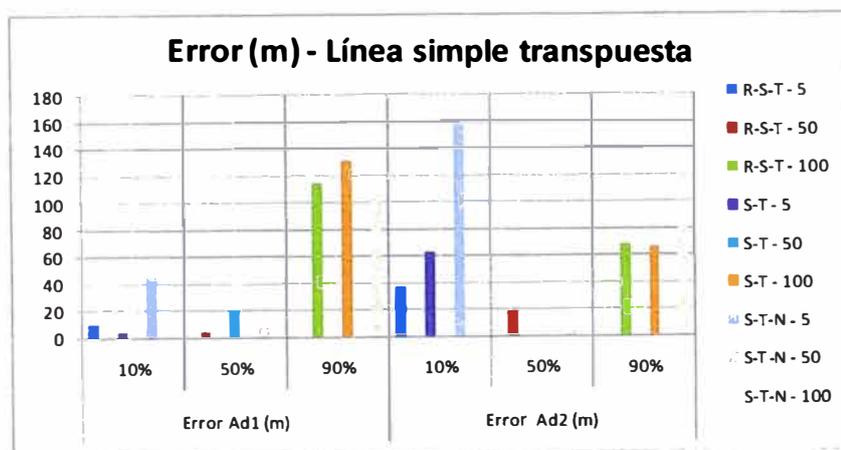


Figura 4.4 Error en metros para línea simple con transposición perfecta

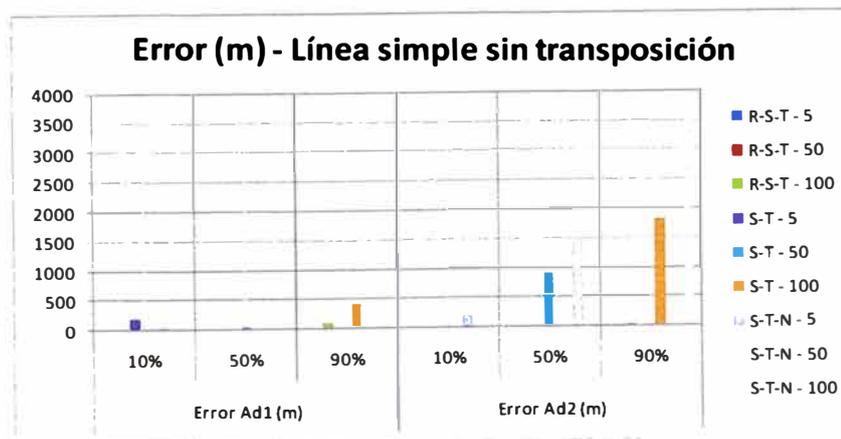


Figura 4.5 Error en metros para línea simple sin transposición

b. Evaluación del Cálculo de Resistencia de falla.

Como se expuso en el punto 3.1.5, el uso de cada rutina de cálculo de resistencia de falla depende del tipo de falla y la configuración de la línea. La rutina "Rf_FallaDesbalanceada_LP" se usará para fallas con aporte homopolar y configuración de líneas paralelas; mientras que la rutina "Rf_FallaDesbalanceada_LS" se usará para fallas con aporte homopolar y configuración de líneas simples.

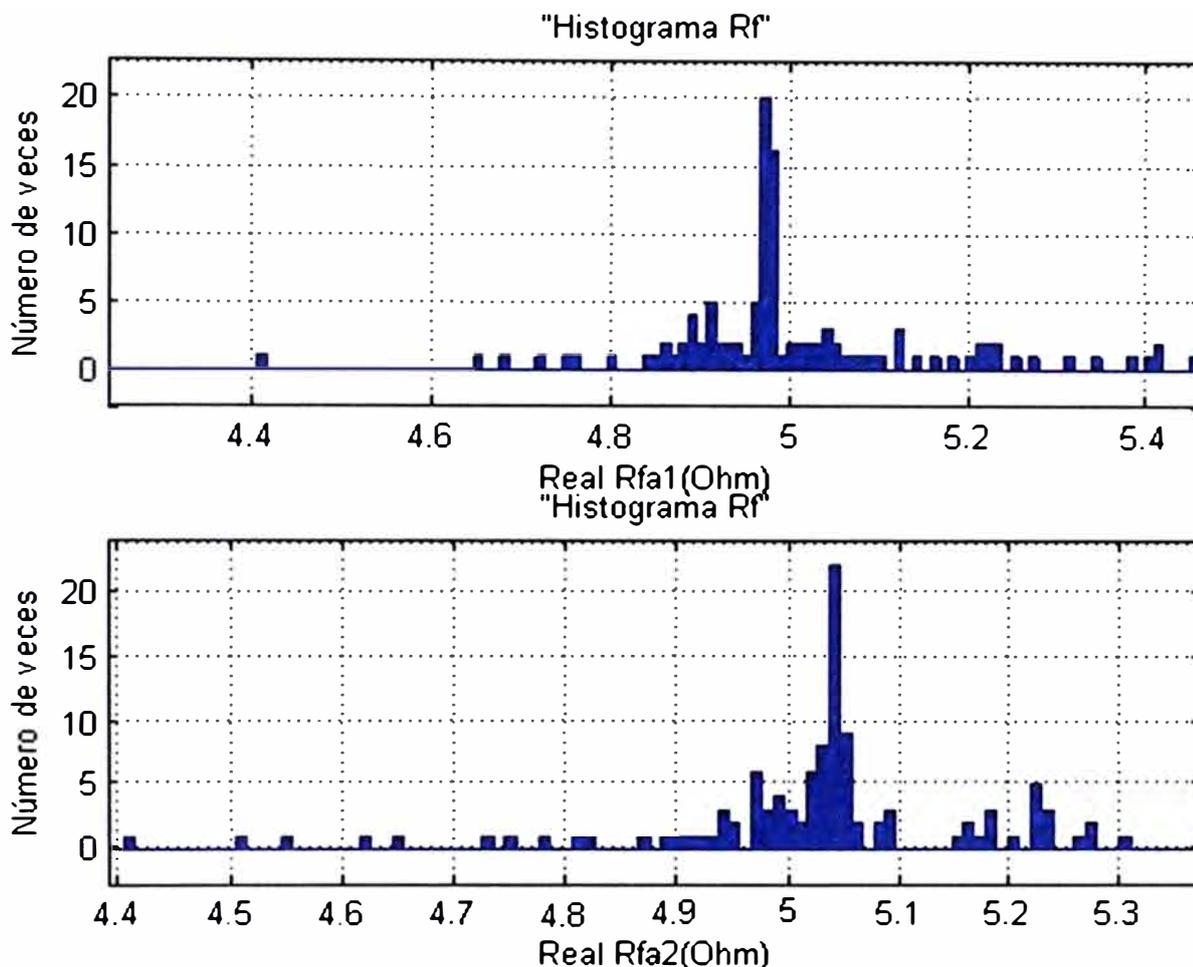


Figura 4.6 Histograma resistencia de falla - Caso teórico L1008.

Las rutinas "Rf_FallaEntreFases" y "Rf_FallaTrifasica" serán usadas para fallas sin aporte homopolar, independiente de la configuración de las líneas. En la tabla 4.1 se exponen los casos a evaluar. Usando las rutinas mencionadas se calcula la resistencia de falla en cada punto de falla para cada caso, originando un conjunto de resultados. Este conjunto de resultados es ordenado en un histograma. La resistencia de falla más representativa del conjunto de resultados será la que se repita más (moda), siendo esta el resultado de resistencia de falla calculada.

El error se calculará siguiendo la siguiente fórmula:

$$\text{error} = \frac{|Rf_{teórica} - Rf_{calculada}|}{Rf_{teórica}} \quad (4.2)$$

Los resultados de las pruebas son:

Tabla 4.4 Resultados de cálculo de resistencia de falla

Tipo de falla	Ubicación desde Tintaya (%)	Ubicación teórica desde Tintaya (Km)	Nombre de archivo	R de falla (Ohm)	Modelo de parametros distribuidos			
					Rf (Ad1) (Ohm)	Error % (Rf)	Rf (Ad2 o AdD) (Ohm)	Error % (Rf)
R-N	10%	21.12	CASO1	5	4.9700	0.6000	5.0400	0.8000
R-N	50%	105.60	CASO2	5	4.9200	1.6000	5.0000	0.0000
R-N	90%	190.08	CASO3	5	4.8800	2.4000	4.9300	1.4000
R-N	10%	21.12	CASO4	50	50.0000	0.0000	50.1000	0.2000
R-N	50%	105.60	CASO5	50	49.8000	0.4000	50.0000	0.0000
R-N	90%	190.08	CASO6	50	49.6000	0.8000	49.8000	0.4000
R-N	10%	21.12	CASO7	100	99.9900	0.0100	100.0000	0.0000
R-N	50%	105.60	CASO8	100	99.6000	0.4000	99.9000	0.1000
R-N	90%	190.08	CASO9	100	99.3000	0.7000	99.7000	0.3000
R-S-T	10%	21.12	CASO10	5	5.0000	0.0000	Gran dispersión de datos	-
R-S-T	50%	105.60	CASO11	50	50.0000	0.0000	7.0900	85.8200
R-S-T	90%	190.08	CASO12	100	100.0000	0.0000	6.8	93.2000
S-T	10%	21.12	CASO13	5	5.0300	0.6000	5.0000	0.0000
S-T	50%	105.60	CASO14	50	50.2000	0.4000	50.1000	0.2000
S-T	90%	190.08	CASO15	100	101.0000	1.0000	100.0000	0.0000
S-T-N	10%	21.12	CASO16	5	4.8100	3.8000	4.8100	3.8000
S-T-N	50%	105.60	CASO17	50	52.2000	4.4000	52.1000	4.2000
S-T-N	90%	190.08	CASO18	100	100.0000	0.0000	100.0000	0.0000

Tabla 4.5 Casos de prueba línea simple

LINEA	Ubicación desde Tintaya (%)	Ubicación teórica desde Tintaya (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Caso a desfasar	Desfasaje Teórico [Envío - Recepción] (ciclos)
L-1008	10%	9,63	A-N	5	CASO1	1
L-1008	50%	48,16	A-N	5	CASO2	1
L-1008	90%	86,69	A-N	5	CASO3	1
L-1008	10%	9,63	A-N	50	CASO4	3
L-1008	50%	48,16	A-N	50	CASO5	3
L-1008	90%	86,69	A-N	50	CASO6	3
L-1008	10%	9,63	A-N	100	CASO7	6
L-1008	50%	48,16	A-N	100	CASO8	6
L-1008	90%	86,69	A-N	100	CASO9	6
L-1008	10%	9,63	A-B-C	5	CASO10	1
L-1008	50%	48,16	A-B-C	50	CASO11	3
L-1008	90%	86,69	A-B-C	100	CASO12	6
L-1008	10%	9,63	B-C	5	CASO13	1
L-1008	50%	48,16	B-C	50	CASO14	3
L-1008	90%	86,69	B-C	100	CASO15	6
L-1008	10%	9,63	B-C-N	5	CASO16	1
L-1008	50%	48,16	B-C-N	50	CASO17	3
L-1008	90%	86,69	B-C-N	100	CASO18	6

c. Evaluación del Tiempo de De-sincronización.

A fin de evaluar el cálculo de tiempo de de-sincronización entre los registros oscilográficos de envío y recepción se desfasará las señales de envío con respecto a la señales de recepción según se detalla en la tabla 4.5:

Luego se calculará el desfasaje entre la señal de envío y recepción comparándolo con el desfasaje teórico según:

$$\text{error} = \frac{|\text{Tlag}_{\text{teórica}} - \text{Tlag}_{\text{calculada}}|}{\text{Tlag}_{\text{teórica}}} \quad (4.3)$$

Los resultados de las pruebas son mostrados en la tabla 4.6. Los errores de usar la sincronización a través de la transformada wavelet son muy bajos casi en todos los casos (aproximadamente de 0.04%).

Tabla 4.6 Resultados de cálculo de desfase envío – recepción

LINEA	Ubicación desde Tintaya (%)	Ubicación teórica desde Tintaya (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Caso a desfasar	Desfase Teórico [Envío - Recepción] (ciclos)	Desfase Teórico [Envío - Recepción] (ciclos)	Error %
L-1008	10%	9,63	A-N	5	CASO1	1	0,9996	0,0400
L-1008	50%	48,16	A-N	5	CASO2	1	0,9996	0,0400
L-1008	90%	86,69	A-N	5	CASO3	1	0,9996	0,0400
L-1008	10%	9,63	A-N	50	CASO4	3	2,9988	0,0400
L-1008	50%	48,16	A-N	50	CASO5	3	2,9988	0,0400
L-1008	90%	86,69	A-N	50	CASO6	3	2,9988	0,0400
L-1008	10%	9,63	A-N	100	CASO7	6	5,9976	0,0400
L-1008	50%	48,16	A-N	100	CASO8	6	5,9976	0,0400
L-1008	90%	86,69	A-N	100	CASO9	6	5,9976	0,0400
L-1008	10%	9,63	A-B-C	5	CASO10	1	0,9996	0,0400
L-1008	50%	48,16	A-B-C	50	CASO11	3	2,9988	0,0400
L-1008	90%	86,69	A-B-C	100	CASO12	6	5,9976	0,0400
L-1008	10%	9,63	B-C	5	CASO13	1	0,9996	0,0400
L-1008	50%	48,16	B-C	50	CASO14	3	2,94882	1,7060
L-1008	90%	86,69	B-C	100	CASO15	6	5,9976	0,0400
L-1008	10%	9,63	B-C-N	5	CASO16	1	0,9996	0,0400
L-1008	50%	48,16	B-C-N	50	CASO17	3	2,9988	0,0400
L-1008	90%	86,69	B-C-N	100	CASO18	6	5,9976	0,0400

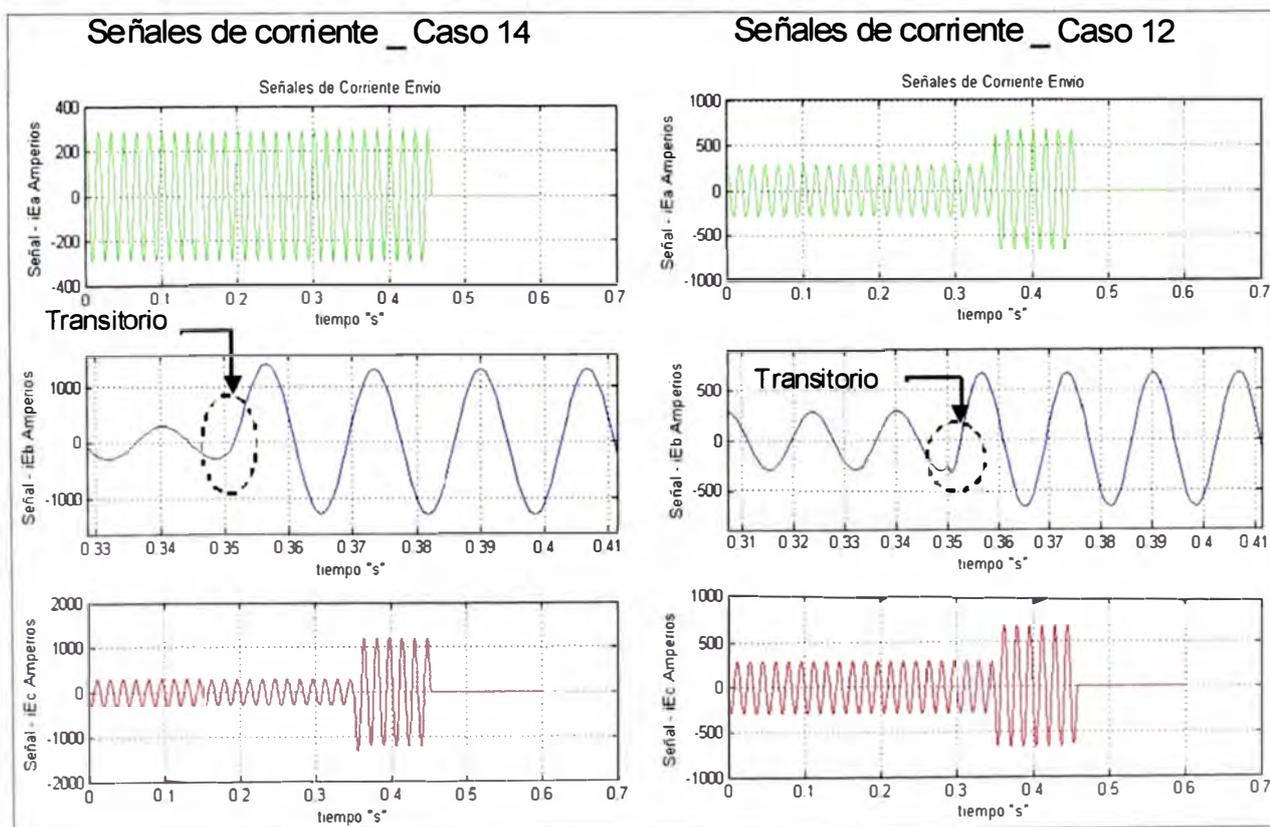


Figura 4.7 Comparación de los transitorios generados por fallas

Sin embargo en la tabla 4.6 se tiene que el caso 14 (falla con resistencia de falla de 50 Ohm al 50% de la línea) presenta un error mayor a los demás casos. Esto se debe a que en dicho caso, el transitorio generado por la falla no presenta un cambio brusco en las señales de corrientes a diferencia de los demás casos (figura 4.7).

4.1.2 Resultados en una falla simulada: Caso de una línea paralela

El anexo E se expone la elaboración de archivos comtrade para el caso de líneas paralelas y las condiciones asumidas para su creación. Estos archivos son usados como datos de entrada para evaluar el programa "Localizador de falla". La Tabla 4.7 resume los casos de prueba:

Tabla 4.7 Casos de prueba línea paralela

LINEA	Ubicación desde Piura (%)	Ubicación teórica desde Piura (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Tiempo prefalla (ms)	Tiempo Simulación (ms)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Nombre de archivo
L-2241	10%	8,87	A-N	5	250	500	1200	CASO1.cfg
L-2241	50%	44,36	A-N	5	250	500	1200	CASO2.cfg
L-2241	90%	79,85	A-N	5	250	500	1200	CASO3.cfg
L-2241	10%	8,87	A-N	50	250	500	1200	CASO4.cfg
L-2241	50%	44,36	A-N	50	250	500	1200	CASO5.cfg
L-2241	90%	79,85	A-N	50	250	500	1200	CASO6.cfg
L-2241	10%	8,87	A-N	100	250	500	1200	CASO7.cfg
L-2241	50%	44,36	A-N	100	250	500	1200	CASO8.cfg
L-2241	90%	79,85	A-N	100	250	500	1200	CASO9.cfg
L-2241	10%	8,87	A-B-C	5	250	500	1200	CASO10.cfg
L-2241	50%	44,36	A-B-C	50	250	500	1200	CASO11.cfg
L-2241	90%	79,85	A-B-C	100	250	500	1200	CASO12.cfg
L-2241	10%	8,87	B-C	5	250	500	1200	CASO13.cfg
L-2241	50%	44,36	B-C	50	250	500	1200	CASO14.cfg
L-2241	90%	79,85	B-C	100	250	500	1200	CASO15.cfg
L-2241	10%	8,87	B-C-N	5	250	500	1200	CASO16.cfg
L-2241	50%	44,36	B-C-N	50	250	500	1200	CASO17.cfg
L-2241	90%	79,85	B-C-N	100	250	500	1200	CASO18.cfg

a. Evaluación del Cálculo de distancia de falla

Para visualizar solo la influencia de la distancia del punto de falla en el cálculo se generó archivos comtrade para los distintos casos. Cabe señalar que no hay sincronización entre los archivos comtrade de envío y recepción creados.

Las rutinas "LF_FallaDesbalanceada" o "LF_FallaTrifásica" son usadas según el tipo de falla. El cálculo del conjunto de resultados de distancia de falla se detalla en el punto 3.1.5.

Luego de calculadas las distancias de fallas se compararán con la distancia de falla teórica a fin de hallar el error según la ecuación (4.4). Los resultados de las pruebas son mostrados en la tabla 4.8, y la tabla 4.9.

$$\text{error} = \frac{|d_{\text{teórica}} - d_{\text{calculada}}|}{\text{Longitud de la línea}} \quad (4.4)$$

En configuraciones de línea paralelas, el error en el cálculo de distancia de falla

Tabla 4.9 Resultados línea sin transposición

Tipo de falla	Ubicación desde Piura (%)	R de falla (Ohm)	Nombre de archivo	Ubicación teórica desde Piura (Km)	real Ad1 (Km)	img Ad1 (Km)	Error % (Ad1)	real Ad2 (Km)	img Ad2 (Km)	Error % (Ad2)
R-N	10%	5	CASO1	8,8721	7,3814	2,0551	1,6802%	6,1098	0,7437	3,1135%
R-N	50%	5	CASO2	44,3605	43,4581	0,2164	1,0172%	42,6946	1,3988	1,8776%
R-N	90%	5	CASO3	79,8489	79,5662	2,5711	0,3186%	79,4918	3,4523	0,4025%
R-N	10%	50	CASO4	8,8721	6,8695	1,9710	2,2572%	5,6998	1,5534	3,5756%
R-N	50%	50	CASO5	44,3605	42,9491	0,3383	1,5908%	42,4249	0,5381	2,1817%
R-N	90%	50	CASO6	79,8489	79,0519	2,7499	0,8984%	79,3504	2,5389	0,5619%
R-N	10%	100	CASO7	8,8721	6,3040	1,8947	2,8946%	5,2388	2,4414	4,0952%
R-N	50%	100	CASO8	44,3605	42,3983	0,4661	2,2117%	42,1254	0,4239	2,5192%
R-N	90%	100	CASO9	79,8489	78,4896	2,9334	1,5321%	79,2017	1,5092	0,7294%
R-S-T	10%	5	CASO10	8,8721	7,9297	0,3304	1,0622%	7,9841	0,1812	1,0009%
R-S-T	50%	50	CASO11	44,3605	43,6221	0,2981	0,8323%	43,8530	0,1604	0,5721%
R-S-T	90%	100	CASO12	79,8489	79,3515	0,2167	0,5606%	79,7879	0,1494	0,0688%
S-T	10%	5	CASO13	8,8721	8,2995	0,9196	0,6453%	9,6353	1,0591	0,8602%
S-T	50%	50	CASO14	44,3605	43,2685	0,9508	1,2308%	44,5060	0,1507	0,1640%
S-T	90%	100	CASO15	79,8489	78,2551	2,7598	1,7965%	79,2693	1,2541	0,6532%
S-T-N	10%	5	CASO16	8,8721	8,0516	0,1482	0,9248%	11,8411	2,5811	3,3464%
S-T-N	50%	50	CASO17	44,3605	43,5613	0,8784	0,9008%	44,5088	0,5738	0,1672%
S-T-N	90%	100	CASO18	79,8489	79,0737	2,0356	0,8737%	77,9247	0,7585	2,1688%

Error (m) - Línea paralela transpuesta

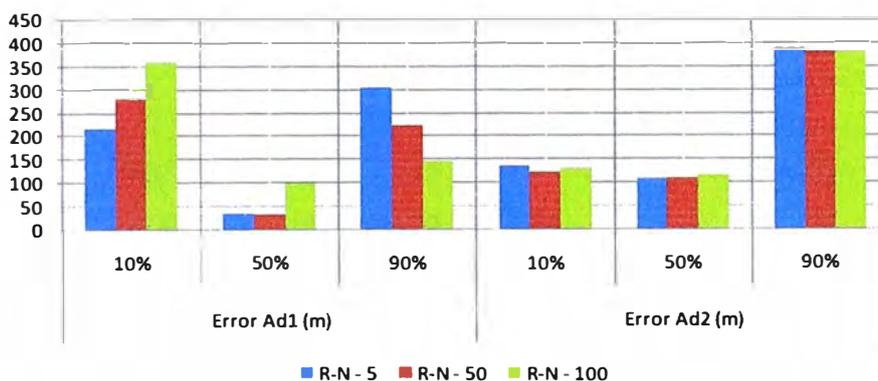


Figura 4.9 Error en metros para línea paralela con transposición perfecta Falla R-N

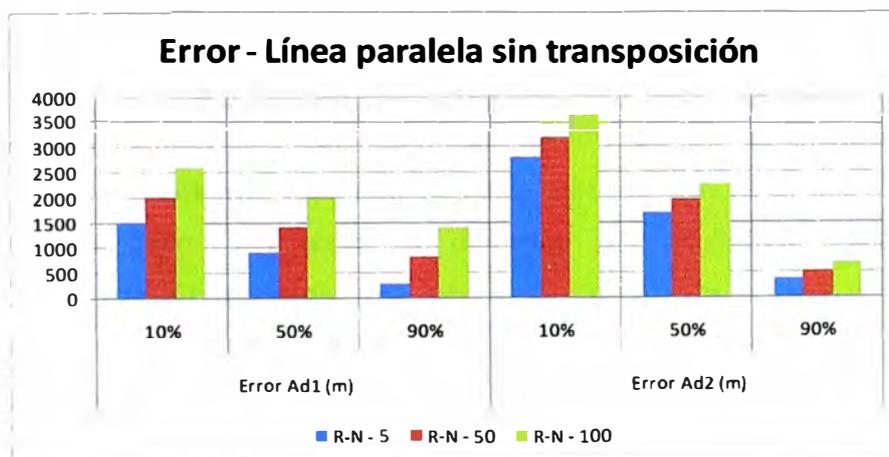


Figura 4.10 Error en metros para línea paralela sin transposición - Falla R-N

En el caso de fallas trifásicas, bifásicas a tierra y bifásicas entre fases, los errores son bajos y generalmente presentan su mínimo para fallas a la mitad de la línea

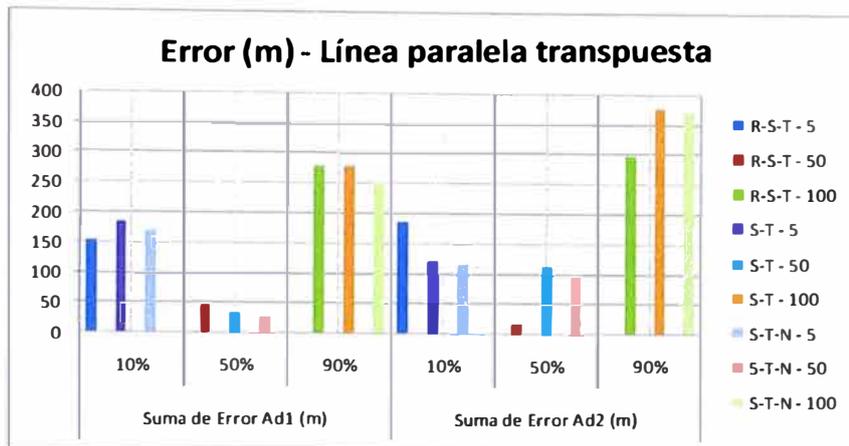


Figura 4.11 Error en metros para línea paralela con transposición perfecta

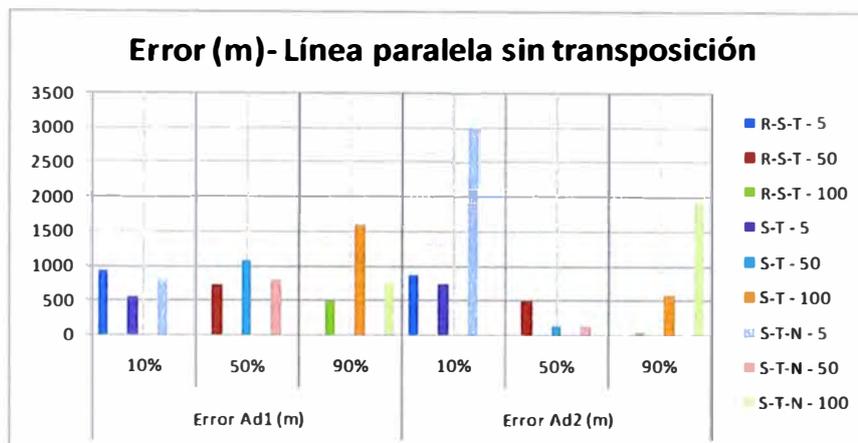


Figura 4.12 Error línea paralela sin transposición

b. Evaluación del Cálculo de Resistencia de falla.

Como se expuso en el punto 3.1.5 del capítulo 3, el uso de cada rutina de cálculo de resistencia de falla depende del tipo de falla y la configuración de la línea. La rutina "Rf_FallaDesbalanceada_LP" se usará para fallas con aporte homopolar y configuración de líneas paralelas; mientras que la rutina "Rf_FallaDesbalanceada_LS" se usará para fallas con aporte homopolar y configuración de líneas simples. Las rutinas "Rf_FallaEntreFases" y "Rf_FallaTrifasica" serán usadas para fallas sin aporte homopolar, independiente de la configuración de las líneas. En la tabla 4.7 se exponen los casos a evaluar. Usando las rutinas mencionadas se calcula la resistencia de falla en cada punto de falla para cada caso, originando un conjunto de resultados. Este conjunto de resultados es ordenado en un histograma, con lo que se puede ver que siguen un patrón de distribución normal. La resistencia de falla más representativa del conjunto de resultados será la que se repita más (moda), siendo esta el resultado de resistencia de falla calculada.

El error se calculará siguiendo la siguiente fórmula:

$$\text{error} = \frac{|Rf_{teórica} - Rf_{calculada}|}{Rf_{teórica}} \quad (4.5)$$

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 4.10.

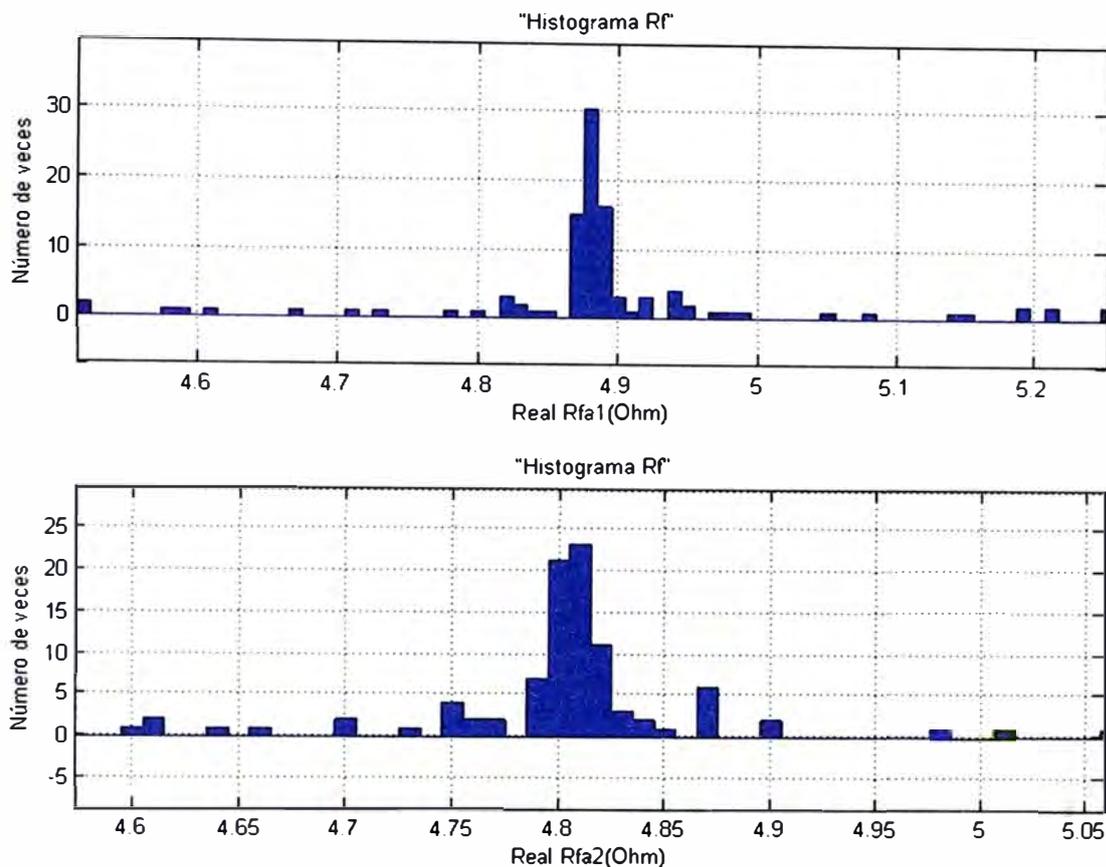


Figura 4.13 Histograma de resistencia de falla - Caso Teórico L2241.

c. Evaluación del Tiempo de De-sincronización.

A fin de evaluar el cálculo de tiempo de de-sincronización entre los registros oscilográficos de envío y recepción se desfazará las señales de envío con respecto a la señales de recepción según se detalla en la tabla 4.11.

Tabla 4.10 Resultados de cálculo de resistencia de falla

Tipo de falla	Ubicación desde Chiclayo (%)	Ubicación teórica desde Chiclayo (Km)	Nombre de archivo	R de falla (Ohm)	Modelo de parámetros distribuidos			
					Rf (Ad1) (Ohm)	Error % (Rf)	Rf (Ad2 o AdD) (Ohm)	Error % (Rf)
R-N	10%	21.12	CASO1	5	4.8800	2.4000	4.8100	3.8000
R-N	50%	105.60	CASO2	5	5.0600	1.2000	5.0400	0.8000
R-N	90%	190.08	CASO3	5	5.3400	6.8000	5.3100	6.2000
R-N	10%	21.12	CASO4	50	50.0000	0.0000	49.9000	0.2000
R-N	50%	105.60	CASO5	50	50.3000	0.6000	50.2000	0.4000
R-N	90%	190.08	CASO6	50	50.5000	1.0000	50.5000	1.0000
R-N	10%	21.12	CASO7	100	99.9000	0.1000	99.9000	0.1000
R-N	50%	105.60	CASO8	100	100.0000	0.0000	100.0000	0.0000
R-N	90%	190.08	CASO9	100	101.0000	1.0000	101.0000	1.0000
R-S-T	10%	21.12	CASO10	5	5.0100	0.2000	5.6100	12.2000
R-S-T	50%	105.60	CASO11	50	49.8000	0.4000	8.2400	83.5200
R-S-T	90%	190.08	CASO12	100	99.8000	0.2000	Gran dispersión de datos.	-
S-T	10%	21.12	CASO13	5	5.0100	0.2000	5.1100	2.2000
S-T	50%	105.60	CASO14	50	49.7000	0.6000	49.8000	0.4000
S-T	90%	190.08	CASO15	100	99.4000	0.6000	99.5000	0.5000
S-T-N	10%	21.12	CASO16	5	5.5900	11.8000	5.5600	11.2000
S-T-N	50%	105.60	CASO17	50	55.7000	11.4000	55.7000	11.4000
S-T-N	90%	190.08	CASO18	100	100.0000	0.0000	100.0000	0.0000

Luego se calculará el desfasaje entre la señal de envío y recepción comparándolo con el desfasaje teórico según:

$$\text{error} = \frac{|\text{Tlag}_{\text{teórica}} - \text{Tlag}_{\text{calculada}}|}{\text{Tlag}_{\text{teórica}}} \quad (4.6)$$

Tabla 4.11 Casos de prueba de desfase para cálculos en línea paralela

LINEA	Ubicación desde Piura (%)	Ubicación teórica desde Piura (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Caso a desfasar	Desfasaje Teórico [Envío - Recepción] (ciclos)
L-2241	10%	8,87	A-N	5	CASO1	1
L-2241	50%	44,36	A-N	5	CASO2	1
L-2241	90%	79,85	A-N	5	CASO3	1
L-2241	10%	8,87	A-N	50	CASO4	3
L-2241	50%	44,36	A-N	50	CASO5	3
L-2241	90%	79,85	A-N	50	CASO6	3
L-2241	10%	8,87	A-N	100	CASO7	6
L-2241	50%	44,36	A-N	100	CASO8	6
L-2241	90%	79,85	A-N	100	CASO9	6
L-2241	10%	8,87	A-B-C	5	CASO10	1
L-2241	50%	44,36	A-B-C	50	CASO11	3
L-2241	90%	79,85	A-B-C	100	CASO12	6
L-2241	10%	8,87	B-C	5	CASO13	1
L-2241	50%	44,36	B-C	50	CASO14	3
L-2241	90%	79,85	B-C	100	CASO15	6
L-2241	10%	8,87	B-C-N	5	CASO16	1
L-2241	50%	44,36	B-C-N	50	CASO17	3
L-2241	90%	79,85	B-C-N	100	CASO18	6

Asimismo se calcularán las distancias de fallas con el desfasaje calculado y se compararán con la distancia de falla teórica (tabla 4.12).

Una vez calculado el desfasaje se calculan las distancias de fallas y resistencia de falla nuevamente con el desfasaje corregido y se compararán con la distancia de falla y resistencia de falla teórica (tabla 4.13).

Tabla 4.12 Resultados de cálculo de desfasaje envío - recepción

LINEA	Ubicación desde Piura (%)	Ubicación teórica desde Piura (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Caso a desfasar	Desfasaje Teórico [Envío - Recepción] (ciclos)	Desfasaje Teórico [Envío - Recepción] (ciclos)	Error %
L-2241	10%	8,87	A-N	5	CASO1	1	0,9996	0,0400
L-2241	50%	44,36	A-N	5	CASO2	1	0,9996	0,0400
L-2241	90%	79,85	A-N	5	CASO3	1	0,9996	0,0400
L-2241	10%	8,87	A-N	50	CASO4	3	2,9988	0,0400
L-2241	50%	44,36	A-N	50	CASO5	3	2,9988	0,0400
L-2241	90%	79,85	A-N	50	CASO6	3	2,9988	0,0400
L-2241	10%	8,87	A-N	100	CASO7	6	5,9976	0,0400
L-2241	50%	44,36	A-N	100	CASO8	6	5,9976	0,0400
L-2241	90%	79,85	A-N	100	CASO9	6	5,9976	0,0400
L-2241	10%	8,87	A-B-C	5	CASO10	1	0,9996	0,0400
L-2241	50%	44,36	A-B-C	50	CASO11	3	2,9988	0,0400
L-2241	90%	79,85	A-B-C	100	CASO12	6	5,9976	0,0400
L-2241	10%	8,87	B-C	5	CASO13	1	0,9996	0,0400
L-2241	50%	44,36	B-C	50	CASO14	3	2,9988	0,0400
L-2241	90%	79,85	B-C	100	CASO15	6	5,9976	0,0400
L-2241	10%	8,87	B-C-N	5	CASO16	1	0,9996	0,0400
L-2241	50%	44,36	B-C-N	50	CASO17	3	2,9988	0,0400
L-2241	90%	79,85	B-C-N	100	CASO18	6	5,9976	0,0400

Tabla 4.13 Resultados de cálculo con desfase corregido.

Caso a desfasar	Modelo de parametros distribuidos							
	real Ad1 (Km)	Error % (Ad1)	real Ad2 (Km)	Error % (Ad2)	Rf (Ad1) (Ohm)	Error % (Rf)	Rf (Ad2 o AdD) (Ohm)	Error % (Rf)
CASO1.cfg	19.5726	0.7327	18.6010	1.1927	4.8400	3.2000	4.9800	0.4000
CASO2.cfg	101.7099	1.8419	104.0283	0.7442	4.6800	6.4000	4.4700	10.6000
CASO3.cfg	183.3306	3.1957	195.2587	2.4520	5.7100	14.2000	5.3100	6.2000
CASO4.cfg	21.2353	0.0546	21.4942	0.1772	50.0000	0.0000	49.9000	0.2000
CASO5.cfg	106.7752	0.5564	107.5173	0.9078	54.2000	8.4000	48.0000	4.0000
CASO6.cfg	192.8161	1.2955	195.2283	2.4376	50.5000	1.0000	50.5000	1.0000
CASO7.cfg	21.9791	0.4068	21.5307	0.1945	99.9000	0.1000	99.9000	0.1000
CASO8.cfg	107.5394	0.9183	108.1233	1.1947	100.0000	0.0000	100.0000	0.0000
CASO9.cfg	193.5815	1.6579	196.4040	2.9943	101.0000	1.0000	101.0000	1.0000
CASO10.cfg	20.6069	0.2429	20.4666	0.3094	5.0100	0.2000	5.6100	12.2000
CASO11.cfg	105.8923	0.1384	105.5794	0.0098	49.8000	0.4000	8.2400	83.5200
CASO12.cfg	191.8567	0.8412	191.4033	0.6266	99.8000	0.2000	Gran dispersión de datos.	-
CASO13.cfg	21.1269	0.0033	19.9468	0.5555	5.0100	0.2000	5.1100	2.2000
CASO14.cfg	106.7367	0.5382	105.2633	0.1594	49.7000	0.6000	49.8000	0.4000
CASO15.cfg	191.2640	0.5606	188.2618	0.8609	99.4000	0.6000	99.5000	0.5000
CASO16.cfg	20.8624	0.1220	20.0094	0.5259	5.5900	11.8000	5.5600	11.2000
CASO17.cfg	106.0857	0.2300	105.7520	0.0720	55.7000	11.4000	55.7000	11.4000
CASO18.cfg	191.7909	0.8101	184.9135	2.4463	100.0000	0.0000	100.0000	0.0000

4.1.3 Impacto de la de-sincronización de señales en el error de calculo

A fin de ver el impacto que tiene en el cálculo de la distancia de falla la sincronización entre las señales de envío y recepción, se ha de-sincronizado las señales y realizado el cálculo de distancia de falla para cada de-sincronización. Se eligió una falla monofásica fase R de 5 Ohm en una configuración de línea simple (CASO 1) con transposición perfecta por ser el caso de menor error de distancia de falla.

Tabla 4.14 Cálculo de distancia de falla para diferentes de-sincronizaciones

Desincronizacion (ciclos)	Ubicación teórica desde Tintaya (Km)	real Ad1 (Km)	img Ad1 (m)	Error % (Ad1)	Error Ad1 (m)	real Ad2 (Km)	img Ad2 (m)	Error % (Ad2)	Error Ad2 (m)
0	9,632314	9,55	0,05	0,00	86,06	9,54	0,00	0,00	88,46
0,05	9,632314	20,45	43,88	0,12	10815,72	9,78	21,47	0,00	145,25
0,1	9,632314	46,15	89,02	0,41	36517,28	7,62	43,74	0,02	2015,19
0,15	9,632314	91,45	129,33	0,92	81814,82	2,42	67,55	0,08	7212,88
0,2	9,632314	157,78	152,42	1,67	148144,46	-7,06	93,86	0,19	16695,42
0,25	9,632314	234,93	143,74	2,54	225299,64	-23,36	123,37	0,37	32994,83

4.1.4 Resultado en una falla real: Caso de una línea simple

El caso de estudio práctico para una línea real se aplicará al evento de desconexión de la línea L1008 el día 27 de enero del 2012. La causa de esta desconexión fue debido a la rotura del separador de fases ubicado en el vano de las torres T86 y T87, las cuales se encuentran ubicadas a 43.162 y 43.506 Km de la subestación Tintaya respectivamente.

Esto provocó una falla bifásica entre fases "S" y "T" la cual fue despejada por el sistema de protecciones mediante disparo trifásico definitivo en ambas subestaciones al persistir la falla.

El programa usó los datos oscilográficos proporcionados por los relés del extremo de Tintaya y Callalli, siendo la subestación Tintaya el extremo de envío.

El proceso se inicia con el cálculo del tiempo de de-sincronización entre los registros oscilográficos de los extremos de Chimbote y Trujillo. El tiempo calculado fue de 0.0042 segundos, con lo cual los registros coinciden exactamente

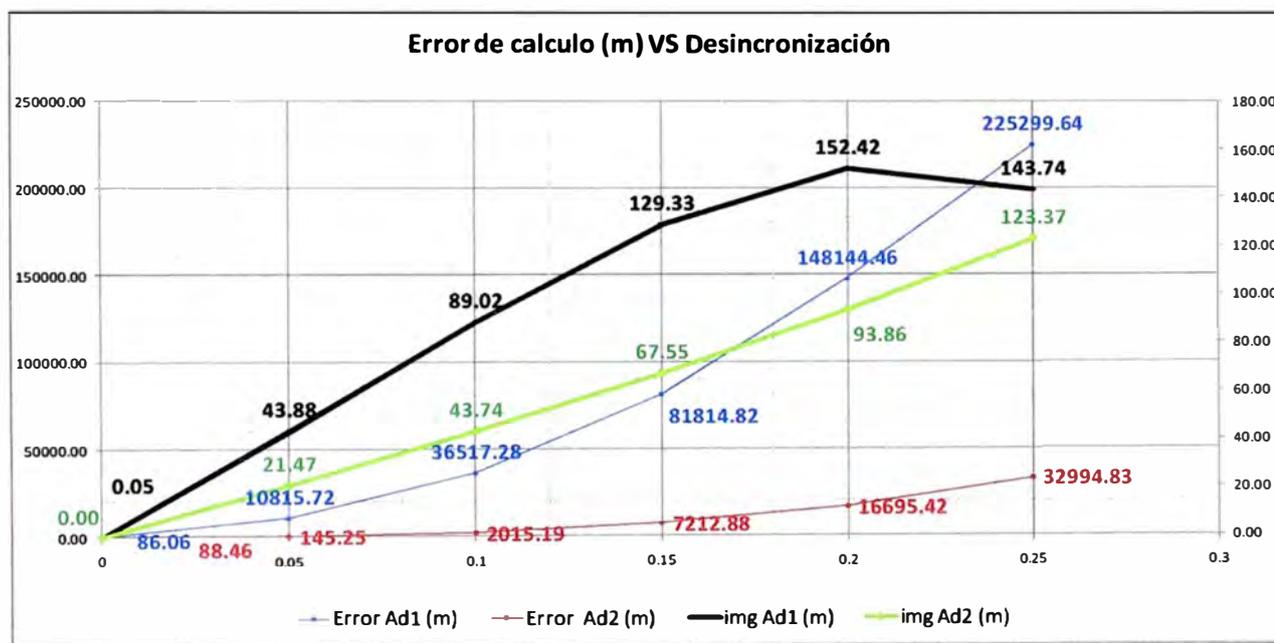


Figura 4.14 Error de cálculo VS Desincronización

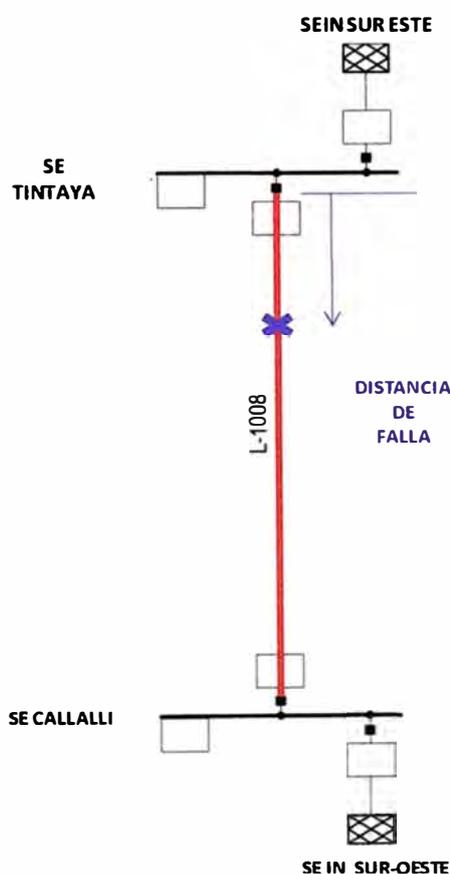


Figura 4.15 Unifilar Red Eléctrica

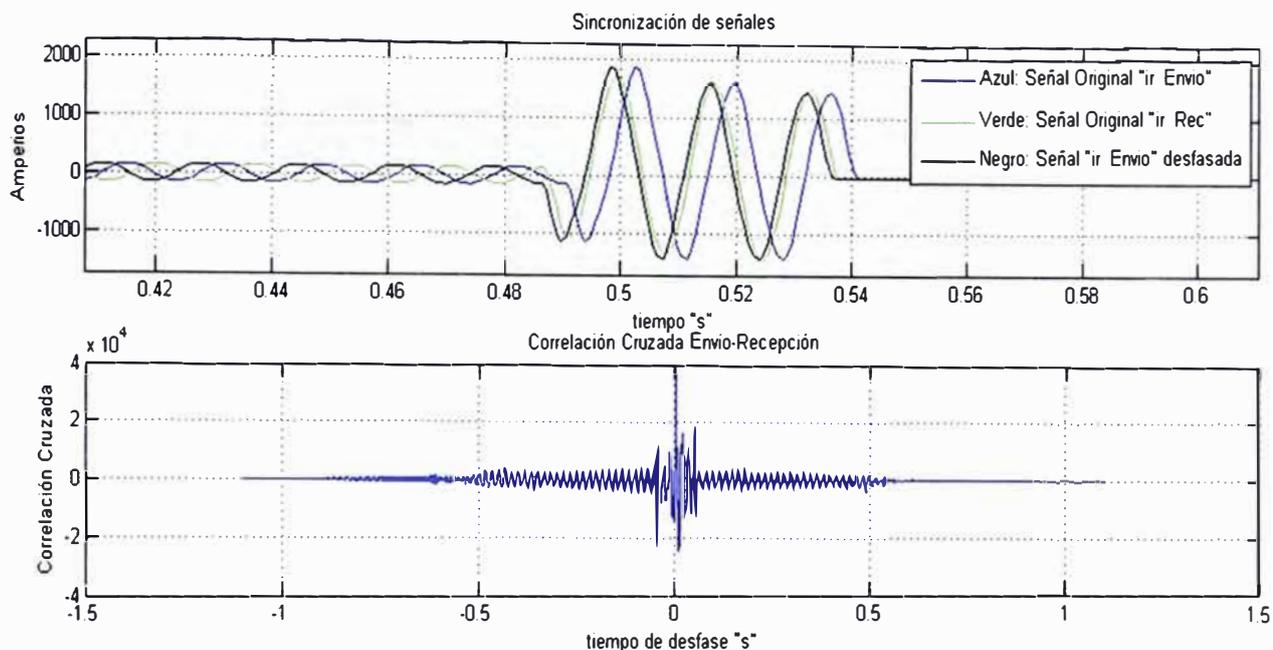


Figura 4.16 Sincronización y Correlación Cruzadas Caso L1008 – 27ENE12.

La rutina "Sincronizacion.m" se aplicó a la señal transformada de corriente beta usando la transformada wavelet debichiev 3 de nivel 1.

Una vez sincronizadas las señales de envío y recepción, se procede a calcular la distancia de falla usando la rutina "LF_FallaDesbalanceada.m". Como se expuso anteriormente el cálculo de la distancia de falla se realiza para cada punto de falla en el registro oscilográfico:

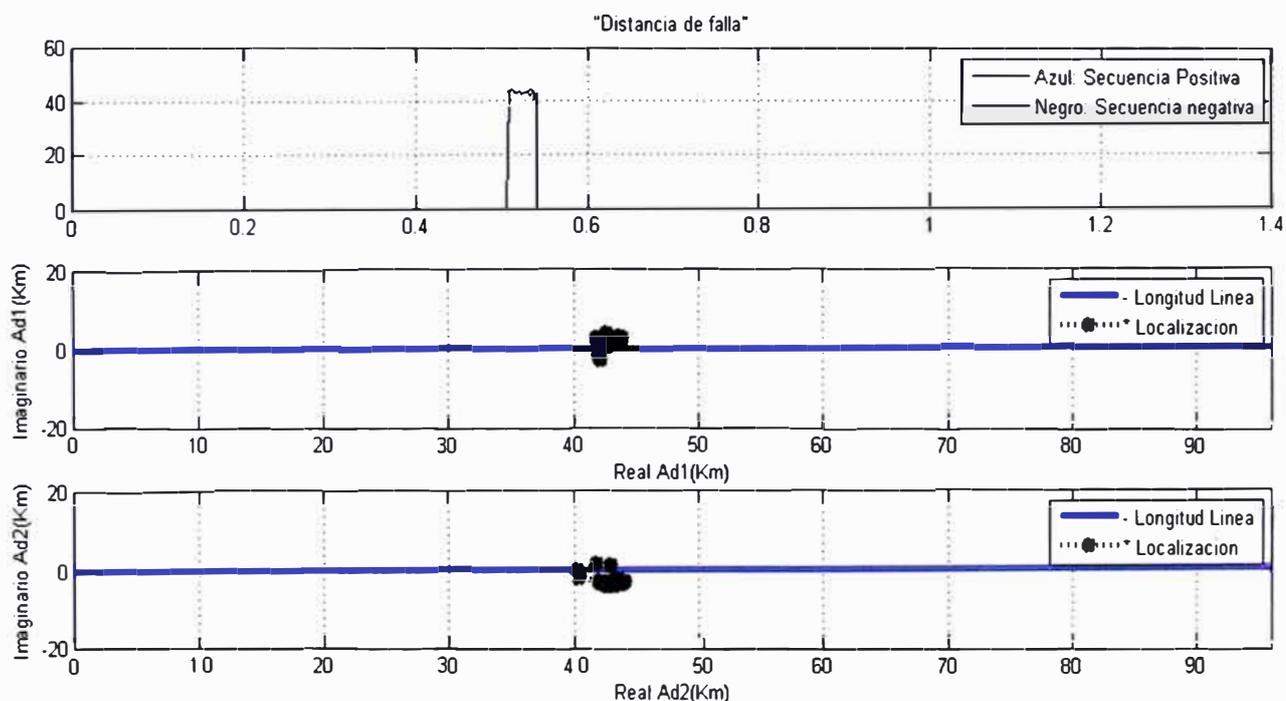


Figura 4.17 Calculo de distancia de falla Caso L1008 – 27ENE12.

El cálculo usando como extremo de envío a la subestación Tintaya indica:

Tabla 4.15 Resultados del cálculo.

Línea	Tipo de falla	Longitud de la línea	Ubicación Real desde Tintaya (%)	Ubicación Real desde Tintaya (Km)	Nombre de archivo	Modelo de parámetros distribuidos			
						real Ad1 (Km)	Error % (Ad1)	real Ad2 (Km)	Error % (Ad2)
L-1008	S-T	96.32	44.99	43.334	Caso Real L1008	42.9975	0.3494	42.8474	0.5052

En la tabla 4.15 se tiene que el error del cálculo según la red de secuencia positiva es menor al calculado usando la secuencia negativa, sin embargo ambos son errores pequeños.

El gráfico de histograma y distribución acumulada (figura 4.18) indican que tanto el cálculo de secuencia positiva y negativa son válidos y de baja dispersión. Por otro lado también se calculó la resistencia de falla usando la rutina "Rf_FallaEntreFases.m".

El cálculo de resistencia de falla se realiza para cada punto de falla según el resultado de distancia de falla por secuencia positiva y negativa, este conjunto de resultados es ordenado en un histograma (ver figura 4.19) y la resistencia de falla más representativa del conjunto de resultados será la que se repita más (moda).

Como se puede ver en la figura 4.19 la resistencia de falla tanto por secuencia positiva como secuencia negativa son cercanas a cero (aproximadamente 0.5 Ohm en promedio), esto se corresponde con que la falla fue por un acercamiento de las fases S y T por la rotura del separador de fases ubicado en el vano de las torres T86 y T87, originando una resistencia de falla muy pequeña.

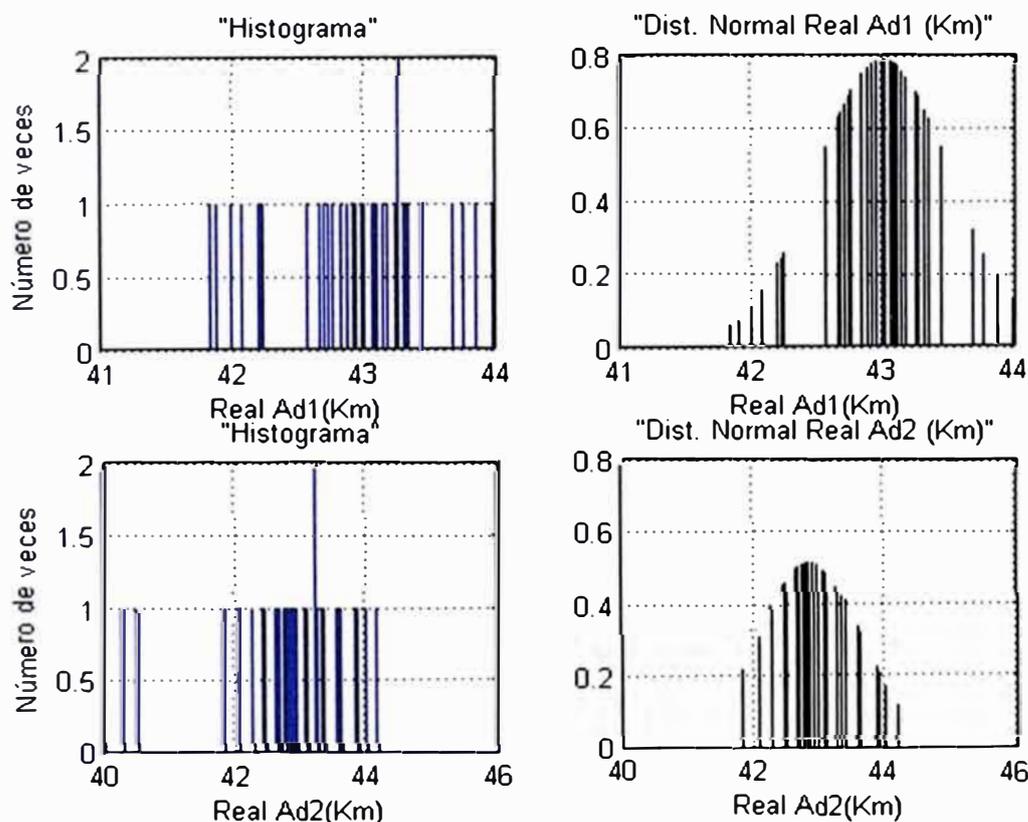


Figura 4.18 Histograma y Distribución de resultados – Caso L1008.

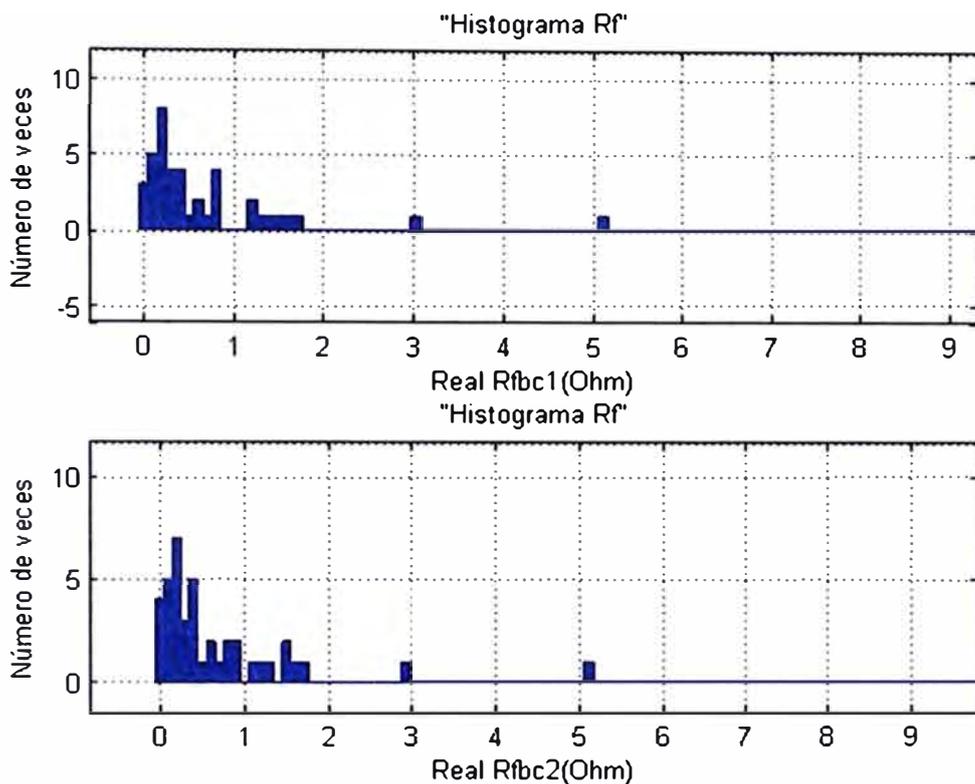


Figura 4.19 Histograma Resistencia de falla – Caso L1008.

4.1.5 Resultado en una falla real: Caso de una línea paralela

El caso de estudio práctico para líneas paralelas se aplicará al evento de desconexión de la línea L-2232 el día 24 de setiembre del 2012.

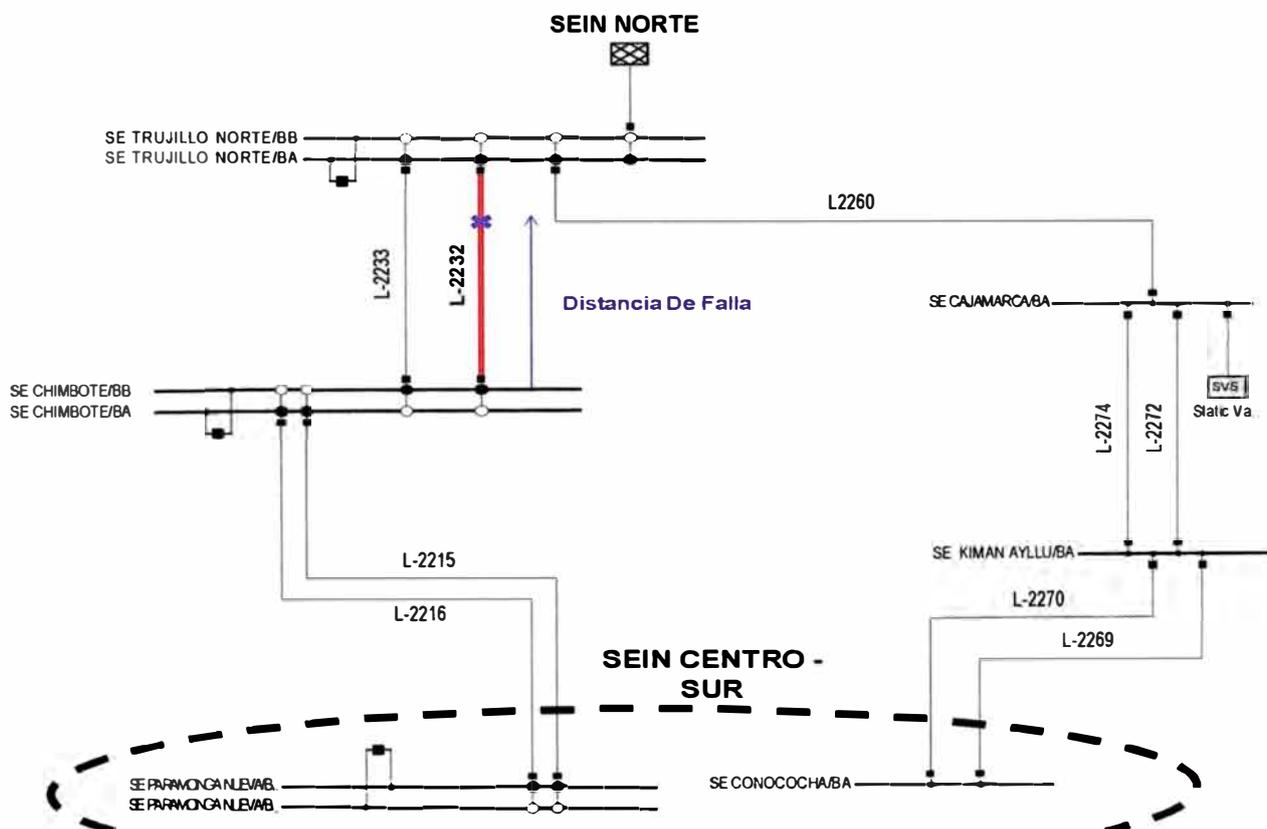


Figura 4.20 Unifilar Red Eléctrica

La causa de esta desconexión fue la rotura de la cadena de aisladores de la fase "R" en la estructura T421. Esto provocó una falla monofásica fase "R" la cual fue despejada por el sistema de protecciones mediante disparo monofásico y recierre no exitoso en ambas subestaciones al persistir la falla.

La torre T421 se encuentra ubicada en la zona de Alto Moche a 113.733 Km de la subestación Chimbote.

El programa usó los datos oscilográficos proporcionados por los relés del extremo de Chimbote y Trujillo Norte, siendo la subestación Chimbote el extremo de envío. El proceso se inicia con el cálculo del tiempo de de-sincronización entre los registros oscilográficos de los extremos de Chimbote y Trujillo. El tiempo calculado fue de 0.000833 segundos, lo cual coincide con los registros exactamente.

La rutina "Sincronismo.m" se aplicó a la señal transformada de corriente gamma usando la transformada wavelet biorthogonal 3.1 (bior3.1) de nivel 2.

Una vez sincronizadas las señales de envío y recepción, se procede a calcular la distancia de falla usando la rutina "LF_FallaDesbalanceada.m" (figura 4.22).

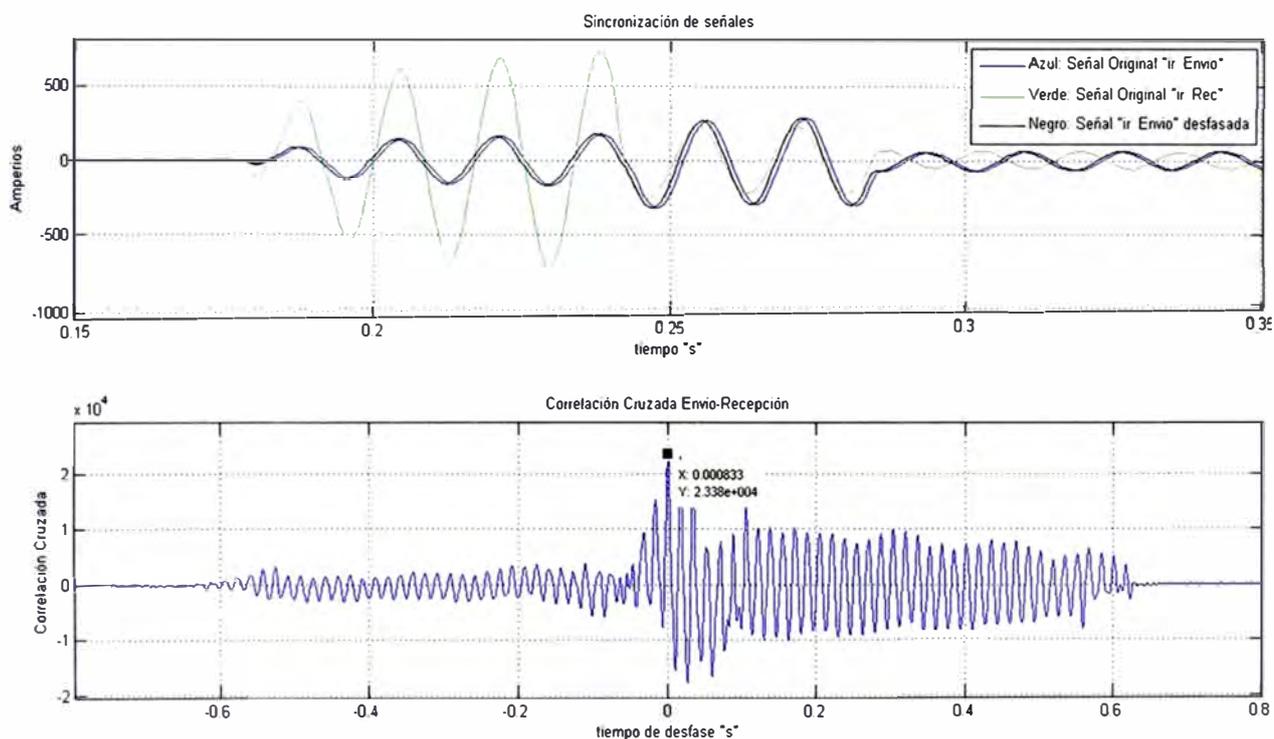


Figura 4.21 Sincronización y Correlación Cruzadas Caso L2232 – 24SET12.

El cálculo usando como extremo de envío a la subestación Chimbote indica:

Tabla 4.16 Resultados del cálculo.

Línea	Tipo de falla	Longitud de la línea	Ubicación Real desde Chimbote (%)	Ubicación Real desde Chimbote (Km)	Nombre de archivo	Modelo de parámetros distribuidos			
						real Ad1 (Km)	Error % (Ad1)	real Ad2 (Km)	Error % (Ad2)
L-2232	R-N	133.761	85.02	113.73	Caso Real L2232	194.0100	-60.0175	111.4800	1.6821

En la figura 4.22 se tiene que el error del cálculo según la red de secuencia positiva es imposible al ser mayor a la longitud de la línea. Ello se corresponde con el gráfico de histograma y distribución acumulada (Figura 4.23), pues como se puede ver la distribución de resultados en el caso de cálculo según secuencia positiva es muy dispersa.

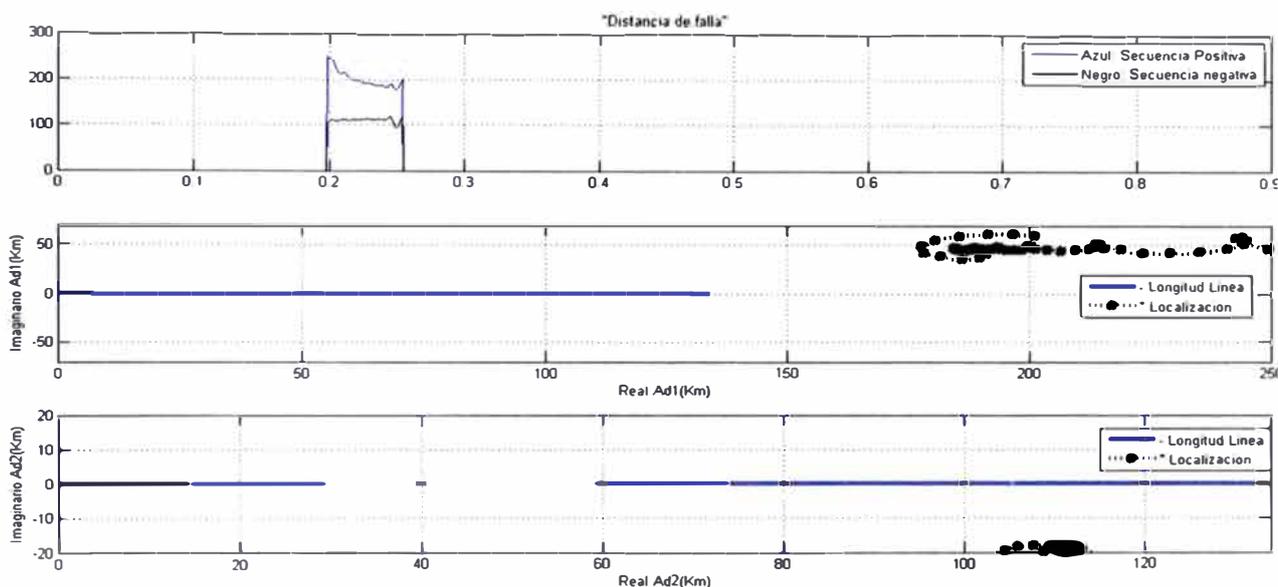


Figura 4.22 Calculo de distancia de falla Caso L2232 – 24SET12.

El cálculo según la red secuencia negativa presenta una menor dispersión en la distribución de resultados según la figura 4.23 y error aceptable según lo expuesto en la tabla 4.16.

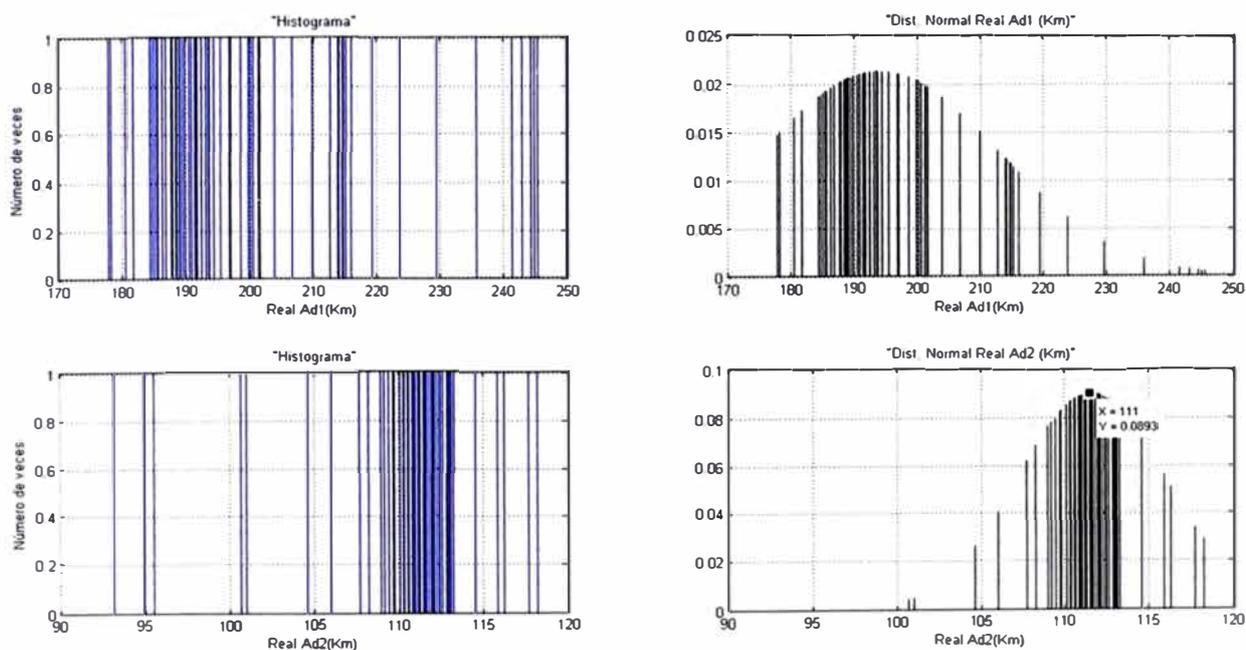


Figura 4.23 Histograma y Distribución de resultados – Caso L2232.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. El efecto que tiene el nivel de transposición de una línea en el cálculo de distancia de falla es que aumenta su error en casi 10 veces si una línea no tiene transposición. Según la tabla 4.2, la tabla 4.3, la tabla 4.8 y la tabla 4.9 los cálculos de distancia de falla en líneas transpuestas incurren en errores del orden de 200 a 300 metros (errores bajos), mientras que para líneas sin transposición los errores aumentan hasta ser de 2 a 3 kilómetros.
2. En configuraciones de línea simples el error en el cálculo de distancia de falla se incrementa a medida que aumenta la resistencia de falla y el punto de falla se aleja del extremo de envío. Por otro lado el error en el cálculo de distancia de falla para configuración de líneas paralela no tiene una relación directa con la resistencia de falla ni la distancia desde el punto de falla al extremo de envío.
3. Los errores de cálculo de resistencia de falla (Tabla 4.4 y Tabla 4.10) son bajos, tanto para líneas simples como paralelas. Estos cálculos de resistencia de falla son referenciales ya que solamente sirven para concluir si la impedancia de falla es alta o baja.
4. En los casos de fallas trifásicas los errores de cálculo de resistencia de falla (tabla 4.4 y tabla 4.10) con el uso de la red de secuencia incremental son muy altos, tanto para línea simple y paralela. Por lo tanto, para fallas trifásicas, se debe usar solamente la red de secuencia positiva en el cálculo de resistencia de falla.
5. El método de sincronización usado es el más adecuado para sincronizar señales desfasadas pues el error que se incurre en su uso es de aproximadamente 0.04% (tabla 4.6 y tabla 4.12), lo cual es muy bajo.
6. El efecto que tiene el nivel de de-sincronización entre las señales de envío y recepción en el error de cálculo de distancia de falla es que aumenta su valor en kilómetros de manera exponencial según se puede observar en la figura 4.14.
7. Los errores de cálculo de distancia de falla por secuencia negativa son menores que los cálculos por secuencia positiva para señales de-sincronizadas.
8. El valor imaginario de la distancia de falla (que idealmente es cero) aumenta a

medida que aumenta el error de cálculo de distancia de falla originado por la desincronización entre las señales de envío y recepción.

9. Los mejores niveles de resolución para la detección de transitorios en señales de corriente son los más bajos (nivel uno o nivel dos) y las funciones wavelet más adecuadas son las daubechies: db1, db3 y db5 y las biorthogonales: bior3.1y bior3.3.

Recomendaciones:

1. Se recomienda escoger el extremo de envío como aquel que aporte más corriente de falla, dado que de esta manera el punto de falla estará cercano al extremo de envío con lo cual se incurrirá en menores errores.
2. El método expuesto en el presente informe da como resultados los valores de distancia de falla por secuencia positiva y negativa, se recomienda escoger el resultado de cálculo que presente menor valor imaginario de distancia de falla.
3. Se recomienda usar el método expuesto para la localización de fallas en líneas aéreas de alta y extra alta tensión por ser un método que presenta bajos errores
4. Se recomienda profundizar el estudio del método de análisis multi-resolución en futuros trabajos de localización de fallas por ondas viajeras, ya que en el presente informe este método ha permitido obtener errores muy bajos y un análisis preciso de señales discretas en el dominio del tiempo.

ANEXO A
LISTADO DE SIMBOLOS

L	: Longitud total de la línea.
d	: Distancia desde el extremo de envío (E) hacia el punto de falla (F).
z_i	: Impedancia de la línea (Ω/Km), $i=1$ secuencia positiva e $i=2$ secuencia negativa.
y_i	: Admitancia de la línea (Ω/Km), $i=1$ secuencia positiva e $i=2$ secuencia negativa.
Z_{ci}	: Impedancia característica de la línea (Ω/Km), $i=1$ secuencia positiva e $i=2$ secuencia negativa
γ_i	: Constante de propagación de la línea $i=1$ secuencia positiva e $i=2$ secuencia negativa
z_0	: Impedancia de secuencia cero de la línea 1 (Ω/Km).
y_0	: Admitancia de secuencia cero de la línea 1 (Ω/Km).
z_{0m}	: Impedancia mutua secuencia cero entre las líneas 1 y 2(Ω/Km).
y_{0m}	: Admitancia mutua secuencia cero entre las líneas 1 y 2(Ω/Km).
U_{E1}, I_{E1}	: Tensión y corriente en el extremo de envío de la línea 1 en la red de secuencia positiva.
U_{E2}, I_{E2}	: Tensión y corriente en el extremo de envío de la línea 1 en la red de secuencia negativa.
U_{E0}, I_{E0}	: Tensión y corriente en el extremo de envío de la línea 1 en la red de secuencia cero.
U_{F0}, I_{F0}	: Tensión y corriente en el punto de falla de la línea 1 en la red de secuencia cero.
U_{2F0}, I_{2F0}	: Tensión y corriente en el punto de falla de la línea 2 en la red de secuencia cero.
U_{R1}, I_{R1}	: Tensión y corriente en el extremo de recepción de la línea 1 en la red de secuencia positiva.
U_{R2}, I_{R2}	: Tensión y corriente en el extremo de recepción de la línea 1 en la red de secuencia negativa.
U_{R0}, I_{R0}	: Tensión y corriente en el extremo de recepción de la línea 1 en la red de secuencia cero.
U_{DR1}, I_{DR1}	: Tensión y corriente en el extremo de recepción de la línea 1 en la red incremental de secuencia positiva.
U_{DE1}, I_{DE1}	: Tensión y corriente en el extremo de envío de la línea 1 incremental de secuencia positiva.

ANEXO B
ROTACION DE LA FASE "B" EN 120 GRADOS

Rotación de la fase "B" en 120 grados

Objetivo

El objetivo del presente anexo es exponer las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial, siendo el sistema equivalente el sistema resultante de trasladar la fase B a la posición referencia (fase A').

Desarrollo

El traslado de la fase B del sistema inicial hacia la posición de referencia del sistema equivalente (fase A') se consigue desfasando el fasor B 120° en sentido horario. Al realizar esto se tendrá que desfasar los fasores A y C en la misma dirección:

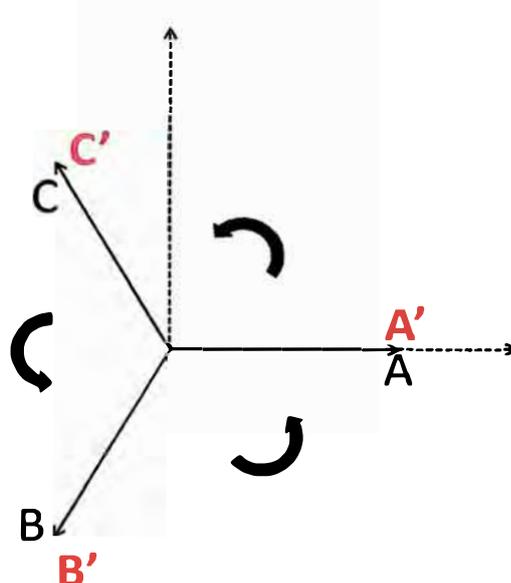


Figura 0.1 Traslado de la fase B desde el sistema inicial hacia la posición referencia fase A' del sistema equivalente (en rojo).

Matemáticamente esto se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} IA' &= a * IB \\ IB' &= a * IC \end{aligned} \quad (b. 1)$$

$$\begin{aligned} IC' &= a * IA \\ VA' &= a * VB \\ VB' &= a * VC \end{aligned} \quad (b. 2)$$

$$VC' = a * VA$$

Los fasores del sistema inicial en secuencia positiva, negativa y cero cumplen la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} IA \\ IB \\ IC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA0 \\ IA1 \\ IA2 \end{bmatrix} \quad (b. 3)$$

$$\begin{bmatrix} VA \\ VB \\ VC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA0 \\ VA1 \\ VA2 \end{bmatrix} \quad (b. 4)$$

Asimismo en el punto de falla los fasores del sistema equivalente en secuencia positiva, negativa y cero cumplen la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} IA0' \\ IA1' \\ IA2' \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA' \\ IB' \\ IC' \end{bmatrix} \quad (b. 5)$$

$$\begin{bmatrix} VA0' \\ VA1' \\ VA2' \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA' \\ VB' \\ VC' \end{bmatrix} \quad (b. 6)$$

Entonces, para las corrientes tenemos que reemplazando la ecuación (b. 5) en las relaciones de las ecuaciones (b. 1) y (b. 3).

$$\begin{bmatrix} IA0' \\ IA1' \\ IA2' \end{bmatrix} = \frac{a}{3} * \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 * a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 * a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA0 \\ IA1 \\ IA2 \end{bmatrix} \quad (b. 7)$$

Análogamente para las tensiones:

$$\begin{bmatrix} VA0' \\ VA1' \\ VA2' \end{bmatrix} = \frac{a}{3} * \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 * a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 * a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA0 \\ VA1 \\ VA2 \end{bmatrix} \quad (b. 8)$$

Aplicando en análisis en el punto de falla tendremos que:

$$\begin{aligned} IA1 &= IF1 \\ IA2 &= IF2 \end{aligned} \quad (b. 9)$$

$$\begin{aligned} IA0 &= IF0 \\ IA1' &= IF1 \\ IA2' &= IF2 \end{aligned} \quad (b. 10)$$

$$IA0' = IF0$$

Entonces aplicando las relaciones (b. 9) y (b. 10) en las ecuaciones (b. 7) y (b. 8), se concluye que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (b. 11)$$

$$\begin{bmatrix} VF0' \\ VF1' \\ VF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VF0 \\ VF1 \\ VF2 \end{bmatrix} \quad (b. 12)$$

ANEXO C
ROTACIÓN DE LA FASE "C" EN 240 GRADOS

Rotación de la fase "C" en 240 grados

Objetivo:

El objetivo del presente anexo es exponer las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial, siendo el sistema equivalente el sistema resultante de trasladar la fase C a la posición referencia (fase A').

Desarrollo

El traslado de la fase C del sistema inicial hacia la posición de referencia del sistema equivalente (fase A') se consigue desfasando el fasor C 120° en sentido anti horario o 240° en sentido horario. Al realizar esto se tendrá que desfasar los fasores B y A en la misma dirección:

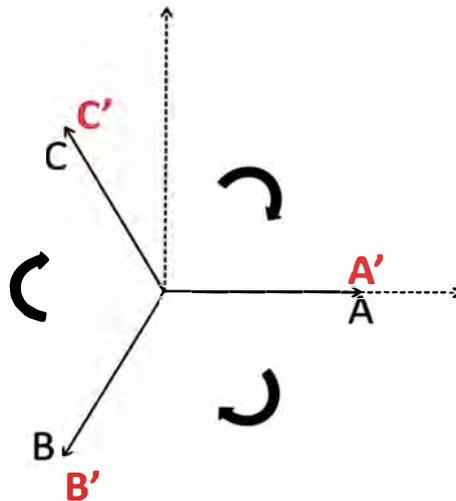


Figura C.1 Traslado de la fase C desde el sistema inicial hacia la posición referencia fase A' del sistema equivalente (en rojo).

Matemáticamente esto se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} IA' &= a^2 * IC \\ IB' &= a^2 * IA \end{aligned} \quad (c. 1)$$

$$\begin{aligned} IC' &= a^2 * IB \\ VA' &= a^2 * VC \\ VB' &= a^2 * VA \\ VC' &= a^2 * VB \end{aligned} \quad (c. 2)$$

Los fasores del sistema inicial en secuencia positiva, negativa y cero cumplen la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} IA \\ IB \\ IC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA0 \\ IA1 \\ IA2 \end{bmatrix} \quad (c. 3)$$

$$\begin{bmatrix} VA \\ VB \\ VC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA0 \\ VA1 \\ VA2 \end{bmatrix}. \quad (c. 4)$$

Asimismo en el punto de falla los fasores del sistema equivalente en secuencia positiva, negativa y cero cumplen la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} IA0' \\ IA1' \\ IA2' \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA' \\ IB' \\ IC' \end{bmatrix} \quad (c. 5)$$

$$\begin{bmatrix} VA0' \\ VA1' \\ VA2' \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA' \\ VB' \\ VC' \end{bmatrix} \quad (c. 6)$$

Entonces, para las corrientes tenemos que reemplazando la ecuación(c. 5) en las relaciones de las ecuaciones(c. 1) y (c. 3):

$$\begin{bmatrix} IA0' \\ IA1' \\ IA2' \end{bmatrix} = \frac{a^2}{3} * \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 * a & 0 \\ 0 & 0 & 3 * a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IA0 \\ IA1 \\ IA2 \end{bmatrix} \quad (c. 7)$$

Análogamente para las tensiones:

$$\begin{bmatrix} VA0' \\ VA1' \\ VA2' \end{bmatrix} = \frac{a^2}{3} * \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 * a & 0 \\ 0 & 0 & 3 * a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA0 \\ VA1 \\ VA2 \end{bmatrix} \quad (c. 8)$$

Aplicando las ecuaciones a las redes de secuencia en una falla monofásica:

$$\begin{aligned} IA1 &= IF1 \\ IA2 &= IF2 \end{aligned} \quad (c. 9)$$

$$\begin{aligned} IA0 &= IF0 \\ IA1' &= IF1 \\ IA2' &= IF2 \end{aligned} \quad (c. 10)$$

$$IA0' = IF0$$

Entonces aplicando las relaciones (b. 9)(c. 9) y (c. 10) en las ecuaciones(c. 7) y (c. 8), se concluye que las relaciones entre las corrientes y tensiones de secuencia positiva, negativa y cero del sistema equivalente y el sistema inicial son dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} IF0' \\ IF1' \\ IF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} IF0 \\ IF1 \\ IF2 \end{bmatrix} \quad (c. 11)$$

$$\begin{bmatrix} VF0' \\ VF1' \\ VF2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^3 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VF0 \\ VF1 \\ VF2 \end{bmatrix} \quad (c. 12)$$

ANEXO D
ELABORACIÓN DE ARCHIVOS COMTRADE PARA EL CASO DE ESTUDIO DE LÍNEA
SIMPLE

Elaboración de Archivos Comtrade para el caso de estudio de línea simple

Objetivo

Definir y elaborar los casos de simulaciones en el programa DigsilentPower Factory a fin de evaluar la exactitud del localizador de fallas expuesto en el Informe de suficiencia para el caso de líneas simples.

Metodología

Para elaborar el presente informe se analizó la configuración de la línea L-1008 (Tintaya–Callalli), y su relación con el sistema eléctrico interconectado nacional. Se generaran los archivos comtrade usando el programa DigsilentPower Factory, siendo el proyecto “Titulación Ingeniero”, en donde se modelará la configuración de línea simple. El modelamiento de la configuración se hizo generando el caso de estudio “Caso Líneas Paralelas” en el proyecto.

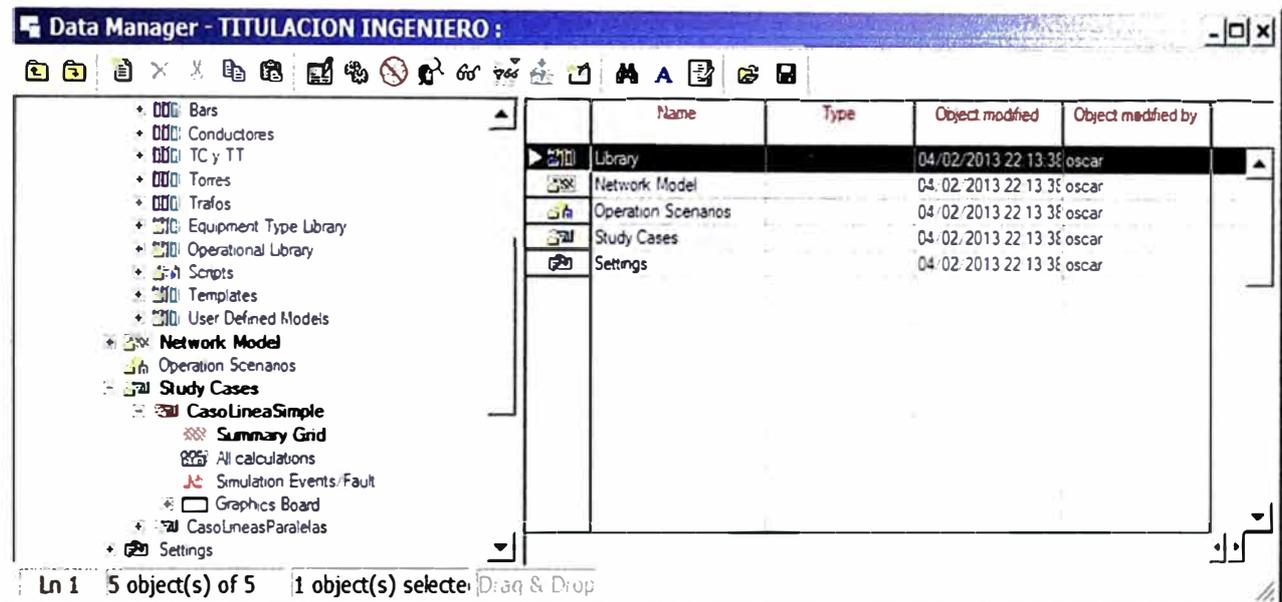


Figura D.1 Proyecto “TITULACIÓN INGENIERO” en Digsilent.

Casos simulados

Para definir los casos a simular se analiza la configuración de la línea, el diagrama unifilar se presenta en figura D.2. Por otro lado, en la tabla D.2 se detalla los casos simulados con en el programa DigsilentPower Factory que serán usados como datos de entradas para evaluar la exactitud del programa localizador de fallas.

Modelamiento:

El modelamiento de la línea L-1008 fue elaborado según a la información existente:

Tabla D.1 Datos de los Conductores

L-1008	SE Tintaya	SE Callalli	96.323	659	ASCR 281 mm ²	Simple Circuito Disposicion Vertical
--------	------------	-------------	--------	-----	--------------------------	--

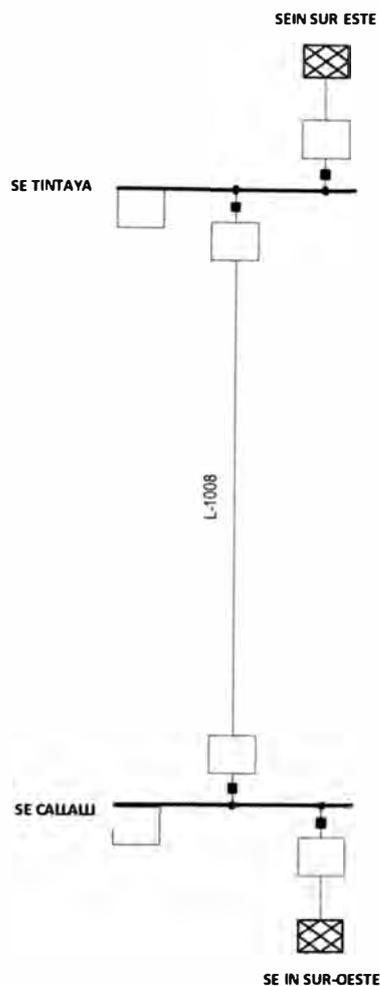
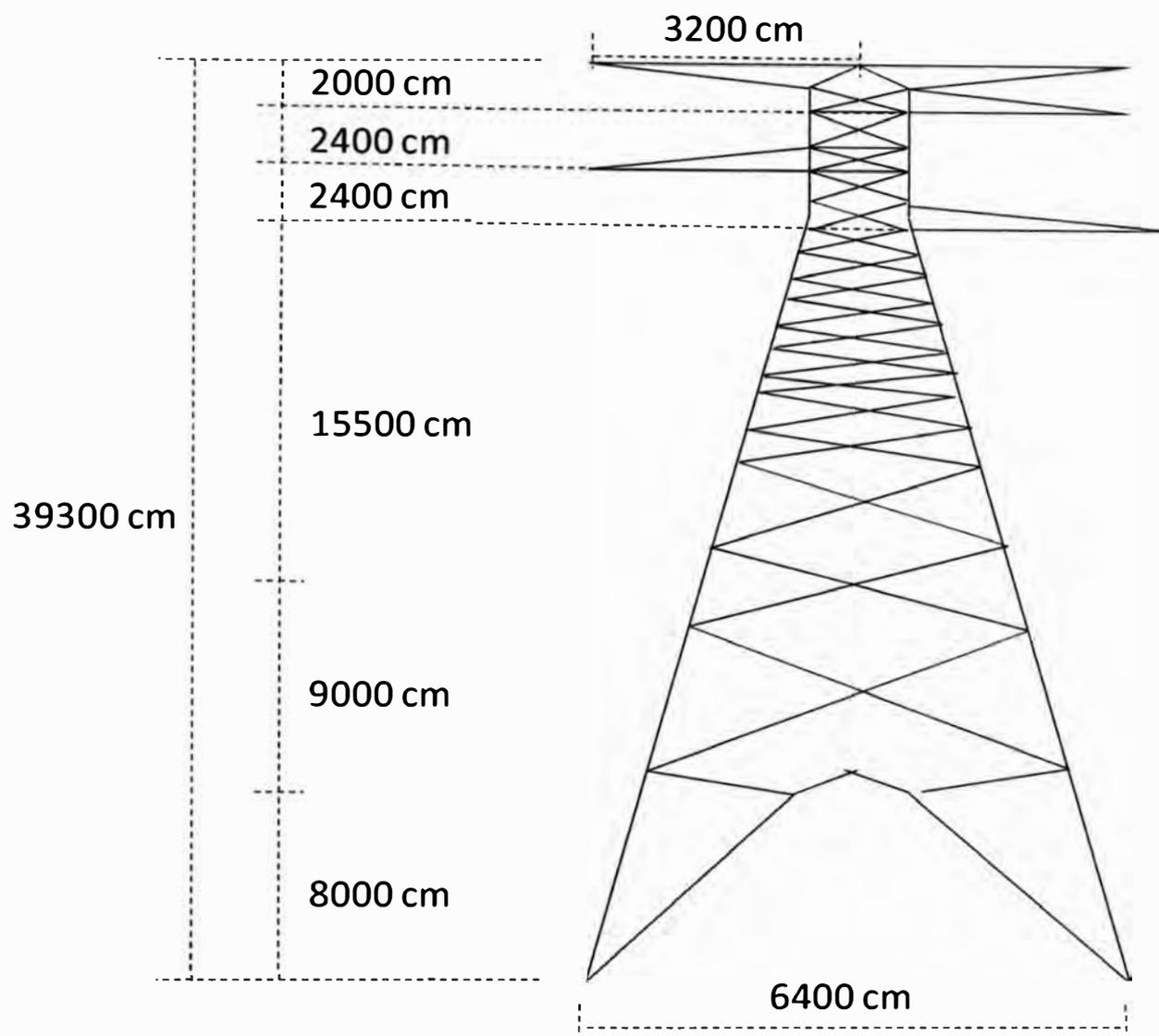


Figura D.2 Diagrama Unifilar de Interés.

Tabla D.1 Casos simulados

LINEA	Ubicación desde Tintaya (%)	Ubicación desde Tintaya (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Tiempo prefalla (ms)	Tiempo Simulación (ms)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Nombre de archivo
L-1008	10%	9.63	A-N	5	250	500	1200	CASO1.cfg
L-1008	50%	48.16	A-N	5	250	500	1200	CASO2.cfg
L-1008	90%	86.69	A-N	5	250	500	1200	CASO3.cfg
L-1008	10%	9.63	A-N	50	250	500	1200	CASO4.cfg
L-1008	50%	48.16	A-N	50	250	500	1200	CASO5.cfg
L-1008	90%	86.69	A-N	50	250	500	1200	CASO6.cfg
L-1008	10%	9.63	A-N	100	250	500	1200	CASO7.cfg
L-1008	50%	48.16	A-N	100	250	500	1200	CASO8.cfg
L-1008	90%	86.69	A-N	100	250	500	1200	CASO9.cfg
L-1008	10%	9.63	A-B-C	5	250	500	1200	CASO10.cfg
L-1008	50%	48.16	A-B-C	50	250	500	1200	CASO11.cfg
L-1008	90%	86.69	A-B-C	100	250	500	1200	CASO12.cfg
L-1008	10%	9.63	B-C	5	250	500	1200	CASO13.cfg
L-1008	50%	48.16	B-C	50	250	500	1200	CASO14.cfg
L-1008	90%	86.69	B-C	100	250	500	1200	CASO15.cfg
L-1008	10%	9.63	B-C-N	5	250	500	1200	CASO16.cfg
L-1008	50%	48.16	B-C-N	50	250	500	1200	CASO17.cfg
L-1008	90%	86.69	B-C-N	100	250	500	1200	CASO18.cfg



**Figura D.3 Disposición de las estructuras.
Circuito simple disposición vertical**

ANEXO E
ELABORACIÓN DE ARCHIVOS COMTRADE PARA EL CASO DE ESTUDIO DE
LÍNEA PARALELA

Elaboración de archivos comtrade para el caso de estudio de línea paralela.

Objetivo

Definir y elaborar los casos de simulaciones en el programa DigsilentPower Factory a fin de evaluar la exactitud del localizador de fallas expuesto en el Informe de suficiencia para el caso de líneas paralelas.

Metodología

Para elaborar el presente informe se analizó la configuración de las líneas L-2238 (Chiclayo – Piura Oeste), L-2239 (Chiclayo – La Niña) y L-2241 (La Niña – Piura Oeste) y su relación con el sistema eléctrico interconectado nacional.

Se generaran los archivos comtrade usando el programa DigsilentPower Factory, siendo el proyecto “Titulación Ingeniero”, en donde se modelará la configuración de línea paralela.

El modelamiento de la configuración se hizo generando el caso de estudio “Caso Líneas Paralelas” en el proyecto.

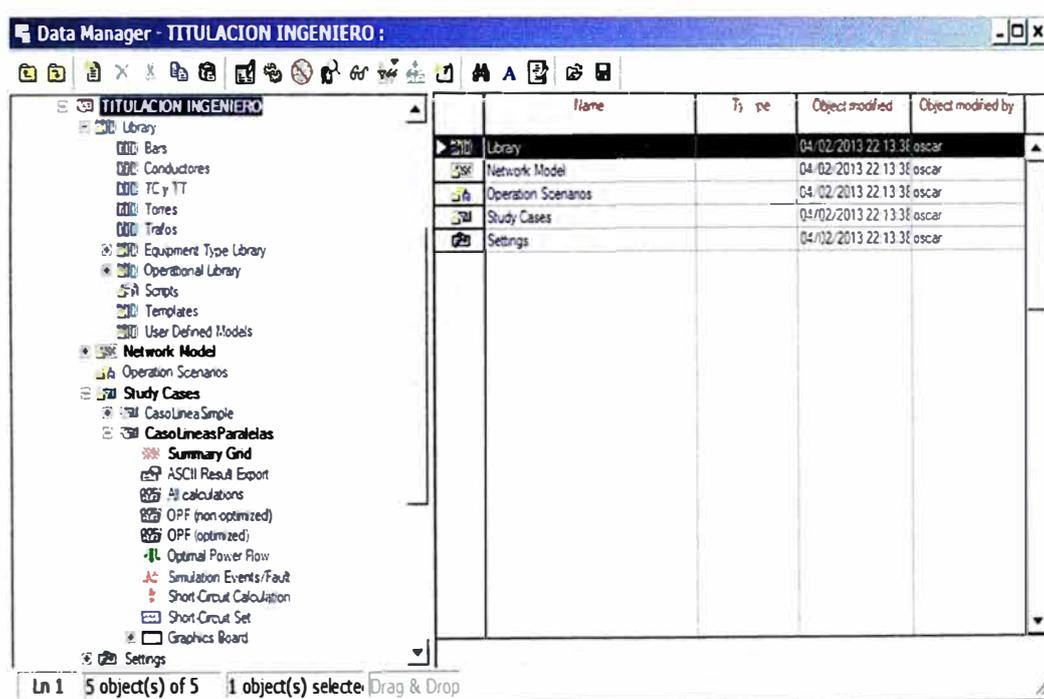


Figura E.1 Proyecto “TITULACIÓN INGENIERO” en Digsilent.

Casos simulados

Para definir los casos a simular se analiza la configuración de las líneas, el diagrama unifilar se presenta en figura E.2

Por otro lado en la tabla E.1 se detalla los casos simulados con en el programa DigsilentPower Factory que serán usados como datos de entradas para evaluar la exactitud del programa localizador de fallas.

Modelamiento

El modelamiento en detalle de las líneas L-2238, L-2239, L2241 y el transformador

de potencia en la subestación La Niña fueron elaborados de acuerdo a la información existente (Tabla E.2):

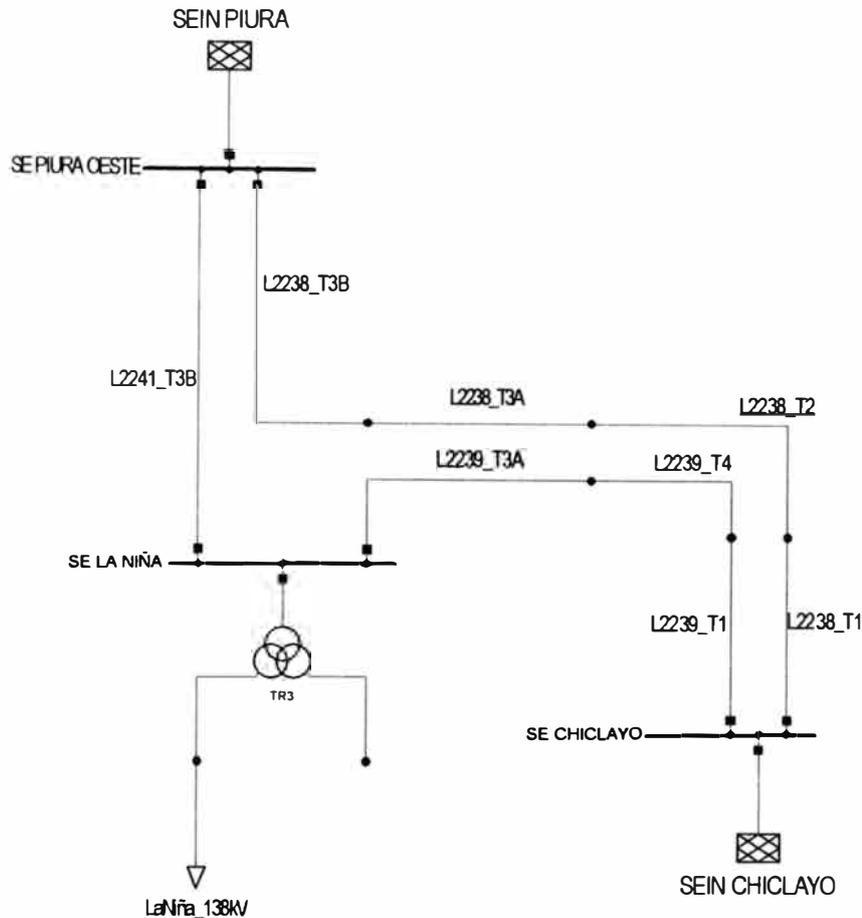


Figura E.2 Diagrama Unifilar de Interés.

Tabla E.1 Casos Simulados

LINEA	Ubicación desde Chiclayo (%)	Ubicación desde Chiclayo (Km)	Tipo de falla	R de falla (Ohm)	Tiempo prefalla (ms)	Tiempo Simulación (ms)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Nombre de archivo
L-2238	10%	21.12	R-N	5	250	500	1200	CASO1.cfg
L-2238	50%	105.60	R-N	5	250	500	1200	CASO2.cfg
L-2238	90%	190.08	R-N	5	250	500	1200	CASO3.cfg
L-2238	10%	21.12	R-N	50	250	500	1200	CASO4.cfg
L-2238	50%	105.60	R-N	50	250	500	1200	CASO5.cfg
L-2238	90%	190.08	R-N	50	250	500	1200	CASO6.cfg
L-2238	10%	21.12	R-N	100	250	500	1200	CASO7.cfg
L-2238	50%	105.60	R-N	100	250	500	1200	CASO8.cfg
L-2238	90%	190.08	R-N	100	250	500	1200	CASO9.cfg
L-2238	10%	21.12	R-S-T	5	250	500	1200	CASO10.cfg
L-2238	50%	105.60	R-S-T	50	250	500	1200	CASO11.cfg
L-2238	90%	190.08	R-S-T	100	250	500	1200	CASO12.cfg
L-2238	10%	21.12	S-T	5	250	500	1200	CASO13.cfg
L-2238	50%	105.60	S-T	50	250	500	1200	CASO14.cfg
L-2238	90%	190.08	S-T	100	250	500	1200	CASO15.cfg
L-2238	10%	21.12	S-T-N	5	250	500	1200	CASO16.cfg
L-2238	50%	105.60	S-T-N	50	250	500	1200	CASO17.cfg
L-2238	90%	190.08	S-T-N	100	250	500	1200	CASO18.cfg

Tabla E.2 Datos de los conductores

Nombre de la Línea	Tramo		Long. Tramos [km]	Long. / línea [km]	nominal [A]	Conductor por terna	Estructura
	Inicia	Termina					
Cto 2 TORRES METALICAS (Tramo 1)	SE Chiclayo	T59	27		472	ACAR 442.7 mm2	Doble circuito disposición vertical
Cto 2 POSTES DE MADERA (Tramo 4)	T59	T322	71.2	122.407	472	ACAR 442.7 mm2	Circuito sencillo disposición horizontal
Cto 2 TORRES METALICAS (Tramo 3A)	T322	T374 (SE La Niña)	24.3		472	ACAR 442.7 mm2	Doble circuito disposición vertical
Cto 2 TORRES METALICAS (Tramo 3B)	T374 (SE La Niña)	SE Piura	88.7	88.721	472	ACAR 442.7 mm2	Doble circuito disposición vertical
Cto 1 TORRES METALICAS (Tramo 1)	SE Chiclayo	T59	27		472	ACAR 405 mm2	Doble circuito disposición vertical
Cto 1 POSTES DE MADERA (Tramo 2)	T59	T322	71.3	211.279	472	ACAR Aero Z455 mm2	Circuito sencillo disposición horizontal
Cto 1 TORRES METALICAS (Tramo 3A)	T322	T374	24.3		472	ACAR 405 mm2	Doble circuito disposición vertical
Cto 1 TORRES METALICAS (Tramo 3B)	T374	SE Piura	88.7		472	ACAR 405 mm2	Doble circuito disposición vertical

Doble circuito disposición vertical

Circuito sencillo disposición horizontal

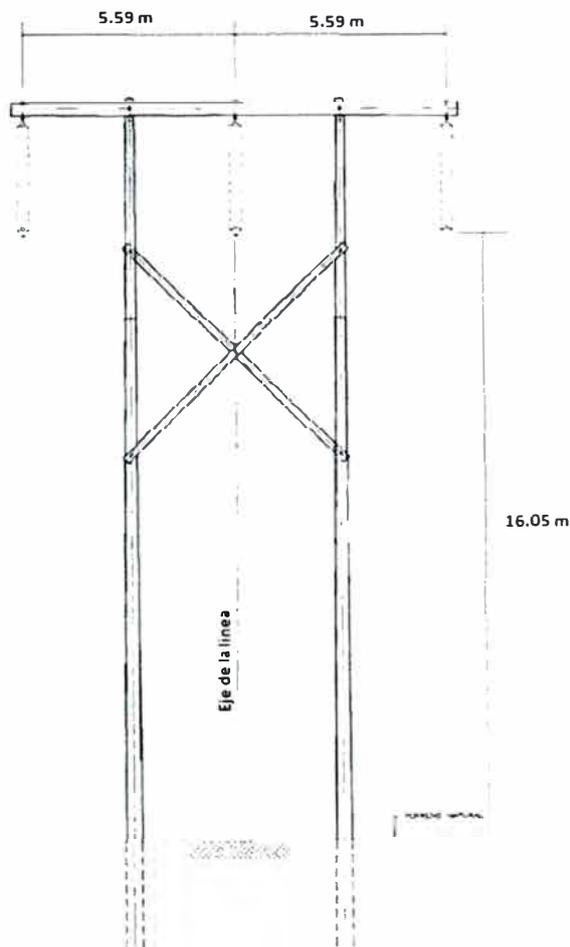
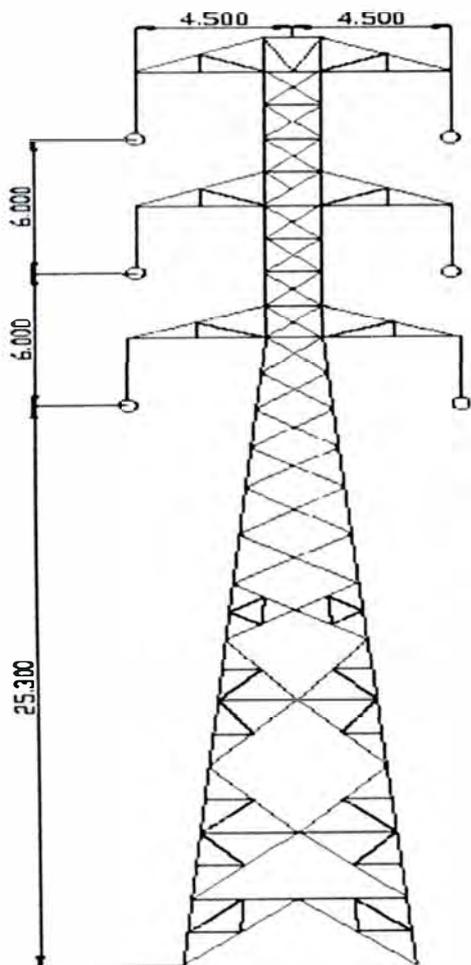


Figura E.3 Disposición de las estructuras

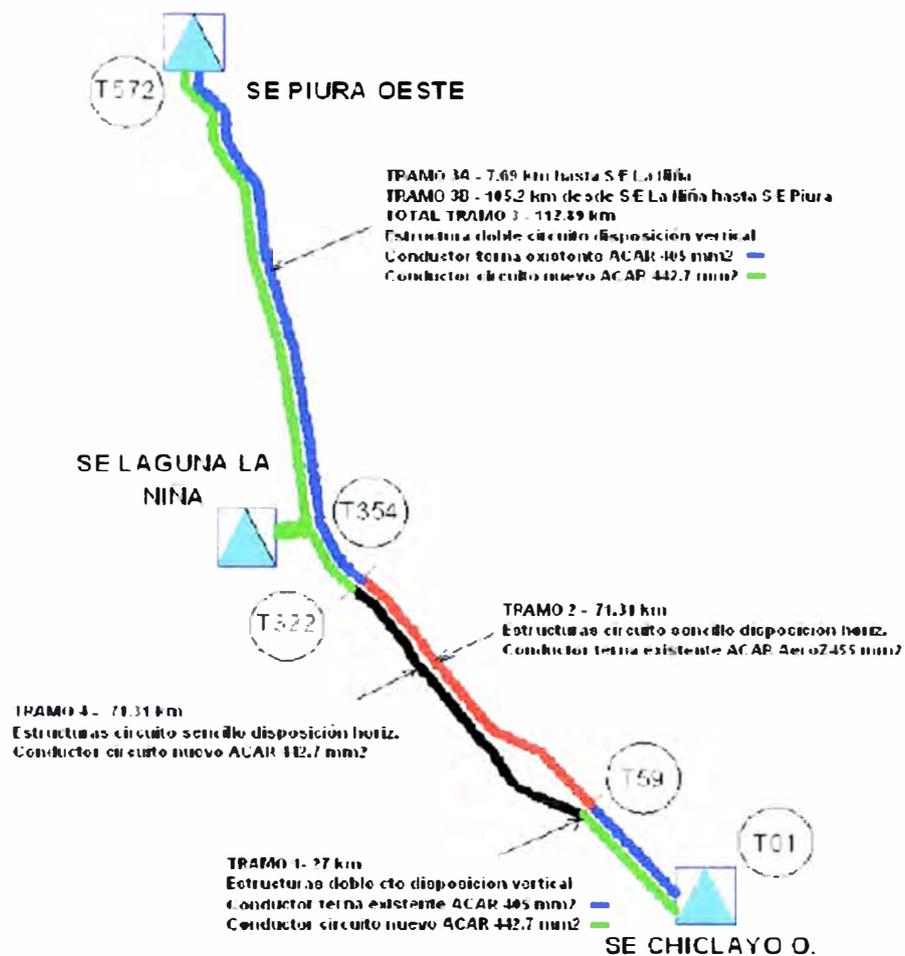


Figura E.4 Trazo de ruta del sistema de interés.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.T. Johns, S. Jamali. "Accurate Fault Location Technique For Power Transmission Lines" , IEEE Proceedings, Vol 137, Pt. C, No, 6, 1990.
- [2] IEEE Std C37.111-1999 IEEE Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for power systems.
- [3] Arun G .Phadke and James S. Thorp. "Computer Relaying for Power System" Second Edition, Jhon Wiley & Sons, USA.
- [4] C.L.Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," AIEE Trans., Vol. 37, Pt. II, pp. 1027-1140, 1998.
- [5] N. Kang, Y. Liao, "Equivalent PI Circuit for Zero-sequence Double Circuit Transmission Lines," 2012.
- [6] J. Izykowsky, E. Rosolowskiy M.M. Saha, "Accurate noniterative Fault Location Algorithm Utilizing two end Unsynchronized Measurement," IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 1, Jan. 2010.
- [7] P. G. McLaren, G. W. Swift, Z. Zhang, E. Dirks, R. P. Jayasinghe, and I. Fernando, "A new positive sequence directional element for numerical distance relays," IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 2, pp. 666–675, Apr. 1995.
- [8] M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski. "Fault Location on Power Networks". Springer-Verlag London Limited 2010.
- [9] M. A. Beg, M. K. Khedkar, S. R. Paraskar, G. M. Dhole, "A Novel Clarke Wavelet Transform Method to Classify Power System Disturbances," International Journal on Technical And Physical Problems of Engineering, vol. 2, no. 4, Dec 2010.
- [10] Ibrahim D.k, Aboul-Zahab E.M, Saleh, S.M. "High impedance fault detection in EHV series compensated lines using the wavelet transform," Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES.
- [11] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. Poggi. "Wavelet Toolbox User's Guide," Version 1, The Math Works, Inc.
- [12] Geraldo Kindermann, "Capítulo 7: Cortocircuito en el Sistema Eléctrico". Universidad Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil. Publicación del Autor 2010.

- [13] S Lawrence, "Estimating group delay and Phase Delay via discrete time "Analytic" Cross-Correlation," IEEE Trans. On Signal Processing, vol. 47, no. 9, Sept. 1999.
- [14] Geraldo Kindermann, "Capitulo 7: Cortocircuito en el Sistema Eléctrico".Universidad Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil. Publicación del Autor 2010.