

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“SIMULACIÓN DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN DE POTENCIA EN RELÉS DE DISTANCIA”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

JHONY FERNANDO CHAPI LUCERO

joh_dc@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ANTONIO FONSECA MSc.

afonseca@transelectric.com.ec

Quito, Marzo 2012

DECLARACIÓN

Yo Jhony Fernando Chapi Lucero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jhony Fernando Chapi Lucero

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jhony Fernando Chapi Lucero, bajo mi supervisión.

Ing. Antonio Fonseca MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a la Virgencita de las Lajas por guiarme en el camino diario, brindarme salud y sabiduría.

A mis padres Galo y Oliva, sin su apoyo esta meta no hubiera sido alcanzada, los respeto, los admiro y los quiero. Esta alegría la debo a ustedes.

A mis abuelitos, a mis hermanas, a toda mi familia, por sus consejos y apoyo incondicional.

Un agradecimiento especial al MSc. Antonio Fonseca por su paciencia, calidad humana, dedicación y el apoyo brindado al realizar este proyecto de titulación. Ha sido un mentor y un amigo.

A todo el personal profesional y humano que conforman la Gerencia de Operación y Mantenimiento de CELEC EP. – Transelectric, gracias por ser una guía durante la realización de este proyecto.

A mis amig@s que son y serán parte de mi mundo.

DEDICATORIA

*A mis padres y hermanas,
quienes me brindan su confianza, apoyo y amor.*

CONTENIDO

CONTENIDO	VI
RESUMEN.....	XVII
PRESENTACIÓN	XIX

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO	1
1.1.- GENERALIDADES.....	1
1.1.1.- PERTURBACIONES GRANDES	1
1.1.2.- PERTURBACIONES PEQUEÑAS	1
1.2.- ESTABILIDAD ANGULAR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	2
1.2.1.- RELACIÓN ENTRE POTENCIA Y ÁNGULO	3
1.2.2.- OSCILACIONES DE POTENCIA EN EL SEP.....	5
1.2.2.1.- OSCILACIÓN DE POTENCIA ESTABLE	6
1.2.2.2.- OSCILACIÓN DE POTENCIA INESTABLE.....	7
1.3.- EFECTO DE LAS OSCILACIONES DE POTENCIA EN LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA.....	7
1.3.1- RELÉ DE DISTANCIA	7
1.3.1.1.- CRITERIOS DE CALIBRACIÓN DEL RELÉ DE DISTANCIA	9
1.3.1.2.- ZONA 3 Y POTENCIA DE CARGA	9
1.3.1.3.- CALCULO DE LA IMPEDANCIA EN VALORES SECUNDARIOS.....	10
1.3.1.4.- TIEMPOS DE DESPEJE DE LA FALLA	11
1.3.2.- FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN DE LOS RELÉS DE DISTANCIA ANTE OSCILACIONES DE POTENCIA.....	11
1.3.2.1.- PSB: Bloqueo por oscilación de potencia	13
1.3.2.2.- OST: Disparo por oscilación de potencia.....	13
1.4.- VARIACIÓN DE LA IMPEDANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA	13
1.4.1.- CENTRO ELÉCTRICO	18
1.5.- MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE LA OSCILACIÓN DE POTENCIA	19
1.5.1.- MÉTODO CONVENCIONAL.....	19
1.5.1.1.- CARACTERÍSTICAS CONCÉNTRICAS	19
1.5.1.2.- CARACTERÍSTICA CON CERCOS (BLINDER) (10)	20
1.5.1.3.- PROBLEMAS DE AJUSTES DE LAS CARACTERÍSTICAS CONCÉNTRICAS Y CON CERCOS (BLINDER) (10)	21

1.5.2.- CENTRO DE OSCILACIÓN - SCV (SWING CENTER VOLTAGE) (10).....	22
1.5.3.- MÉTODO DE COMPONENTES SUPERPUESTAS (12)	24
1.5.3.1.- COMPONENTES SUPERPUESTAS.....	24
1.5.3.2.- CÁLCULO DE LAS COMPONENTES SUPERPUESTAS	25
1.5.3.3.- DETECCIÓN DE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA	26
1.6.- FORMATO COMÚN ESTANDAR PARA INTERCAMBIO DE DATOS TRANSITORIOS (COMTRADE) PARA SISTEMAS DE POTENCIA (IEE Std C37.111- 1999) (13)	27
1.6.1.- ARCHIVOS COMTRADE.....	28
1.6.1.1.- ARCHIVO HEADER (xxxxxxx.HDR)	28
1.6.1.2.- ARCHIVO CONFIGURATION (xxxxxxx.CFG)	28
1.6.1.3.- ARCHIVO DATA (xxxxxxx.DAT).....	29
1.6.1.4.- ARCHIVO INFORMATION (xxxxxxx.INF).....	29

CAPITULO II

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DIGITAL.....	30
2.1.- RELÉS DIGITALES.....	30
2.2.- MÉTODO QUE UTILIZA EL RELÉ SIEMENS 7SA6 PARA DETECTAR UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA (6).....	30
2.2.1.- BLOQUE SEÑAL DE DISPARO	32
2.2.2.- BLOQUE IMPEDANCIA EN LA ZONA DE OPERACIÓN PPOL	32
2.2.3.- BLOQUE CONTINUIDAD DEL TRAYECTO	33
2.2.4.- BLOQUE MONOTONÍA DEL TRAYECTO.....	33
2.2.5.- BLOQUE SIMETRÍA DEL TRAYECTO	34
2.2.6.- BLOQUE ESTABILIDAD DEL TRAYECTO.....	34
2.2.7.- BLOQUE CONTROL DEL TRAYECTO OST	35
2.3.- LÓGICA DE BLOQUEO POR OSCILACIÓN DE POTENCIA (PSB) DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN DEL RELÉ SIEMENS 7SA6 (6).....	36
2.4.- LÓGICA DE DISPARO POR OSCILACIÓN DE POTENCIA INESTABLE (OST) DEL RELÉ SIEMENS 7SA6 (6).....	37
2.5.- IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DIGITAL DEL RELÉ SIEMENS 7SA6 PARA LA DETECCIÓN DE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA	37
2.5.1.- INGRESO DE DATOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE	40
2.5.2.- INGRESO DE DATOS GENERALES DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN.....	40
2.5.3.- INGRESO DE DATOS DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN DEL RELÉ	42
2.5.4.- RESULTADOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN.....	43

2.5.5.- GRÁFICOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN	44
2.6.- DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA SUBROUTINA DE PROGRAMACIÓN	45
2.6.1.- PRESENTACION.m	45
2.6.2.- FUNCIONDEOSCILACION.m.....	45
2.6.3.- ARCHIVO.m	46
2.6.4.- PRINCIPAL.m.....	46
2.6.5.- IMPEDANCIA_EN_POLP.m	47
2.6.6.- CONTINUIDAD_DEL_TRAYECTO.m.....	50
2.6.6.1.- DETERMINACIÓN DEL VALOR UMBRAL.....	51
2.6.7.- MONOTONIA_DEL_TRAYECTO.m.....	57
2.6.8.- ESTABILIDAD_DEL_TRAYECTO.m	59
2.6.9.- FUNCIONOST.m	62
2.7.- METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN CON LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN FORDI 1.0	63

CAPITULO III

APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE OSCILACIONES DE POTENCIA.....	64
3.1.- POWER FACTORY DE DIgSILENT	64
3.2.- MÉTODOS DE CÁLCULO DEL MÓDULO DE ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS	65
3.2.1.- TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS (EMT).....	65
3.2.2.- TRANSITORIOS ELECTROMECÁNICOS (RMS).....	65
3.3.- SIMULACIÓN CON EL MÓDULO DE ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMECÁNICOS (RMS) DEL SOFTWARE POWER FACTORY DE DIgSILENT	66
3.4.- OBTENER ARCHIVOS COMTRADE A TRAVÉS DEL SOFTWARE POWER FACTORY – DIGSILENT	70
3.5.- SIMULACIÓN DEL RELÉ DE DISTANCIA Y ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMECÁNICOS EN POWER FACTORY – DIgSILENT	74
3.6.- CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN CON LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN FORDI 1.0	75
3.6.1.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA ESTABLE.....	76
3.6.1.1.- GRAFICO R-X (RESISTENCIA – REACTANCIA)	76
3.6.1.2.- GRAFICO R-X-T (RESISTENCIA – REACTANCIA-TIEMPO)	77
3.6.1.3.- GRAFICO VELOCIDAD DE LA IMPEDANCIA CON LA QUE CRUZA LA CARACTERÍSTICA PPOL.....	78

3.6.1.4.- TABLA DE RESULTADOS	80
3.6.1.5.- VARIACIÓN DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN.....	80
3.6.2.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA INESTABLE	81
3.6.3.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA FALLA SIMÉTRICA	84
3.6.4.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA FALLA ASIMÉTRICA.....	86

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
4.1.- CONCLUSIONES	87
4.2.- RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA.....	90

ANEXOS

ANEXO A

SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS	A-1
A.1.- DEFINICIÓN DE EVENTOS POWER FACTORY	A-1
A.2.- DEFINICIÓN DE VARIABLES A SER MONITOREADAS	A-4
A.3.- DEFINICIÓN DE LOS GRÁFICOS PARA OBSERVAR LAS VARIABLES QUE SON MONITOREADAS	A-6
A.4.- SIMULACIÓN DE EVENTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	A-9

ANEXO B

SIMULACIÓN DEL RELÉ DE DISTANCIA EN POWER FACTORY.....	B-1
B.1.- INGRESAR TRANSFORMADOR DE CORRIENTE EN POWER FACTORY.....	B-1
B.2.- INGRESAR TRANSFORMADOR DE POTENCIAL EN POWER FACTORY.....	B-3
B.3.- INGRESAR RELÉ DE DISTANCIA EN POWER FACTORY	B-3
B.4.- GRÁFICA DE LA IMPEDANCIA QUE MIDE EL RELÉ DURANTE UNA SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS (RMS)	B-6

ANEXO C

IMPEDANCIA CALCULADA POR EL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA ESTABLE.....	C-1
--	-----

C.1.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 3 Y PROTEGE LA L/T 34 – R34-3	C-1
C.2.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 3 Y PROTEGE LA L/T 34 – R34-4	C-2
C.3.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 4 Y PROTEGE LA L/T 45 – R45-4	C-3
C.4.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 5 Y PROTEGE LA L/T 45 – R45-5	C-4
C.5.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 3 Y PROTEGE LA L/T 35 – R35-3	C-5
C.6.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 5 Y PROTEGE LA L/T 35 – R35-5	C-6

ANEXO D

MANUAL DEL USUARIO.....	D-1
D.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	D-1
D.2.- REQUERIMIENTO DEL SOFTWARE Y DEL HARDWARE.....	D-1
D.3.- ACCESO Y EJECUCIÓN DEL PROGRAMA	D-1
D.3.1.- INGRESO DE LOS ARCHIVOS COMTRADE	D-4
D.3.2.- INGRESO DE DATOS DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN.....	D-5
D.3.3.- INGRESO DE DATOS DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN DEL RELÉ	D-6
D.3.4.- RESULTADOS DE FORDI 1.0.....	D-7
D.3.5.- GRÁFICOS QUE SE MUESTRAN DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN.....	D-9
D.3.6.- COMPLEMENTOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN FORDI 1.0	D-9

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1- 1. Modelo idealizado de un SEP sencillo.....	3
Figura 1- 2. Diagrama fasorial (3).....	3
Figura 1- 3. Relación Potencia - Angulo.....	5
Figura 1- 4. Respuesta del ángulo de rotor de una maquina sincrónica ante una perturbación transitoria (3).....	6
Figura 1- 5. Conexión de un relé de distancia	7
Figura 1- 6. Representación de la línea protegida.....	8
Figura 1- 7. Característica de operación de los relés de distancia.....	9
Figura 1- 8. Trayectoria de la impedancia calculada por el relé cuando el flujo de potencia varía cuando S es constante. (4)	10
Figura 1- 9. Tiempo de operación del relé de distancia con la comunicación de datos (5)	11
Figura 1- 10. Característica de la impedancia durante una oscilación de potencia y una falla.....	12
Figura 1- 11. Sistema simple de dos maquinas (7)	14
Figura 1- 12. Los lugares geométricos de la impedancia $R_r + jX_r$ calculadas por los relés de distancia durante oscilante de potencia con $E_G = E_M$ (7).....	15
Figura 1- 13. Gráfico de la impedancia calculada por un relé de distancia en un sistema eléctrico de dos máquinas (7)	16
Figura 1- 14. Centro eléctrico fuera de la zona de protección de la L/T (8)	17
Figura 1- 15. Centro eléctrico dentro de la zona de protección de la L/T (8)	17
Figura 1- 16. SEP sencillo con los voltajes de las fuentes en forma fasorial (9)	18
Figura 1- 17. Características concéntricas	20
Figura 1- 18. Característica de dos cercos.....	20
Figura 1- 19. Efecto de las impedancias de las fuentes y de la L/T en una oscilación de potencia.....	21
Figura 1- 20. Diagrama de fasores con la proyección de $V_S \cdot \cos\phi$	23
Figura 1- 21. Variación de $V_S \cdot \cos\phi$ en una falla trifásica (11).....	24
Figura 1- 22. Variación de $V_S \cdot \cos\phi$ en una oscilación de potencia (11).....	24
Figura 1- 23. Cálculo de componentes superpuestas.....	25
Figura 1- 24. Método que utiliza dos muestras para el cálculo de las componentes superpuestas (12).....	26
Figura 1- 25. Operación del relé por el método de componentes superpuestas durante una oscilación de potencia.....	27

Capítulo II

Figura 2- 1. Diagrama lógico para la detección de oscilación de potencia del relé SIEMENS 7SA6.....	31
Figura 2- 2. Característica de operación para la detección de una oscilación de potencia	32
Figura 2- 3. Impedancia durante una oscilación de potencia y una falla.....	33

Figura 2- 4. Impedancia durante una oscilación de potencia.....	34
Figura 2- 5. Curva de inestabilidad estática	35
Figura 2- 6. Diagrama lógico de bloqueo de las zonas de operación por detección de una oscilación de potencia del relé SIEMENS 7SA6.....	36
Figura 2- 7. Diagrama funcional de la rutina de programación FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia).....	38
Figura 2- 8. FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia)	39
Figura 2- 9. Ingreso de la ruta de acceso de los archivos COMTRADE	40
Figura 2- 10. Ingreso de datos generales en FORDI 1.0	41
Figura 2- 11. Zonas de operación que utiliza FORDI 1.0.....	41
Figura 2- 12. Ingreso de datos de la función de oscilación	42
Figura 2- 13. Resultados de la rutina de programación	43
Figura 2- 14. Ventana de la lista de gráficos que se indican en FORDI 1.0.....	44
Figura 2- 15. Diagrama de flujo del archivo principal.m.....	46
Figura 2- 16. Diagrama de flujo que determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica PPOL.....	47
Figura 2- 17. Diagrama de flujo que determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica Mho	48
Figura 2- 18. Diagrama de flujo que determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica cuadrilateral.....	49
Figura 2- 19. Diagrama de flujo del bloque continuidad del trayecto	50
Figura 2- 20. Sistema eléctrico de potencia de prueba.....	51
Figura 2- 21. Cargabilidad de las líneas de transmisión en términos de SIL (15)	53
Figura 2- 22. Frecuencia de oscilación VS ángulo de potencia	56
Figura 2- 23. Frecuencia de oscilación VS ángulo de potencia para el peor escenario ...	57
Figura 2- 24. Diagrama de flujo del bloque monotonía del trayecto.....	58
Figura 2- 25. Lugar geométrico del fasor de corriente del sistema de dos máquinas de la figura 1-1, durante una condición de oscilación de potencia (7).....	60
Figura 2- 26. Diagrama R-X - con ángulos de potencia de 90° y -90°	61
Figura 2- 27. Diagrama de flujo del bloque estabilidad del trayecto.....	62

Capítulo III

Figura 3- 1. Sistema eléctrico de potencia de prueba (18)	66
Figura 3- 2. SEP de prueba en Power Factory – DigSilent.....	68
Figura 3- 3. Ángulo del rotor del generador 2 con respecto a ángulo de la máquina de referencia en grados - calculado en Power Factory - DigSilent	69
Figura 3- 4. Curva de oscilación para los generadores 1 y 2, para un despeje de falla a 0,225 s (18)	70
Figura 3- 5. Archivo COMTRADE .DAT.....	71
Figura 3- 6. Ventana que se selecciona que tipo de gráfica se va a realizar	71
Figura 3- 7. Ventana Subgráfica <i>con dos ejes y</i>	72
Figura 3- 8. Ventana exportación de resultados	73
Figura 3- 9. Carpeta que contiene al archivo COMTRADE.....	74
Figura 3- 10. Impedancia medida por el relé de distancia para diferentes tiempos de despeje de la falla – Fuente DigSilent.....	75

Figura 3- 11. Diagrama R-X con la impedancia calculada por el relé R34-4 durante una oscilación estable	77
Figura 3- 12. Diagrama R-X-T con la impedancia calculada por el relé R34-4 durante una oscilación estable – Fuente FORDI 1.0.....	78
Figura 3- 13. Velocidad de la impedancia con la que cruza la característica PPOL– Fuente FORDI 1.0	78
Figura 3- 14. Aproximación de la figura 3-11(b) en la oscilación de impedancia que ingresa a la zona 1– Fuente FORDI 1.0.....	79
Figura 3- 15. Tabla de resultados– Fuente FORDI 1.0.....	80
Figura 3- 16. (a) Diagrama R-X del relé R34-4, (b) Diagrama R-X-T del relé R34-4 – Fuente FORDI 1.0	81
Figura 3- 17. Diagrama R-X con la impedancia calculada por el relé R34-4 durante una oscilación inestable – Fuente DigSilent.....	82
Figura 3- 18. (a) Diagrama R-X del relé R34-3, (b) Diagrama R-X-T del relé R34-3 – Fuente FORDI 1.0	83
Figura 3- 19. Tabla de resultados para una oscilación de potencia inestable – Fuente FORDI 1.0	83
Figura 3- 20. Velocidad de la impedancia con la que cruza la característica PPOL– Fuente FORDI 1.0	84
Figura 3- 21. (a) Diagrama R-X del relé R34-4, (b) Diagrama R-X-T del relé R34-4 – Fuente FORDI 1.0	85
Figura 3- 22. Tabla de resultados para una falla trifásica franca – Fuente FORDI 1.0.....	85
Figura 3- 23. Diagrama R-X del relé R34-3 – Fuente DigSilent	86

Anexo A

Figura A-1. Definición de eventos	A-2
Figura A-2. Edición de eventos	A-2
Figura A-3. Habilitación y la localización del cortocircuito en la línea de transmisión	A-3
Figura A-4. Definición de Evento de Switcheo	A-3
Figura A-5. Evento despeje corto circuito.....	A-4
Figura A-6. Definición de los elementos para determinar las variables a monitorear.....	A-4
Figura A-7. Carpeta en la que se encuentran todas las variables (Sim).....	A-5
Figura A-8. Selección de variables a monitorear.....	A-5
Figura A-9. Creación de una Nueva Página.....	A-6
Figura A-10. Nombre y tipo de la Nueva Página	A-6
Figura A-11. <i>Ventana Agregar Nuevo VI(s)</i>	A-7
Figura A-12. Ventana que se selecciona que tipo de gráfica se va a realizar.....	A-7
Figura A-13. Ventana Subgráfica	A-7
Figura A-14. Direccionar la carpeta Todos los cálculos.....	A-8
Figura A-15. Definición del elemento en el cual se van a monitorear las variables	A-8
Figura A-16. Definición de la variable a monitorear.....	A-9
Figura A-17. Botón Calcular Condiciones Iniciales.....	A-9
Figura A-18. Ventana llamada Cálculo de las Condiciones Iniciales	A-10
Figura A-19. Botón Iniciar Simulación	A-10
Figura A-20. Ventana en la que se indica el tiempo total de simulación	A-10

Figura A-21. Página nueva llamada G1 (Angulo del rotor con respecto a ángulo de la máquina de referencia en grados)	A-11
Figura A-22. Ventana de todos los eventos del caso de estudio	A-11

Anexo B

Figura B- 1. Procedimiento para elegir el transformador de corriente	B-1
Figura B- 2. Ventana Transformador de Corriente	B-2
Figura B- 3. Ventana para seleccionar o crear el tipo de TC que se va a utilizar.....	B-2
Figura B- 4. Ventana en la cual se crea el transformador de corriente	B-3
Figura B- 5. Procedimiento para elegir el modelo del relé	B-4
Figura B- 6. Ventana Modelo del Relé	B-4
Figura B- 7. Ventana para seleccionar el relé de distancia	B-5
Figura B- 8. Procedimiento para crear el diagrama R-X.....	B-5
Figura B- 9. Zona de impedancia para un relé	B-6
Figura B- 10. Lógica de operación del relé en forma de bloques	B-6
Figura B- 11. Proceso para editar cubículo	B-7
Figura B- 12. Renombrar el cubículo	B-7
Figura B- 13. Carpeta que indica los elementos a monitorear.....	B-8
Figura B- 14. Ventana en la que se indica las variables a monitorear	B-8
Figura B- 15. Ventana para seleccionar el elemento a cual se va a monitorear	B-9
Figura B- 16. Selección de variables a monitorear.....	B-9
Figura B- 17. Direccional la carpeta Todos los cálculos.....	B-10
Figura B- 18. Definición del elemento en el cual se van a monitorear las variables ...	B-10
Figura B- 19. Definición de la variable a monitorear.....	B-10
Figura B- 20. Impedancia medida por el relé durante un evento producido.....	B-11

Anexo C

Figura C- 1. Zonas de operación del Relé R34-3 – Fuente DigSilent	C-2
Figura C- 2. Zonas de operación del Relé R34-4 – Fuente DigSilent	C-3
Figura C- 3. Zonas de operación del Relé R45-4 – Fuente DigSilent	C-4
Figura C- 4. Zonas de operación del Relé R45-5 – Fuente DigSilent	C-5
Figura C- 5. Zonas de operación del Relé R35-3 – Fuente DigSilent	C-6
Figura C- 6. Zonas de operación del Relé R35-5 – Fuente DigSilent	C-7

Anexo D

Figura D- 1. Ventana para buscar y abrir el archivo *.m llamado presentación.m.....	D-2
Figura D- 2. Ventana para la ejecución de la rutina de programación	D-2
Figura D- 3. Ventana para actualizar de la dirección de los archivos *.m	D-3
Figura D- 4. Carátula de la rutina de programación.....	D-3
Figura D- 5. Ventana de la rutina de programación FORDI 1.0	D-4
Figura D- 6. Ingreso del ruta de acceso de los archivos COMTRADE	D-4
Figura D- 7. Selección de la característica de operación que se va a utilizar	D-5

Figura D- 8. Ingreso de datos de la zona de operación cuadrilateral en FORDI 1.0	D-5
Figura D- 9. Ingreso de datos de la zona de operación mho en FORDI 1.0	D-6
Figura D- 10. Ingreso de datos de la función de oscilación	D-7
Figura D- 11. Diagrama lógico para detectar una oscilación de potencia utilizado por el relé SIEMENS 7SA6	D-7
Figura D- 12. Resultados de la rutina de programación	D-7
Figura D- 13. Ventana de la lista de gráficos que se indican en FORDI 1.0	D-9
Figura D- 14. Barra de menú de la rutina de programación FORDI 1.0	D-9
Figura D- 15. Archivo en formato PDF donde se encuentra el manual del usuario.....	D-10
Figura D- 16. Información del autor y director del proyecto	D-10
Figura D- 17. Mensaje al seleccionar el botón SALIR	D-10

LISTA DE TABLAS

Capítulo II

Tabla 2- 1. Datos característicos de L/T (1).....	51
Tabla 2- 2. Valores de SIL para L/T aéreas típicas de 60 Hz (14)	52
Tabla 2- 3. Potencia de transmisión según St. Clair	52
Tabla 2- 4. Datos característicos del generador (1).....	53
Tabla 2- 5. Datos característicos del transformador (16)	54
Tabla 2- 6. Reactancia total entre las dos fuentes de voltaje	54
Tabla 2- 7. Datos de ZDIF en ohm-primarios.....	55
Tabla 2- 8. Reactancia total entre las dos fuentes de voltaje para el peor escenario	57

Capítulo III

Tabla 3- 1. Datos de los generadores del SEP de prueba (18).....	67
Tabla 3- 2. Datos de L/T y transformadores del SEP de prueba (18).....	67
Tabla 3- 3. Datos de los valores obtenidos por el flujo de potencia (18).....	67
Tabla 3- 4. Variables a monitorear en la simulación RMS	72
Tabla 3- 5. Posibles ajustes de la función de oscilación del relé de distancia 7SA6	80

Anexo C

Tabla C- 1. Parámetros de ajuste del relé R34-3.....	C-1
Tabla C- 2. Parámetros de ajuste del relé R34-4.....	C-2
Tabla C- 3. Parámetros de ajuste del relé R45-4.....	C-3
Tabla C- 4. Parámetros de ajuste del relé R45-5.....	C-4
Tabla C- 5. Parámetros de ajuste del relé R35-3.....	C-5
Tabla C- 6. Parámetros de ajuste del relé R35-5.....	C-6

SIMULACIÓN DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN DE POTENCIA EN RELÉS DE DISTANCIA

Jhony Fernando Chapi Lucero

Bajo la supervisión del Ing. Antonio Fonseca MSc.

RESUMEN

El sistema eléctrico de potencia se encuentra expuesto a una gran cantidad de condiciones anormales de funcionamiento como fallas, pérdida de líneas de transmisión (L/T), aplicación o pérdida de generadores o grandes cargas y un sin número de condiciones que provocan un desequilibrio entre generación y carga.

Las perturbaciones provocan diferencias entre el torque mecánico y el torque eléctrico, estas a su vez producen oscilaciones de potencia que son variaciones del ángulo del rotor de las maquinas que pueden ocasionar fluctuaciones de los flujos de potencia.

Durante una condición de oscilación del sistema eléctrico de potencia (SEP), la impedancia medida por el relé de distancia puede entrar en la característica de operación, y provocar la apertura de algún disyuntor en forma indebida, ocasionando mayor inestabilidad en el sistema.

En el caso de una oscilación de potencia estable no es necesario la operación del relé, debido a que después de un tiempo el sistema llegará a una nueva condición de equilibrio, para inhibir esto los relés de distancia modernos tienen incluido la función de bloqueo por oscilación de potencia (Power Swing Blocking – PSB), la cual bloquea las zonas de operación en las que ingresa la impedancia medida por el relé de distancia.

En el caso de una oscilación de potencia inestable lo recomendable es la separación de los sistemas para ellos se utiliza la función disparo por oscilación de potencia inestable (disparo por fuera de paso - Out of Step Tripping – OST).

Para establecer una parametrización adecuada de la función de oscilación, es necesario desarrollar el algoritmo de los equipos de protección a fin de analizar su comportamiento ante oscilaciones de SEP. Se debe señalar que esta funcionalidad no siempre está desarrollada en los software de simulación eléctrica, como es el caso de Power Factory de DigSilent.

El presente proyecto plantea la modelación en Matlab del algoritmo utilizado por relé SIEMENS 7SA6 (marca SIEMENS y modelo SIPROTEC 7SA6) para detectar oscilaciones de potencia. El relé SIEMENS 7SA6 es utilizado por CELEC – EP Transelectric en gran parte del sistema nacional de transmisión (SNT).

La rutina de programación desarrollada en Matlab es llamada FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia) y ayuda a establecer los posibles ajustes ante oscilaciones de potencia del SEP, en el relé SIEMENS 7SA6 y para relés numéricos cuyo algoritmo de detección de una oscilación sea la relación entre la variación de la impedancia y la variación del tiempo ($\Delta Z/\Delta t$).

Los datos de entrada de la rutina de programación FORDI 1.0 son archivos COMTRADE¹ de voltaje y corriente obtenidos de la simulación RMS² en Power Factory - DigSilent.

¹ Formato común estándar para intercambio de datos transitorios (COMTRADE) para sistemas de potencia (IEEE Std C37.111-1999).

² Método de simulación de transitorios electromecánicos en Power Factory - DigSilent.

PRESENTACIÓN

La impedancia calculada por el relé de distancia puede ingresar a la zona de operación durante oscilaciones de potencia estables, y la operación inadecuada del relé puede causar mayor inestabilidad al sistema.

El relé de distancia adicionalmente tiene una función de oscilación que bloquea las zonas de operación durante oscilaciones de potencia, para determinar un adecuado ajuste es necesario desarrollar el algoritmo de los equipos de protección, con el fin de analizar el comportamiento del relé ante oscilaciones de potencia.

El presente proyecto crea una rutina de programación (FORDI 1.0) desarrollada en Matlab, la cual simula la función de oscilación de potencia del relé de distancia SIEMENS 7SA6 y ayuda a determinar los ajustes adecuados ante oscilaciones en el SEP.

En el capítulo I se desarrolla los conceptos básicos de oscilaciones de potencia, variación de la impedancia durante oscilaciones y una descripción general de los métodos utilizados por los relés de distancia para la detección de oscilaciones de potencia.

En el capítulo II se describe el método que utiliza el relé de distancia SIEMENS 7SA6 para detectar oscilaciones de potencia, también se presenta la rutina de programación FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia).

En el capítulo III se obtienen archivos COMTRADE de oscilaciones de potencia estables e inestables por medio de la simulación RMS de Power Factory – DigSilent, también se determina los posibles ajustes de la función de oscilación de potencia mediante la rutina de programación FORDI 1.0.

En el capítulo IV se exponen las conclusiones y recomendaciones.

Para finalizar se presenta las referencias consultadas y los anexos.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe las oscilaciones de potencia estables e inestables, los efectos y algunos métodos para detectar una oscilación de potencia en el sistema eléctrico de potencia.

1.1.- GENERALIDADES

Un sistema eléctrico de potencia (SEP) es un conjunto de generadores eléctricos, transformadores, líneas de transmisión (L/T), que se conectan eléctricamente en una barra (nodo) formando una red que tiene como objetivo satisfacer la energía eléctrica que requiere la carga, con el menor costo y cumpliendo con las normas técnicas de calidad.

Un sistema eléctrico de potencia se encuentra en estado estable si está trabajando en condiciones normales de funcionamiento, existiendo un equilibrio entre generación y carga. Todas las cantidades físicas que se miden o se calculan y que describen las condiciones de operación del sistema, se pueden considerar constantes para propósitos de análisis en estado estable.

Los sistemas eléctricos de potencia están expuestos a una variedad de condiciones anormales de funcionamiento por fallas o maniobras, provocando un cambio repentino de las variables físicas del SEP. Estas condiciones anormales de funcionamiento se las conoce con el nombre de perturbaciones, las cuales se las puede clasificar en:

1.1.1.- PERTURBACIONES GRANDES

Pueden ser cortocircuitos, salida de servicio de generadores o líneas de transmisión, aplicación o pérdida de grandes cargas.

1.1.2.- PERTURBACIONES PEQUEÑAS

Las cuales se pueden ser causadas por variaciones de la carga y generación, cambiadores automáticos de tomas bajo carga (OLTC).

1.2.- ESTABILIDAD ANGULAR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La estabilidad de un SEP puede ser definida, como la capacidad que tiene el sistema de permanecer en un estado de estable y recuperar un aceptable estado de equilibrio después de ser sometido a una perturbación (1).

En cambio la inestabilidad en un sistema eléctrico se manifiesta de muchas maneras, dependiendo de la configuración del sistema y modo de funcionamiento. Aunque la inestabilidad de un SEP es un problema único, puede provocar caída de voltajes en las barras, diferentes frecuencias en el sistema, altas corrientes.

La estabilidad angular es la capacidad de los generadores de seguir funcionando en sincronismo y en condiciones normales de operación, después de la ocurrencia de una perturbación (1).

Un SEP es estable o se encuentra operando en un punto de equilibrio cuando el torque mecánico de entrada es igual al torque eléctrico de salida para cada máquina, también puede ser estable si después de una perturbación es capaz de regresar a un punto de equilibrio igual o diferente de la condición inicial.

Una perturbación en el sistema hace que los rotores de las máquinas se aceleren o desaceleren, esto provoca que aumenten las diferencias angulares relativas entre algunas máquinas que giran más rápido que otras. La tendencia a incrementar la diferencia angular produce una inestabilidad en el SEP.

De esta manera la variable que determina la estabilidad angular es el ángulo de los generadores de todas las máquinas del sistema, estos son relativos a una máquina referencia.

Los ángulos de rotores de los generadores están relacionados con la potencia eléctrica suministrada a la red, por esta razón se hace una pausa para comprender la relación entre potencia activa entregada y el ángulo de la máquina.

1.2.1.- RELACIÓN ENTRE POTENCIA Y ÁNGULO

Para estudiar la relación entre potencia y ángulo se considera el sistema de la figura 1-1(a). El cual consta de un generador sincrónico que suministra energía eléctrica a un motor sincrónico a través de una línea de transmisión que posee una reactancia inductiva serie X_L , despreciando la capacitancia y la resistencia de la línea de transmisión.

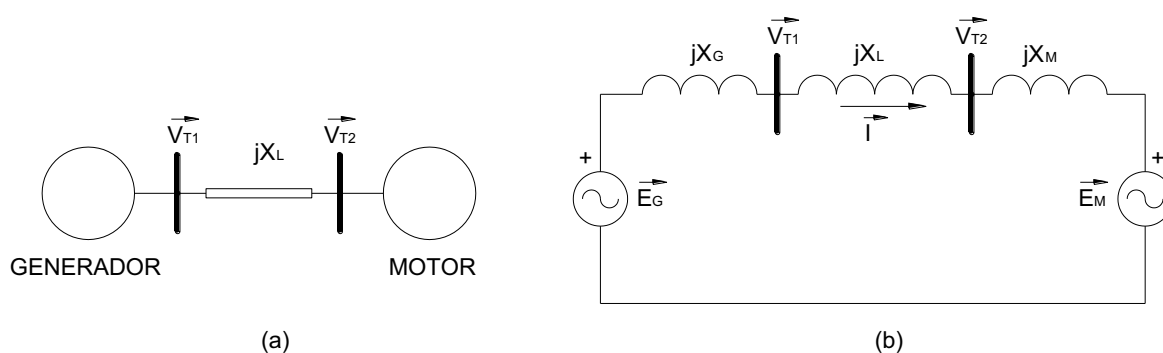


Figura 1- 1. Modelo idealizado de un SEP sencillo

Las maquinas sincrónicas pueden ser representadas aproximadamente por una fuente de voltaje constante en serie con una reactancia constante. (2) De esta manera el generador es representado por E_G y X_G y el motor por E_M y X_M como se puede observar en la figura 1-1(b).

Vectorialmente $\vec{E}_G = \vec{E}_M + jX_M\vec{I} + jX_L\vec{I} + jX_G\vec{I}$ como se indica en el diagrama de vectores de voltaje de la figura 1-2.

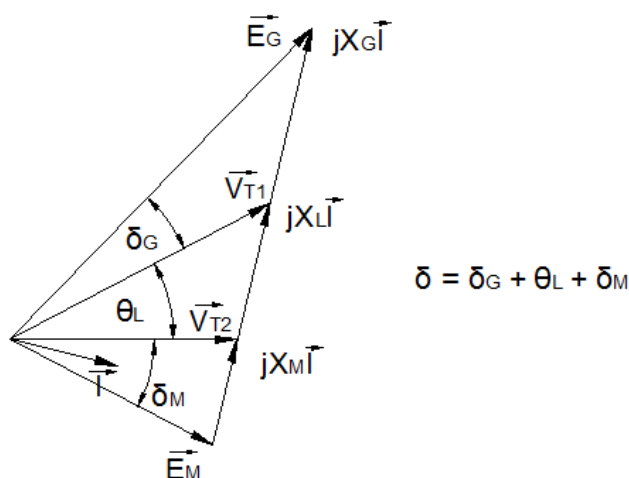


Figura 1- 2. Diagrama fasorial (3)

Donde:

\vec{I} = Corriente que circula por el sistema.

$jX_G\vec{I}$ = Representa la caída de voltaje del estator del generador.

$jX_M\vec{I}$ = Representa la caída de voltaje del estator del motor.

δ_G = Es el ángulo por el cual el rotor del generador adelanta el campo giratorio del estator.

δ_L = Es la diferencia angular entre voltajes terminales del generador y el motor (ángulo por el cual el campo del estator del generador adelanta al del motor).

δ_M = Ángulo interno del motor (ángulo por el cual el rotor atrasa el campo magnético giratorio del estator).

De la figura 1-1b se puede terminar que:

$$\vec{I} = \frac{\vec{E}_G - \vec{E}_M}{jX} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: $X = X_M + X_L + X_G$

La potencia aparente de salida del generador en por unidad es:

$$\vec{S} = \vec{V}\vec{I}^* [pu] \quad \text{Ec. 2}$$

Para obtener la potencia activa que entrega el generador que es la misma que la que recibe el motor, debido a que se desprecia la resistencia de los elementos del sistema se obtiene la parte real de la ecuación 2.

$$P = \frac{E_G \cdot E_M}{X} \text{sen}(\delta) [pu] \quad \text{Ec. 3}$$

La ecuación 3 indica la potencia activa transmitida por el generador al motor, la cual varía con el seno de la diferencia de los ángulos (δ comúnmente llamado ángulo de potencia) de las dos máquinas sincrónicas, esta relación entre potencia y ángulo es altamente no lineal, como se indica en la figura 1-3. Para poder transmitir mayor potencia activa al motor el ángulo δ tiene que aumentar.

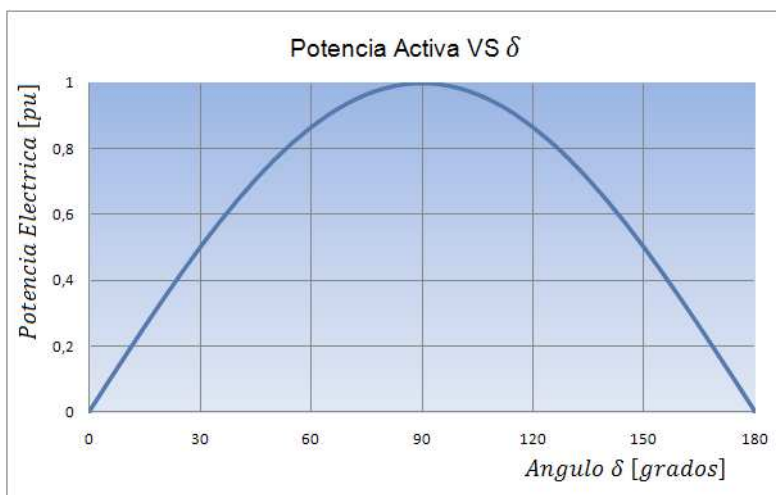


Figura 1- 3. Relación Potencia - Angulo

Como se puede observar en la figura 1-3 la máxima potencia que se puede transmitir a través de una reactancia X , es cuando el desplazamiento angular $\delta = 90^\circ$, los valores de potencia máxima pueden aumentar, disminuyendo la reactancia X del circuito y aumentando los voltajes internos de las máquinas sincrónicas.

1.2.2.- OSCILACIONES DE POTENCIA EN EL SEP

Un SEP en condiciones normales de funcionamiento se encuentra operando cerca de su frecuencia nominal y los voltajes de las barras del sistema cerca al nominal, existiendo un equilibrio entre generación y carga.

Cualquier cambio en la potencia generada o demanda por la carga, hacen que exista una variación del flujo de potencia hasta que exista un nuevo punto el equilibrio entre generación y carga.

Los cambios de flujo de potencia se producen en forma continua y se contrarrestan de una manera automática a través de los sistemas de control del SEP, normalmente no afectan al SEP o al sistema de protecciones ya que son perturbaciones pequeñas.

En cambio la ocurrencia de fallas en el sistema como desconexión de generadores y/o líneas de transmisión, pérdida o aplicación de grandes cargas al sistema y otras condiciones pueden resultar en oscilaciones de potencia, que son variaciones de los ángulos del rotor de los generadores.

Dependiendo de la gravedad de la perturbación y el control del sistema eléctrico, el SEP puede permanecer estable o inestable, para poder diferenciarlo se observa la figura 1-4 en la que se ilustra el ángulo del rotor en función del tiempo de una maquina sincrónica después de existir una perturbación grande.

En el *Caso 1*, el ángulo del rotor se incrementa a un valor máximo, luego decrece y empieza a oscilar en forma atenuada hasta llegar a un régimen permanente, este tipo de oscilaciones son estables. En este caso la frecuencia de oscilación es $1/T$.

En el *Caso 2*, el ángulo del rotor se incrementa en forma continua hasta perder el sincronismo de la máquina, esta es una oscilación inestable.

En *Caso 3* es una oscilación inestable, en la que la primera oscilación es estable pero la siguiente oscilación es inestable ya que se va incrementando el ángulo del rotor hasta perder el sincronismo³ de la maquina, esto es debido a que en la condición de pos-falla el sistema tiene mayor inestabilidad.

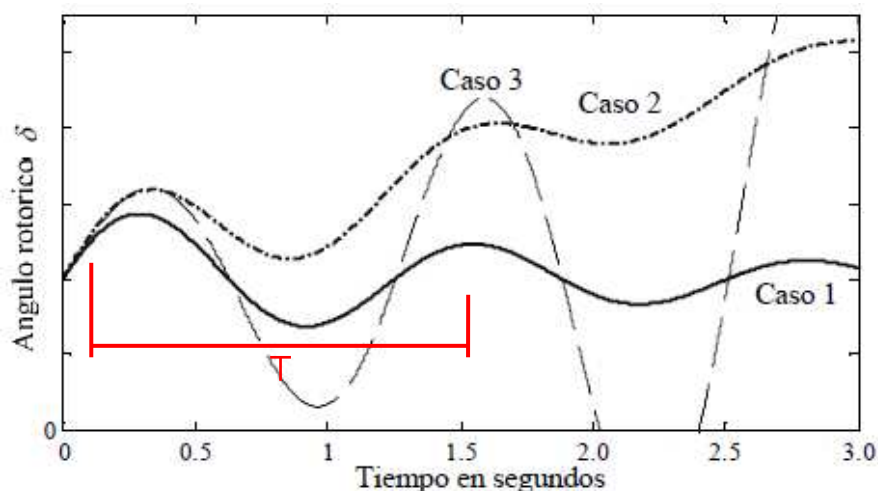


Figura 1- 4. Respuesta del ángulo de rotor de una maquina sincrónica ante una perturbación transitoria (3)

1.2.2.1.- OSCILACIÓN DE POTENCIA ESTABLE

Es la variación trifásica de los ángulos del rotor en las maquinas de un SEP al momento de existir una perturbación sin que exista diferencias angulares de 180°

³ Perder el sincronismo es similar a la inestabilidad en el sistema eléctrico de potencia.

y conservando condiciones normales de funcionamiento después de existir la oscilación.

1.2.2.2.- OSCILACIÓN DE POTENCIA INESTABLE

Son oscilaciones de potencia trifásicas, en la cual los ángulos de los rotores de las maquinas pueden llegar a ser iguales o mayores de 180° .

1.3.- EFECTO DE LAS OSCILACIONES DE POTENCIA EN LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

1.3.1- RELÉ DE DISTANCIA

La principal función de los sistemas de protección es retirar del servicio lo más rápido posible cualquier elemento del sistema de potencia cuando inicia una operación anormal, para que los equipos del SEP no sufran daños y también para mantener la estabilidad del sistema.

El relé de distancia se caracteriza por su alta exactitud de medida y la capacidad de adaptarse a las condiciones dadas del sistema de potencia, por esta razón son muy utilizados en los sistemas de protección de líneas de transmisión.

Como se puede observar en la figura 1-5, el relé de distancia está ubicado en el extremo de las líneas de transmisión a través de transformadores de medida, TC (transformador de corriente) y TP (transformador de voltaje) para medir corriente y voltaje respectivamente, estos son utilizados ya que en el SEP existen altas corrientes y voltajes que no se pueden ingresar directamente al relé.

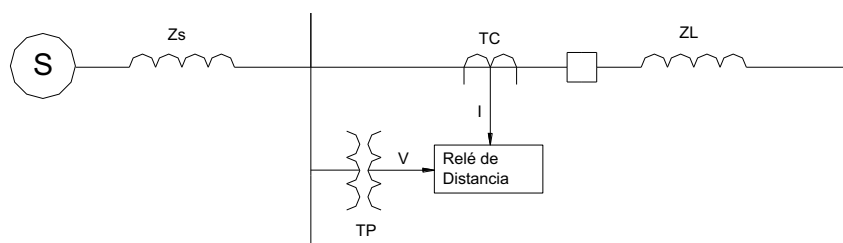


Figura 1- 5. Conexión de un relé de distancia

La zona de protección depende de la impedancia de la línea de transmisión protegida, para el funcionamiento el relé calcula la relación entre el voltaje y la

corriente, y así poder determinar si la impedancia medida se encuentra dentro de la zona de protección (opera el relé), caso contrario esta si se encuentra fuera de la zona de protección (no opera el relé).

En el caso de una falla la impedancia medida por el relé es menor a la impedancia en una operación normal del sistema.

En la figura 1-6(a) se muestra la representación de la línea protegida, por un relé de distancia, instalado en la Barra A. El sistema también puede ser representado en el plano complejo R-X (plano de impedancia) como se indica en la figura 1-6(b).

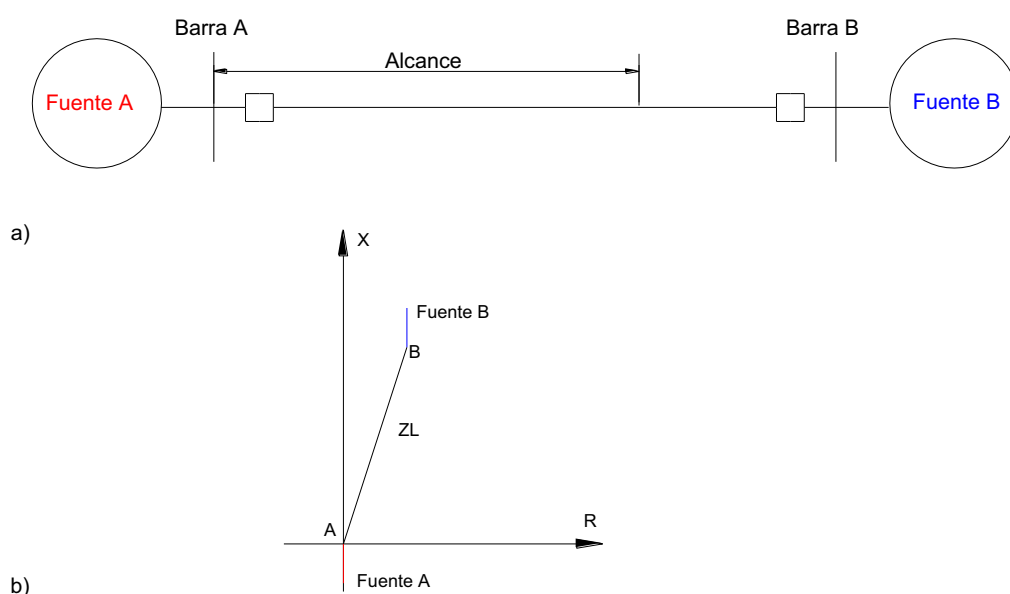


Figura 1- 6. Representación de la línea protegida

Los relés de distancia se clasifican de acuerdo a sus características de operación en el plano complejo R-X. En general se conocen cuatro formas de la característica de operación, las cuales se muestran en la figura 1-7.

- a. característica de impedancia
- b. característica de admitancia o mho
- c. característica lenticular
- d. característica poligonal o cuadrilateral

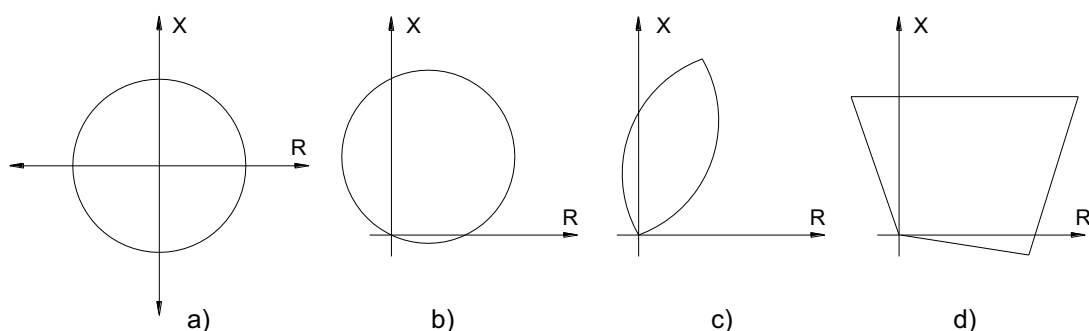


Figura 1-7. Característica de operación de los relés de distancia

1.3.1.1.- CRITERIOS DE CALIBRACIÓN DEL RELÉ DE DISTANCIA ⁴

Existen muchos criterios para la calibración del relé de distancia por ejemplo:

Zona 1: En la zona 1 de operación el relé de distancia debe proteger entre el 80% y 90% de la línea de transmisión en forma instantánea.

Zona 2: La zona 2 de operación se encuentra definida mediante la simulación de cortos circuitos con una impedancia de falla a lo largo de toda la L/T y generalmente es el 120% de la reactancia de la línea de transmisión. La zona 2 tiene un tiempo temporización alrededor de 250 ms y 300 ms.

Zona 3: La zona 3 sirve de respaldo para circuitos adyacentes y tiene un tiempo temporización alrededor de 800 ms y 1200 ms. Para una correcta calibración del relé de distancia la impedancia de mayor carga no debe ingresar a la zona de operación.

1.3.1.2.- ZONA 3 Y POTENCIA DE CARGA

El relé de distancia en la condición normal de operación mide la impedancia de la L/T más la impedancia de la carga. La impedancia medida por un relé de distancia está dada por:

$$\vec{Z}_a = \frac{|\vec{V}|^2 \cdot (P + jQ)}{P^2 + Q^2} = \frac{|\vec{V}|^2 \cdot \vec{S}}{|\vec{S}|^2} \quad \text{Ec. 4}$$

⁴ Utilizados por CELEC - EP - TRASELECTRIC

Considerando la magnitud de la potencia aparente constante, la impedancia calculada por el relé de distancia a medida que cambia el flujo de potencia se indica en la figura 1-8.

A mayor potencia aparente el radio del círculo disminuye, es decir la potencia aparente en a_2 es mayor que en a_1 . ($|\vec{S}_{a_2}| > |\vec{S}_{a_1}|$)

A medida que la impedancia se mueve en la dirección de m_1 , el factor de potencia disminuye es decir la carga se hace mas inductiva y menos resistiva.

La trayectoria de la impedancia en la dirección de m_2 es cuando el factor de potencia se mantiene constante y crece la potencia aparente.

Por lo tanto el alcance de la última zona de protección tiene que ser menor a la impedancia de carga ya que un aumento de potencia activa o reactiva puede causar una operación inadecuada del relé de distancia.

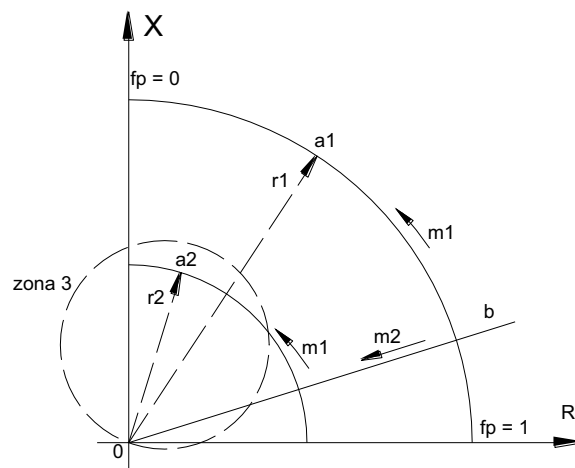


Figura 1- 8. Trayectoria de la impedancia calculada por el relé cuando el flujo de potencia varía cuando S es constante. (4)

1.3.1.3.- CALCULO DE LA IMPEDANCIA EN VALORES SECUNDARIOS

Los relés se conectan a través de transformadores de voltaje y de corriente esto hace que la impedancia calculada del lado secundario de los transformadores sea diferente a la impedancia real o del lado primario.

La impedancia del lado secundario está definida por:

$$Z_{secundaria} = Z_{primaria} \cdot \frac{RI}{RV} \tag{Ec. 5}$$

Donde RI y RV son las relaciones de transformación de los transformadores de corriente y de voltaje respectivamente, $Z_{primaria}$ es la relación entre voltaje y corriente primarios.

1.3.1.4.- TIEMPOS DE DESPEJE DE LA FALLA

Los despejes de las fallas detectadas no se realizan en forma instantánea. El relé, el disyuntor necesitan un tiempo mínimo para una correcta operación, estos tiempos varían dependiendo de su tecnología utilizada.

En los relés digitales existen diferentes procesos desde la detección de la falla hasta el despeje total de la falla, los cuales se indican en forma más detallada en la figura 1-9.

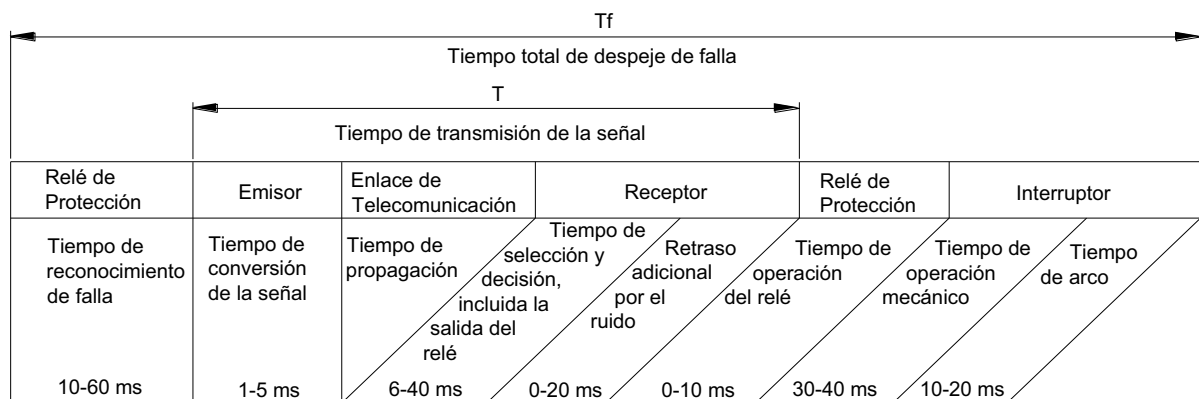


Figura 1- 9. Tiempo de operación del relé de distancia con la comunicación de datos (5)

1.3.2.- FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN DE LOS RELÉS DE DISTANCIA ANTE OSCILACIONES DE POTENCIA

En la figura 1-10, se observa la protección de una línea de trasmisión con una zona cuadrilateral, en esta figura se visualiza la característica de la impedancia durante oscilaciones de potencia y durante una falla.

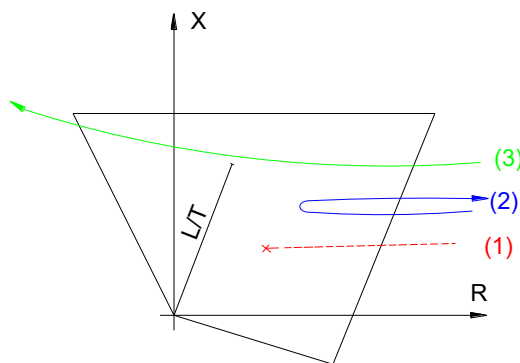


Figura 1- 10. Característica de la impedancia durante una oscilación de potencia y una falla.

Caso 1: Ocurre un cortocircuito en la línea de transmisión y la impedancia se traslada en forma instantánea desde la zona de carga a la zona de protección del relé de distancia. (6)

Caso 2: Durante una oscilación de potencia estable la impedancia medida por el relé se desplaza en forma lenta e ingresando a la zona de protección del relé, después de un tiempo la impedancia abandona la zona de protección. (6)

Caso 3: Si la impedancia recorre la zona de protección en forma completa, se trata de una oscilación inestable. (6)

Por lo tanto durante una oscilación de potencia estable, la impedancia calculada por el relé de distancia puede ingresar a la zona de protección, provocando un disparo al disyuntor asociado, esto es perjudicial para el sistema ya que puede provocar mayor inestabilidad, por esta razón durante una oscilación de potencia estable no es necesario la operación del relé, ya que después de un tiempo el sistema regresará a una posición de equilibrio.

Durante una oscilación de potencia inestable es necesario que actúen las protecciones, ya que este estado es perjudicial para el sistema.

Los relés de distancia modernos para diferenciar entre una oscilación de potencia estable, inestable o falla, incluyen las funciones PSB (power swing blocking – bloqueo por oscilaciones de potencia) y OST (out-of-step tripping – disparo por oscilación de potencia inestable).

1.3.2.1.- PSB: Bloqueo por oscilación de potencia

La función PSB diferencia entre una falla y una oscilación de potencia. Esta función debe permitir la actuación del relé durante una falla y bloquear al relé durante una oscilación de potencia.

1.3.2.2.- OST: Disparo por oscilación de potencia

La función OST diferencia entre una oscilación de potencia estable y una oscilación de potencia inestable. Esta función debe bloquear al relé en presencia de oscilaciones de potencia estables y permitir la actuación del relé durante oscilaciones de potencia inestables.

La operación del relé durante una oscilación de potencia inestable tiene que estar acompañado de procesos de alivio de carga o ingreso de generación, para que el sistema separado llegue nuevamente al equilibrio entre generación y carga.

1.4.- VARIACIÓN DE LA IMPEDANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA

Los efectos de las oscilaciones de potencia en los relés de distancia pueden ser estudiados considerando un sistema simple de dos máquinas, como el SEP anteriormente usado, que se indica en la figura 1-1(a).

E_G y E_M son los voltajes tras las reactancias transitorias del generador y el motor respectivamente, se supone que los voltajes son constantes en magnitud pero diferentes en ángulo durante oscilaciones de potencia, δ es el ángulo de potencia entre E_G y E_M (referencia).

Suponiendo que todas las impedancias del sistema tienen el mismo ángulo, el total de la impedancia $X = X_M + X_L + X_G$ es dividida en dos partes $m.X$ y $(1 - m).X$, donde m es un número real menor a 1, en la ubicación P se ubica el relé de distancia, como se puede observar en la figura 1-11. (7)

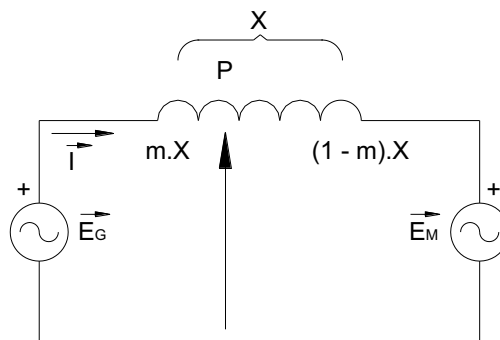


Figura 1- 11. Sistema simple de dos maquinas (7)

El voltaje en el punto P tomando como referencia al voltaje interno del motor E_M es:

$$\vec{V}_P = E_G \angle \delta - \vec{I} \cdot m \cdot \vec{X} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde $\vec{I} = (E_G \angle \delta - E_M \angle 0) / \vec{X}$ es la corriente que circula por el sistema y está dada en la ecuación 1, rempazándola en la ecuación 6 se obtiene:

$$\vec{V}_P = (1 - m) \cdot E_G \angle \delta + m \cdot E_M \quad \text{Ec. 7}$$

Por lo tanto la impedancia medida por el relé de distancia en el punto P es:

$$\vec{Z}_r = \frac{\vec{V}_P}{\vec{I}} = \frac{(1-m) \cdot E_G \angle \delta + m \cdot E_M}{E_G \angle \delta - E_M \angle 0} \cdot \vec{X} \quad \text{Ec. 8}$$

La ecuación 8 se encuentra en función de los voltajes internos de las maquinas sincrónicas los cuales son constantes y del ángulo de potencia δ que es variable en una oscilación de potencia.

Al asumir en la ecuación 8 que $E_G = E_M$ y despejar la relación $\vec{Z}_r / X \angle \theta$ se obtiene la ecuación 9, esta ecuación consta de una parte real constante la cual depende de la posición en la que está instalado el relé y una parte compleja que depende del ángulo de potencia.

$$\frac{\vec{Z}_r}{X \angle \theta} = \left(\frac{1}{2} - m \right) - j \frac{1}{2} \cot \frac{\delta}{2} \quad \text{Ec. 9}$$

Al graficar la ecuación 9, en el diagrama de impedancia R-X el resultado son líneas rectas paralelas al eje X (eje de reactancia) para diferentes valores de m .

Al multiplicar la ecuación 9 por $X \angle \theta$ se obtiene la impedancia (\vec{Z}_r) medida por el relé, la multiplicación hace que las líneas rectas se inclinen a la izquierda con un ángulo θ dado por la impedancia total del sistema, esto lugares geométricos se puede observa en la figura 1-12 para diferentes valores de m .

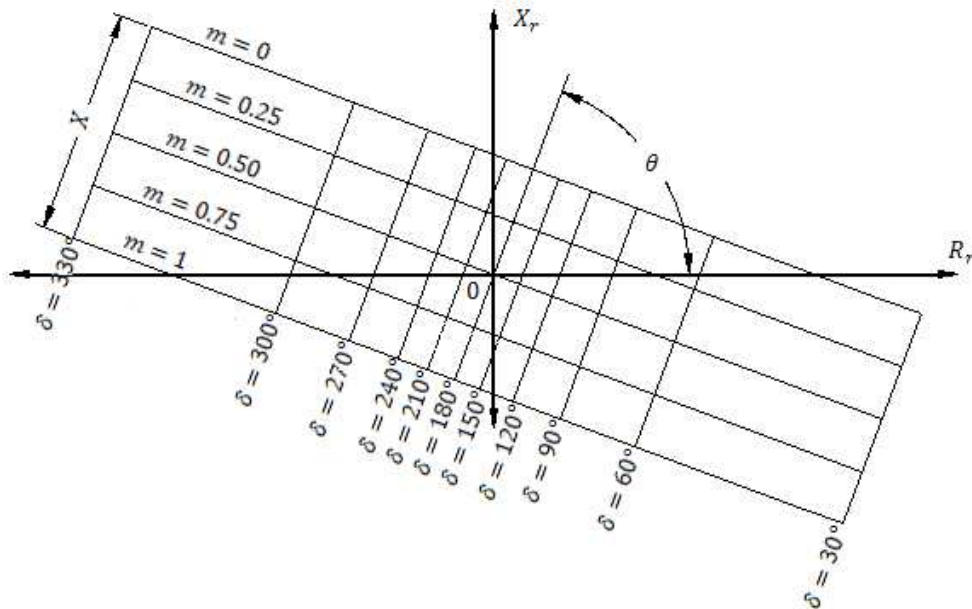


Figura 1- 12. Los lugares geométricos de la impedancia $R_r + jX_r$ calculadas por los relés de distancia durante oscilante de potencia con $E_G = E_M$ (7)

En el caso de que en la ecuación 8 se tenga $E_G \neq E_M$, los lugares geométricos de la impedancia al variar el ángulo de potencia son circulares, esto depende de la relación E_G/E_M como se indica en la figura 1-13.

Se puede observar en la figura 1-13, que a medida que se incrementa el ángulo de potencia (δ), la impedancia medida por el relé se aproxima al centro de la impedancia que existe entre los dos sistemas.

La impedancia medida por el relé se ubica en la mitad de la impedancia entre los dos sistemas cuando $E_G = E_M$ y la el ángulo $\delta = 180$, este punto de cruce es llamado **centro eléctrico**.

En el caso de que $E_G \neq E_M$, la impedancia medida por el relé se aproxima al centro eléctrico cuando el ángulo de potencia se encuentra en el rango de $150^\circ - 210^\circ$.

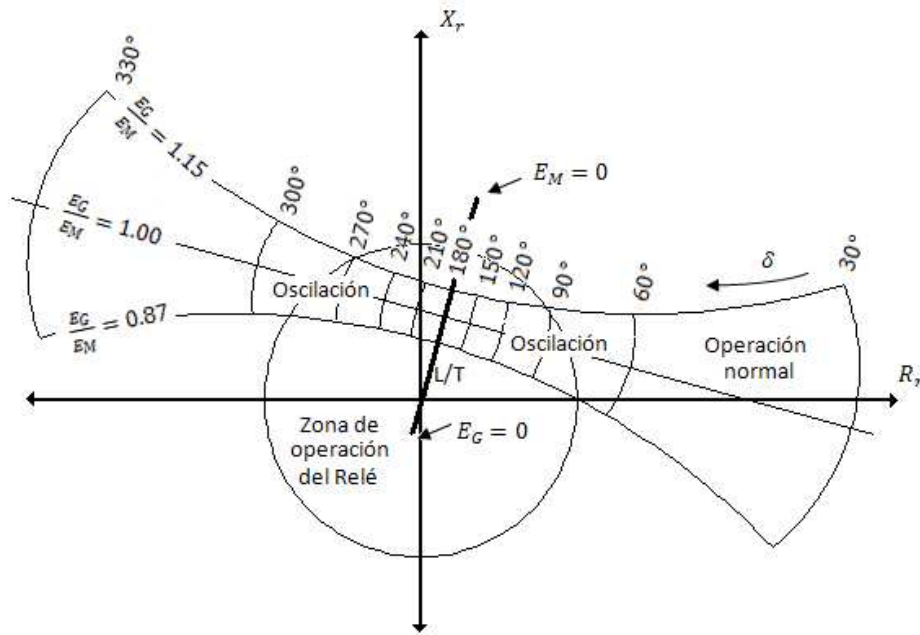


Figura 1- 13. Gráfico de la impedancia calculada por un relé de distancia en un sistema eléctrico de dos máquinas (7)

Se puede decir que la trayectoria de la impedancia durante una oscilación tiende a pasar por o cerca del centro eléctrico del sistema, independientemente donde esté ubicado el relé de distancia, de esta manera el relé de distancia puede estar adelante o atrás del centro eléctrico.

Si cambia la topología de la red o cambia los valores de las impedancias de los elementos, entonces también cambia el centro eléctrico del sistema.

Como se puede observar en la figura 1-14, el centro eléctrico se encuentra atrás del alcance del relé de distancia, en este caso las oscilaciones de potencia no entrarán a la zona de protección, por este motivo no es necesario activar la función de oscilación del relé.

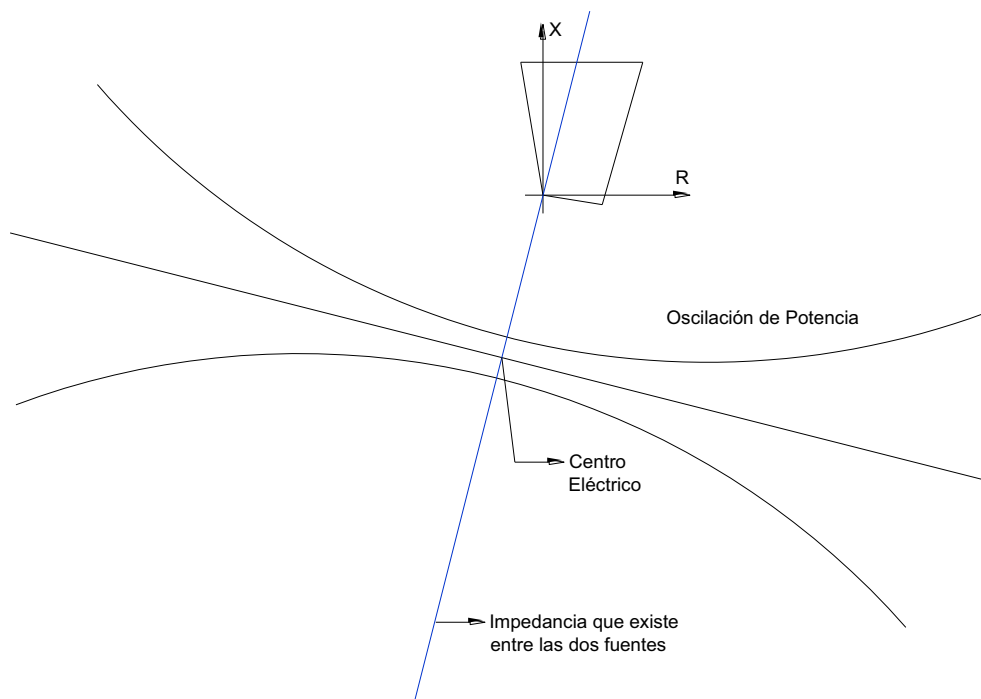


Figura 1- 14. Centro eléctrico fuera de la zona de protección de la L/T (8)

En la figura 1-15, el centro eléctrico se encuentra en la zona de protección del relé de distancia, en este caso si es necesario activar la función de oscilación en este relé.

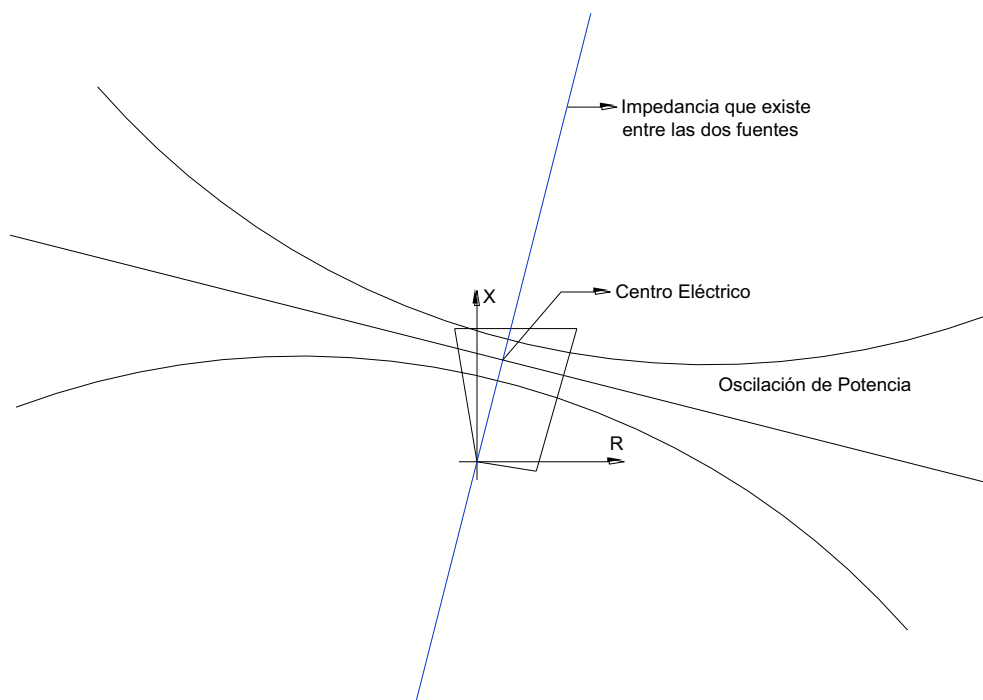


Figura 1- 15. Centro eléctrico dentro de la zona de protección de la L/T (8)

Por lo tanto si el centro eléctrico se encuentra fuera del alcance de las zonas de protección, no es necesario activar la función de oscilación, ya que durante una oscilación de potencia la impedancia no ingresa a dicha zona.

1.4.1.- CENTRO ELÉCTRICO

Para entender de una manera clara el concepto de centro eléctrico se considera el sistema presentado en la figura 1-1, se considera iguales las dos fuentes de voltaje y se las representa en forma de fasores en la figura 1-16.

Si se tiene como referencia la fuente E_G y la fuente de voltaje E_M gira hacia la derecha para que exista una transferencia de potencia, esto hace que la fuente de voltaje E_M forme un círculo en el plano complejo.

Como se indica en la figura 1-16, el voltaje en el centro de la impedancia entre las dos fuentes forma un círculo, se puede observar que cuando el ángulo que existe entre las dos fuentes es 180° , el voltaje en el centro de la impedancia es cero en las tres fases.

Por esta razón durante una oscilación de potencia estable el ángulo de potencia tiende a llegar a los 180° , esto hace que el relé de distancia confunda una oscilación de potencia con una falla trifásica en el centro de la impedancia de las dos fuentes.

El centro de la impedancia que existe entre las dos fuentes de voltaje es llamado centro eléctrico y cuando el ángulo de potencia $\delta = 180^\circ$, el voltaje en este punto es cero.

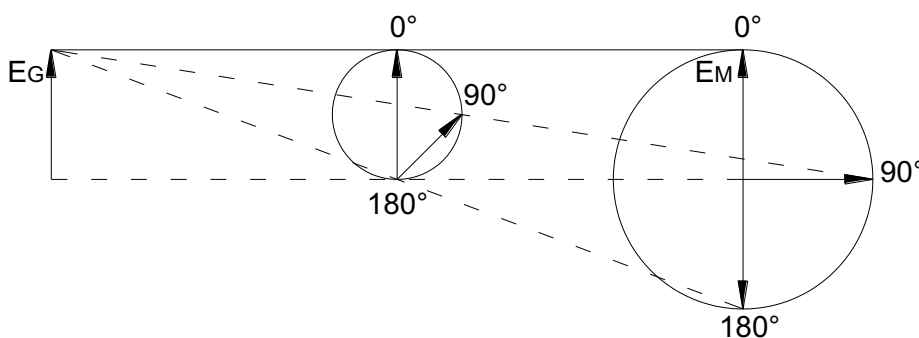


Figura 1- 16. SEP sencillo con los voltajes de las fuentes en forma fasorial (9)

1.5.- MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE LA OSCILACIÓN DE POTENCIA

Existen diferentes métodos para determinar la existencia de oscilaciones de potencia en un SEP, entre los cuales se tiene los siguientes:

1.5.1.- MÉTODO CONVENCIONAL

Durante una condición normal de operación, la impedancia medida por el relé de distancia se encuentra fuera de la zona de protección del relé y al momento de ocurrir una falla la impedancia cambia rápidamente de la zona de carga a la zona de operación del relé. En cambio durante una oscilación de potencia el cambio de impedancia es mucho más lento que durante una falla. (10)

Por esta razón los métodos convencionales calculan la variación de la impedancia para diferenciar si es una oscilación o una falla. Para determinar los cambios de la impedancia, los métodos convencionales utilizan características de impedancia concéntricas⁵ o características con cerco (Blinder)⁶

Las características concéntricas o los cercos sirven para medir el tiempo que se tarda en cruzar esta zona, si el tiempo de cruce es menor al tiempo fijado se trata de una falla, caso contrario si el tiempo de cruce es mayor que el tiempo fijado es una oscilación de potencia.

1.5.1.1.- CARACTERÍSTICAS CONCÉNTRICAS

Las características concéntricas son zonas similares a la de la última zona de protección del relé, separadas un ΔZ^7 en todas las direcciones, estas pueden ser dos características adicionales para la detección de oscilación de potencia, como se indica en la figura 1-17(a) o se puede formar las características concéntricas

⁵ Es una característica de impedancia similar a la zona de operación, sean cuadrilaterales o mho, estas son utilizadas para detección de una oscilación de potencia.

⁶ En el plano de complejo R-X son rectas paralelas a la impedancia y ayudan a la detección de oscilaciones de potencia.

⁷ Es la impedancia que se debe aumentar a la zona de mayor ajuste para formar la zona de detección de la oscilación.

con la zona de mayor ajuste de R-X, que puede ser la zona 3 o 4 y una característica adicional como se indica en la figura 1-17(b).

Una ventaja de las características concéntricas es que se puede determinar la oscilación antes de que la impedancia medida entre en la zona de operación.

La impedancia de arranque APOL se encuentra definida por los mayores ajustes de R y X de las zonas de protección del relé y la característica de impedancia PPOL se encuentra separada una distancia $ZDIF$ de la impedancia de arranque APOL en todas las direcciones.

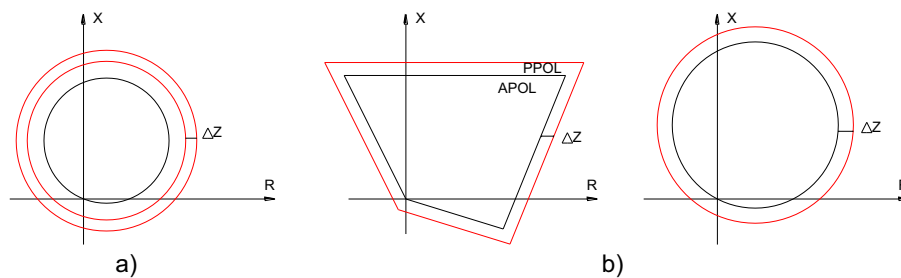


Figura 1- 17. Características concéntricas

1.5.1.2.- CARACTERÍSTICA CON CERCOS (BLINDER) (10)

La característica de dos cercos (blinder) mide el tiempo en el que la impedancia calculada por el relé de distancia tarda en cruzar los dos cercos, generalmente el cerco tiene valores hasta de 20 ohmios primarios (8).

Como se indica en la figura 1-18, el tiempo inicia cuando la impedancia cruza el cerco RRO y la medición termina cuando la impedancia cruza el cerco RRI, si el tiempo medido es mayor al tiempo ajustado se trata de una oscilación de potencia, pero si el tiempo medido es menor que el ajustado se trata de una falla.

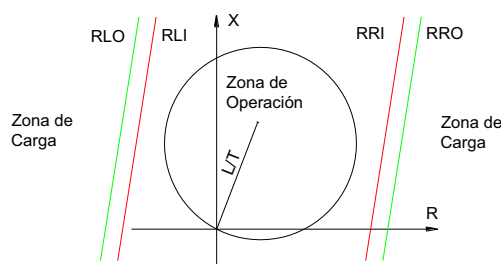


Figura 1- 18. Característica de dos cercos

Una de las ventajas de usar cercos para detectar oscilaciones de potencia es que pueden utilizar independientemente de las zonas de protección del relé de distancia.

Otra ventaja es que se optimiza la medición de la impedancia, debido a que los cercos se los coloca en forma paralela a la línea de transmisión y la oscilación de potencia entra normalmente en forma perpendicular a la línea de transmisión protegida.

1.5.1.3.- PROBLEMAS DE AJUSTES DE LAS CARACTERÍSTICAS CONCÉNTRICAS Y CON CERCOS (BLINDER) (10)

Existen varias condiciones que se deben cumplir para un correcto ajuste de las características concéntricas y con cercos.

- Las características que detectan la oscilación de potencia deben encontrarse fuera de la característica de mayor impedancia a bloquear, esto es para asegurar el tiempo suficiente que lleva a cabo el bloqueo de las zonas de operación.
- Las características que detectan la oscilación de potencia tienen que estar fuera del alcance de la zona de carga, para evitar la operación inadecuada de la función de oscilación durante cargas muy grandes.

Las condiciones anteriores se encuentran en función de la impedancia de la L/T y las impedancias de las fuentes como de indica en la figura 1-19.

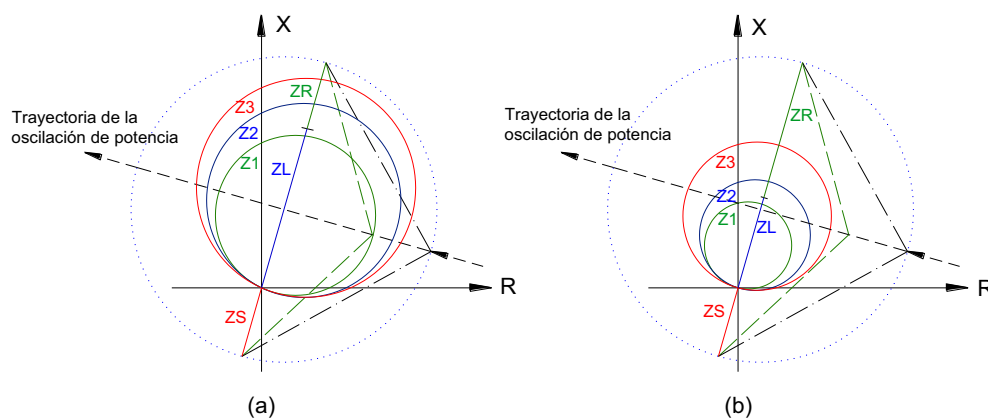


Figura 1- 19. Efecto de las impedancias de las fuentes y de la L/T en una oscilación de potencia

En la figura 1-19 se indica una representación en el plano complejo R-X de un sistema de una L/T y fuentes en los extremos, la oscilación de potencia divide la impedancia total del sistema en dos partes.

La figura 1-19(a) indica un sistema en que la impedancia de la L/T es grande en comparación con las impedancias de las fuentes en los extremos, en cambio en el sistema de la figura 1-19(b) muestra una L/T pequeña en comparación con las impedancias de las fuentes en los extremos.

En el sistema de la figura 1-19(a) con una separación angular entre las dos fuentes de voltaje en el cual el sistema se mantiene estable, la impedancia medida por el relé entra en la zona de operación 1 y 2, en este caso establecer la posición correcta de los cercos puede ser complicado y aun mas si la L/T se encuentra muy cargada ya que si existe un ligero cambio de la carga, esta puede ser detectada como una oscilación.

Para evitar bloqueos erróneos debido a la carga, se puede aplicar características de operación cuadrilaterales, pero en la actualidad los relés numéricos tienen una zona adicional de carga para evitar este problema.

En el sistema de la figura 1-19(b) con la misma separación angular de las fuentes que el sistema de la figura 1-19(a), la impedancia medida por el relé de distancia no ingresa a la zona de operación, en este caso es un poco más fácil establecer la posición correcta de los cercos.

Otra dificultad para el ajuste de los cercos es la separación de estos, ya que la variación de la impedancia depende del SEP, para esto se debe hacer estudios de estabilidad transitoria para determinar cuál es la mayor variación de la impedancia.

1.5.2.- CENTRO DE OSCILACIÓN - SCV (SWING CENTER VOLTAGE) (10)

Este método de detección de oscilaciones de potencia monitorea el voltaje en el centro de la impedancia de las dos fuentes llamado SVC. En la figura 1.20 se indica un diagrama de fasores de un sistema sencillo como el indicado en la figura 1-1.

En la figura 1-20 se indica el voltaje SCV, definido por la ecuación 10:

$$SCV \approx |V_S|. \cos(\varphi) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde $|V_S|$ es la magnitud del voltaje medido en el lugar donde se encuentra instalado el relé, φ es la diferencia entre el ángulo de $|V_S|$ y la corriente I .

SCV es una proyección de $|V_S|$ en la corriente I , como se puede observar en la figura 1-20.

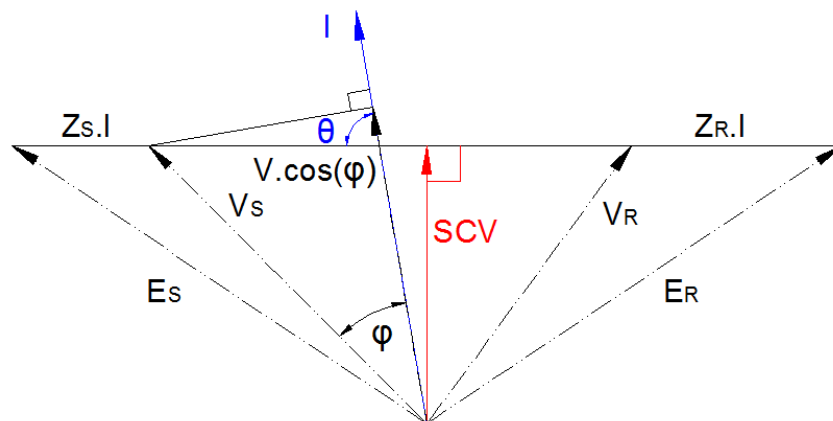


Figura 1- 20. Diagrama de fasores con la proyección de $|V_S|. \cos(\varphi)$

Si se considera al sistema con impedancias puramente inductiva, el ángulo θ se aproxima a 90° , esto hace que $|V_S|. \cos(\varphi)$ se aproxime a la magnitud del voltaje en el centro de la impedancia de las dos fuentes.

Si se calcula SCV en función de las fuentes del sistema y el ángulo δ se tiene:

$$SCV1 \approx E. \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde $E = E_S = E_R$, SCV1 se encuentra en su máximo valor cuando el ángulo de potencia δ es cero y se encuentra en su mínimo valor (cero) cuando el ángulo δ es 180° , estas condiciones son la que determinan una oscilación de potencia.

En una oscilación de potencia $|V_S|. \cos(\varphi)$ varía en función del ángulo δ con una pequeña velocidad, en cambio durante una falla en el sistema $|V_S|. \cos(\varphi)$ cambia mucho más rápido.

Por ejemplo en la figura 1-21, se indica los cambios de $|V_S|. \cos(\varphi)$ para una falla trifásica, el tiempo inicial de la falla es a los 2s y se mantiene hasta los 4s. En la figura 1-21 se muestra que existe una pronunciada variación $|V_S|. \cos(\varphi)$ al inicio y al final de la falla.

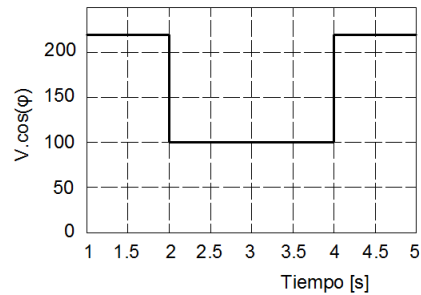


Figura 1- 21. Variación de $|V_S|. \cos(\varphi)$ en una falla trifásica (11)

En la figura 1-22, se indica la variación de $|V_S|. \cos(\varphi)$ para una oscilación de potencia y se observa que para este caso el valor de $|V_S|. \cos(\varphi)$ va disminuyendo continuamente.

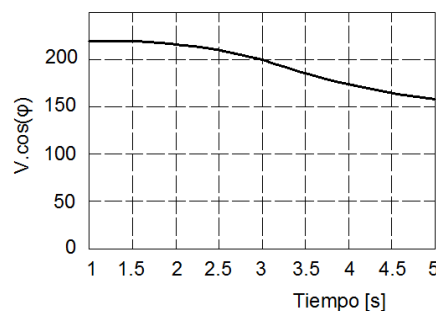


Figura 1- 22. Variación de $|V_S|. \cos(\varphi)$ en una oscilación de potencia (11)

Una de las ventajas de este método es que $SCV1$ se encuentra acotado entre 0 y 1 pu y que $SCV1$ es independiente de las impedancias del SEP.

1.5.3.- MÉTODO DE COMPONENTES SUPERPUESTAS (12)

1.5.3.1.- COMPONENTES SUPERPUESTAS

El teorema de superposición considera a cada fuente como independiente y el estado global del sistema es la suma de todos estados parciales que se obtienen considerando por separado cada una de las fuentes.

Por ejemplo en la figura 1-23 se observa la corriente de falla de un sistema, el teorema de superposición permite considerar esta corriente de falla como la suma entre la fuente del sistema (i_{mem}) y una fuente ficticia que simula los cambios producidos por la falla en la corriente (Δi_r).

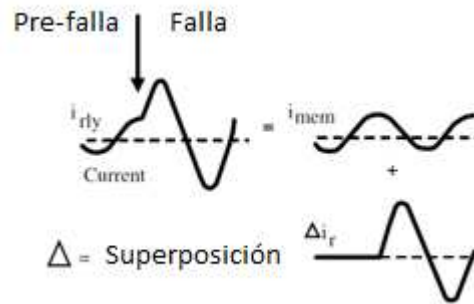


Figura 1- 23. Cálculo de componentes superpuestas

Los cambios de las medidas tanto de corriente (Δi_r) como de voltaje (Δv_r) están directamente relacionados con el tipo de falla.

1.5.3.2.- CÁLCULO DE LAS COMPONENTES SUPERPUSTAS

Para el cálculo de las componentes superpuestas el relé hace la diferencia entre el valor actual medido (cantidades de falla) y valores anteriores (cantidades de pre-falla), para obtener las cantidades de pre-falla el relé utiliza una memoria que únicamente la contiene los relés digitales.

En la figura 1-24, se indica uno de los métodos que utilizan los relés digitales para el cálculo de las componentes superpuestas, para ello utiliza dos muestras, la primera se graba 1 ciclo antes de la última muestra capturada y la segunda, 2 ciclos antes de la última muestra capturada por el relé, estas muestras se utilizan para predecir la muestra en el tiempo (t).

La predicción en el tiempo (t) es:

$$Gp_{(t)} = G_{(t-T)} + [G_{(t-T)} - G_{(t-2T)}] \quad \text{Ec. 12}$$

$$Gp_{(t)} = 2 \cdot G_{(t-T)} - G_{(t-2T)} \quad \text{Ec. 13}$$

Y la componente superpuesta es:

$$\Delta G(t) = G(t) - Gp(t)$$

Ec. 14

Donde:

$G(t)$: Muestra de corriente o voltaje en el tiempo (t).

$G_{(t-T)}$: Muestra de corriente o voltaje un ciclo antes que el tiempo (t).

$G_{(t-2T)}$: Muestra de corriente o voltaje dos ciclo antes que el tiempo (t).

$Gp(t)$: Predicción de corriente o voltaje en el tiempo (t).

$\Delta G(t)$: Componente superpuesta de corriente o voltaje en el tiempo (t).

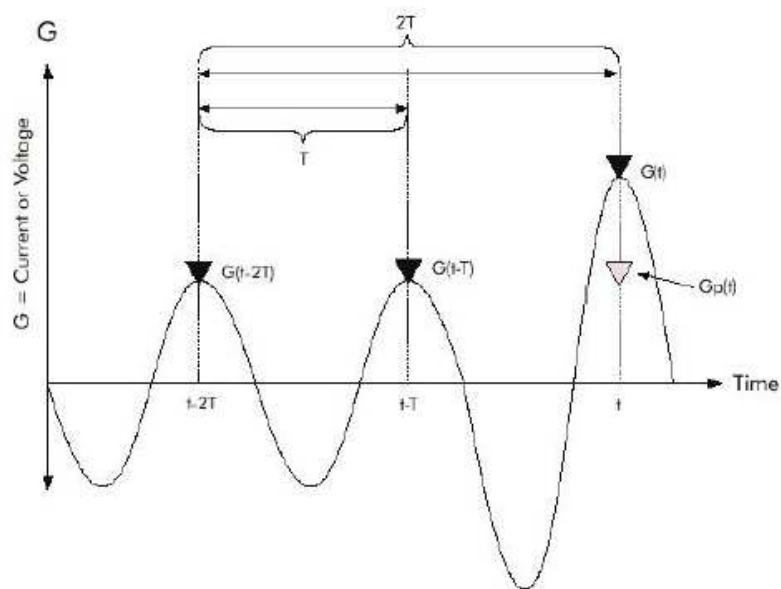


Figura 1- 24. Método que utiliza dos muestras para el cálculo de las componentes superpuestas (12)

Una ventaja del método es que proporciona una buena estimación del valor de la muestra prevista a partir de dos muestras de pre-falla.

1.5.3.3.- DETECCIÓN DE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA

La detección de una oscilación de potencia por el método de componentes superpuestas solo se puede utilizar en relés digitales, ya que utiliza una memoria para guardar las muestras de pre-falla.

Durante una oscilación de potencia existe un cambio continuo de la corriente esto es visto por el relé bloqueando la zona de operación.

En la figura 1-25, se observa la señal de bloqueo PH1 en el instante en la que se produce la oscilación de potencia, esta señal de bloqueo es activada ya que existe una variación entre la última muestra y los dos ciclos anteriores.

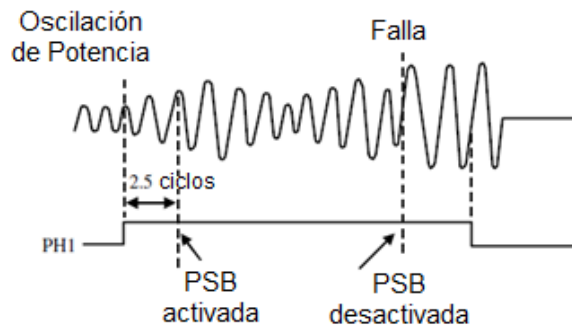


Figura 1- 25. Operación del relé por el método de componentes superpuestas durante una oscilación de potencia

Durante la oscilación de potencia existe una salida continua de PH1 y durante una falla la salida PH1 seguirá activa durante dos ciclos.

Una de las ventajas que tiene este método es que puede determinar cambios de potencia sean estos rápidos o lentos, con esto se garantiza el correcto bloqueo de las zonas de operación.

Con la utilización de este método el relé puede operar por la ocurrencia de una falla durante una oscilación de potencia.

1.6.- FORMATO COMÚN ESTÁNDAR PARA INTERCAMBIO DE DATOS TRANSITORIOS (COMTRADE) PARA SISTEMAS DE POTENCIA (IEEE Std C37.111-1999) (13)

La nueva tecnología digital usada en la protección, medición y control de sistemas eléctricos ayuda grabando los diferentes eventos transitorios que ocurren en el sistema de potencia en un archivo digital, para esto se utiliza un formato estándar

establecido por la IEEE⁸ para el intercambio o manipulación de información entre el equipo de protección y algún software.

El estándar define un formato para los archivos llamados COMTRADE que contiene la forma de onda transitoria de eventos recopilados en el SEP o simulaciones del sistema, facilitando el intercambio de datos y el almacenamiento en un medio físico.

1.6.1.- ARCHIVOS COMTRADE

Como se indica en el formato estándar, cada archivo COMTRADE tiene un conjunto de hasta cuatro archivos asociados los cuales tienen el mismo nombre diferenciándose por la extensión la cual es la que indica el tipo de archivo, de la siguiente manera:

- Header
- Configuration
- Data
- Information

1.6.1.1.- ARCHIVO HEADER (xxxxxxxx.HDR)

Este es un archivo de texto en formato ASCII⁹, el cual se utiliza para guardar información adicional para una mayor comprensión del registro por parte del usuario, este archivo es opcional.

1.6.1.2.- ARCHIVO CONFIGURATION (xxxxxxxx.CFG)

El archivo Configuration es un archivo de texto en formato ASCII que ayuda al usuario o a un programa computacional a entender los valores de los datos asociados en el archivo de datos (.DAT), este archivo tiene un formato estandarizado el cual consta con los siguientes datos:

⁸ IEEE corresponde a las siglas de (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en español Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

⁹ ASCII (Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información), es un código de caracteres basado en el alfabeto latino.

- Nombre de la Subestación, identificación del elemento que genera el registro, y el año del Estándar COMTRADE.
- Número y tipos de canales.
- Nombre del canal, unidades y factores de conversión
- Frecuencia de Línea.
- Frecuencia de muestreo y número de muestras de cada canal
- Fecha y tiempo del primer punto.
- Fecha y tiempo del punto de disparo.
- Tipo del archivo de datos
- Factor de multiplicación del tiempo

1.6.1.3.- ARCHIVO DATA (xxxxxxx.DAT)

El archivo Data contiene el valor de cada canal de entrada para cada muestra en el registro, representando a escala el evento muestreado. El archivo Configuration especifica factores de conversión para obtener unidades reales y también especificar el formato del archivo Datos que puede ser ASCII o un formato binario¹⁰.

Por lo tanto al menos los archivos Configuration and Data tienen que ser generados para lograr un análisis adecuado.

1.6.1.4.- ARCHIVO INFORMATION (xxxxxxx.INF)

Archivo Information es opcional, por lo tanto no es muy crítico, este tiene información extra con respecto al evento del registro COMTRADE la cual está a disposición de los usuarios.

¹⁰ Es un sistema de numeración en el que los números se representan utilizando solamente las cifras cero y uno (0 y 1).

CAPITULO II

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DIGITAL

En este capítulo se describe los bloques que utiliza la función de oscilación de potencia del relé de distancia SIEMENS 7SA6, para determinar la existencia de una oscilación en el sistema y la implementación del algoritmo en el paquete computacional Matlab. También se indica una metodología para la calibración de la función de oscilación de potencia.

2.1.- RELÉS DIGITALES

Los relés digitales (IEDs) son muy utilizados actualmente por el gran avance de la tecnología, estos tienen tecnología numérica, un diseño compacto, funciones de protección, medida, control, monitoreo y también tiene la capacidad de comunicarse con un centro de control a través de diferentes protocolos de comunicación.

Por las eficientes características, estos relés minimizan el tiempo de operación ayudando al sistema de protecciones ya que tienen alta velocidad y una gran selectividad.

A continuación se indica el método que utilizan las funciones de bloqueo de oscilaciones de potencia (*PSB*) y disparo por oscilación de potencia inestable o fuera de paso (*OST*) del relé de distancia digital SIEMENS 7SA6.

2.2.- MÉTODO QUE UTILIZA EL RELÉ SIEMENS 7SA6 PARA DETECTAR UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA (6)

El relé SIEMENS 7SA6 es un relé de distancia que tiene una función adicional *Power swing detection* (Detección de oscilación de potencia), la cual bloquea las zonas de operación durante una oscilación de potencia estable y también permite la operación del relé durante una oscilación inestable.

La función de detección de una oscilación de potencia funciona siempre y cuando la impedancia medida por el relé se encuentre dentro de la zona de operación del relé de distancia.

Para la detección de una oscilación de potencia, el relé SIEMENS 7SA6 mide la velocidad de la impedancia y genera un aviso si la impedancia entra en la zona de detección de la oscilación. Como se señala en el capítulo 1, durante una oscilación de potencia estable la velocidad de la impedancia es mucho menor que durante una falla.

Para la detección adecuada de una oscilación de potencia, el relé SIEMENS 7SA6 utiliza en cada una de las tres fases el diagrama lógico que se muestra en la figura 2-1.

Para determinar si es una oscilación de potencia, el relé debe cumplir con todos los bloques indicados en la figura 2-1, excepto con el bloque *Control de Trayecto OST*, que se utiliza para detectar una oscilación de potencia inestable.

Una vez detectada la oscilación de potencia la función del relé activa la salida llamada en la figura 2-1 como "*Oscilación de Potencia*".

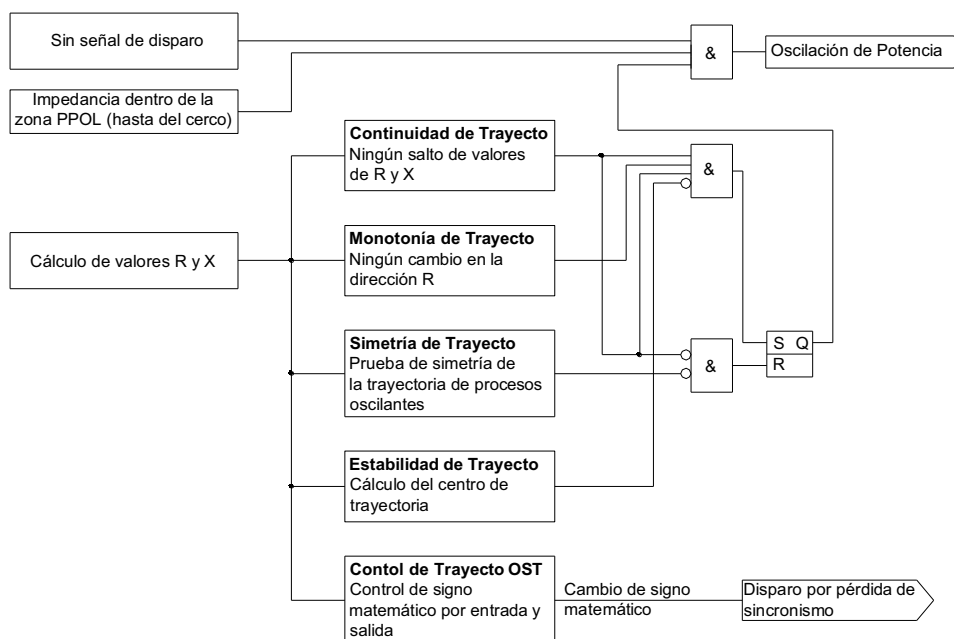


Figura 2- 1. Diagrama lógico para la detección de oscilación de potencia del relé SIEMENS 7SA6

2.2.1.- BLOQUE SEÑAL DE DISPARO

Este bloque es editado por el ingeniero de protecciones puede ser 1_L (uno lógico) o 0_L (cero lógico).

Cuando el bloque se encuentra en *uno lógico* se activa la función para detectar la oscilación de potencia, en cambio si es *cero lógico* la función de detectar la oscilación de potencia esta desactivada. Este bloque se encuentra pre ajustado por el fabricante como *cero lógico* (No se encuentra activado)

2.2.2.- BLOQUE IMPEDANCIA EN LA ZONA DE OPERACIÓN PPOL

Este bloque determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica de impedancia PPOL (impedancia de oscilación).

La característica de impedancia PPOL se encuentra separada una distancia *ZDIF* de la impedancia de arranque APOL en todas las direcciones como se indica en la figura 2-2.

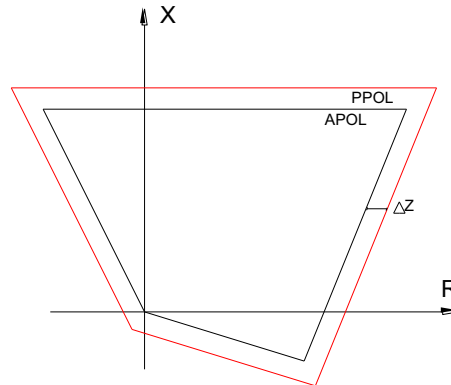


Figura 2- 2. Característica de operación para la detección de una oscilación de potencia

La impedancia de arranque APOL se encuentra definida por los mayores ajustes de R y X de las zonas de protección del relé.

La distancia *ZDIF* se define según la corriente nominal del relé de distancia, así para un relé de corriente nominal de 5 A la impedancia *ZDIF* es igual a 1 Ω secundarios, para una corriente nominal de 1 A, *ZDIF* es igual a 5 Ω secundarios.

2.2.3.- BLOQUE CONTINUIDAD DEL TRAYECTO

Este bloque tiene por salida *uno lógico* si no existe ningún salto de los valores medidos de R y X, es decir se define como una oscilación de potencia sino existe ninguna variación pronunciada de la impedancia.

Para medir la variación de la impedancia el relé SIEMENS 7SA6 calcula la diferencia de un punto de prueba y el próximo, esta diferencia debe ser pequeña para que se pueda determinar como una oscilación.

Es decir que $|dR(k) - dR(k + 1)| < \text{valor umbral}$, en la figura 2-3 se aclara el cálculo de la variación de la impedancia, durante una oscilación de potencia la variación es pequeña y menor al *valor umbral*, con esto la salida del bloque es *uno lógico*.

Durante una falla la variación de la impedancia es mayor al *valor umbral* y salida del bloque es *cero lógico*.

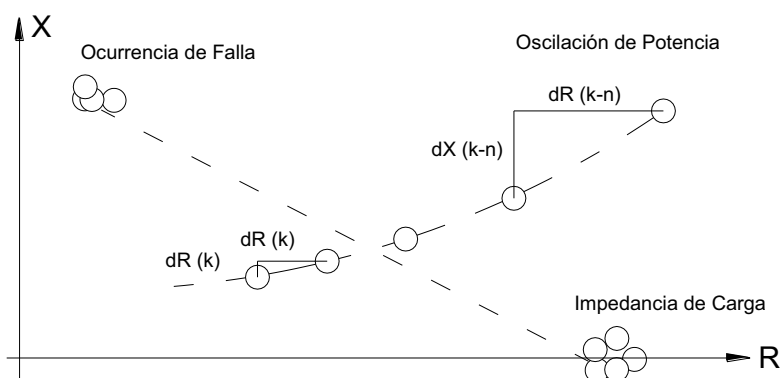


Figura 2- 3. Impedancia durante una oscilación de potencia y una falla

La variación de la impedancia se supervisa en ciclos de $\frac{1}{4}$ del periodo, es decir que el relé de distancia SIEMENS 7SA6 obtiene una medición de la impedancia cada $0,004167$ s para una frecuencia de 60 Hz del SEP.

2.2.4.- BLOQUE MONOTONÍA DEL TRAYECTO

Durante una oscilación de potencia la impedancia medida se desplaza por el eje R, como se indica en la figura 2-4, y este bloque detecta la variación de la impedancia en la dirección R del plano complejo R-X.

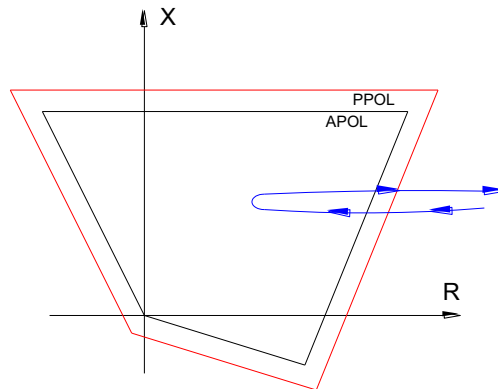


Figura 2- 4. Impedancia durante una oscilación de potencia

El resultado del bloque es *uno lógico* si la parte real de la impedancia (resistencia) se mueve hacia la derecha del plano complejo R-X, caso contrario si la resistencia se desplaza hacia la izquierda del plano complejo R-X la salida del bloque es *cero lógico* siempre y cuando esta resistencia se encuentre fuera de la impedancia PPOL.

2.2.5.- BLOQUE SIMETRÍA DEL TRAYECTO

Este bloque calcula la impedancia en cada fase individualmente y las compara con las dos fases restantes, si en el sistema existe una oscilación de potencia las impedancias calculadas son similares y la salida del bloque es *uno lógico*.

En cambio durante una falla asimétrica las impedancias calculadas en cada fase son diferentes y la salida del bloque es *cero lógico*.

Si en el relé se encuentra cerrado un polo es decir que solo están operando dos de las tres fases y ocurre una oscilación de potencia, entonces la simetría se comprueba entre las dos fases que se encuentran operando.

2.2.6.- BLOQUE ESTABILIDAD DEL TRAYECTO

La impedancia medida por el relé de distancia puede ingresar a la zona de operación durante una oscilación de potencia, esto corresponde a un punto de la curva de inestabilidad estática.

En la figura 2-5 se indica la curva de inestabilidad estática, para determinar una oscilación el relé calcula el centro de la curva de inestabilidad estática y

comprueba si el valor de la reactancia (X) medida por el relé es menor que el centro de la curva.

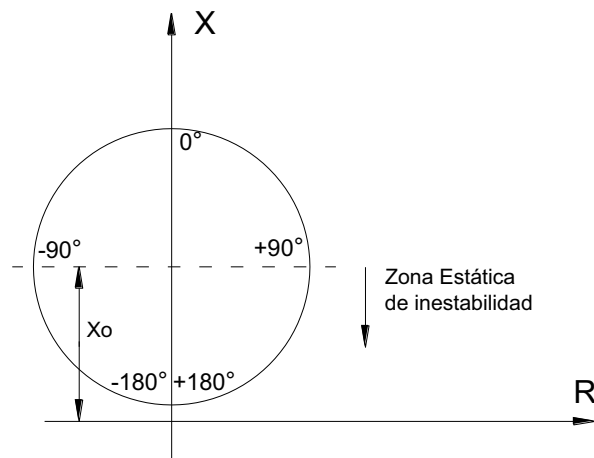


Figura 2- 5. Curva de inestabilidad estática

En la figura 2-1, se puede observar que si el bloque de estabilidad del trayecto cumple con la condición, que la reactancia (X) medida por el relé es menor que el centro de la curva, la salida del bloque es *uno lógico*, provocando que se desactive la señal de salida "Oscilación de Potencia".

Caso contrario si no cumple con la condición de estabilidad del trayecto la salida de este bloque es *cero lógico*, comunicando al diagrama lógico de la figura 2-1 que se encuentra detectando una oscilación de potencia.

2.2.7.- BLOQUE CONTROL DEL TRAYECTO OST

Este bloque provoca la actuación del relé de distancia si la oscilación de potencia es inestable.

Para determinar si es una oscilación de potencia es estable o inestable, el bloque control del trayecto OST compara el signo de la parte resistiva (R) de la impedancia medida al momento de ingresar y salir de la característica APOL.

Si la parte resistiva (R) de la impedancia tiene el mismo signo al momento de ingresar y salir de la característica APOL, la oscilación de potencia tiende a estabilizarse.

Caso contrario cuando la parte resistiva (R) de la impedancia tiene diferente signo al momento de ingresar y salir de la característica APOL, (se indica en la figura 1-10 Caso 3) se trata de una oscilación de potencia inestable y el relé genera una orden de disparo.

2.3.- LÓGICA DE BLOQUEO POR OSCILACIÓN DE POTENCIA (PSB) DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN DEL RELÉ SIEMENS 7SA6 (6)

Una vez detectada la oscilación de potencia por el diagrama lógico que se indica en la figura 2-1, el relé bloquea las zonas de operación por un tiempo ajustable como se indica en el diagrama lógico de la figura 2-6.

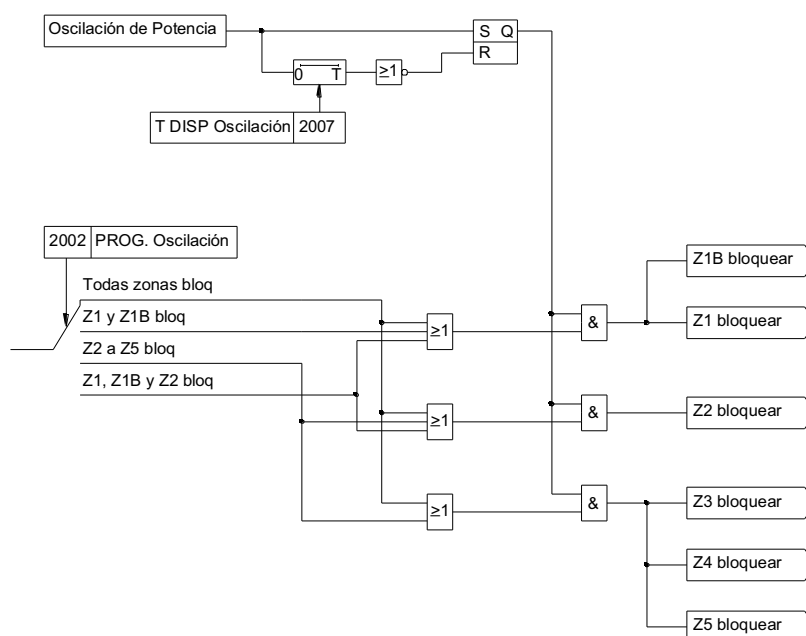


Figura 2- 6. Diagrama lógico de bloqueo de las zonas de operación por detección de una oscilación de potencia del relé SIEMENS 7SA6

El tiempo ajustable en el diagrama lógico se llama *T DIP Oscilación*, según las características del relé SIEMENS 7SA6 este tiempo se encuentra en un valor preajustado de 0.08 s y las posibilidades de ajuste se encuentran entre 0.08 s a 5 s, con incrementos de 0.01 s.

Las zonas bloqueadas durante una oscilación de potencia pueden ser ajustadas por el ingeniero de protecciones según el requerimiento del sistema, para esto se utiliza el selector llamado *PROG Oscilación* que se indica en el diagrama lógico de la figura 2-6.

Según la posición del selector *PROG Oscilación* el relé de distancia puede bloquear todas las zonas, bloquear la zona 1 y zona 1B (zona de sobre alcance), bloquear de la zona 2 a la zona 5 y bloquear la zona 1, zona 1B y la zona 2.

2.4.- LÓGICA DE DISPARO POR OSCILACIÓN DE POTENCIA INESTABLE (OST) DEL RELÉ SIEMENS 7SA6 (6)

La función de disparo por oscilaciones de potencia inestables (OST) es activada por el ingeniero de protecciones, el relé SIEMENS 7SA6 tiene un pre-ajuste *Power Swing trip = NO*.

Una vez activada la función *Power Swing trip* y si la impedancia medida por el relé cumple con los criterios de detección de una oscilación de potencia lo primero que hace el relé es bloquear las zonas de operación según se parametrize la función PSB.

Si la resistencia (R) identificada como una oscilación de potencia sale de la característica PPOL con signo diferente al que ingreso a la zona, el relé dispara por oscilación de potencia inestable.

La función OST solo puede ser activada si la función PSB se encuentra correctamente parametrizada.

2.5.- IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DIGITAL DEL RELÉ SIEMENS 7SA6 PARA LA DETECCIÓN DE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA

Para la implementación del algoritmo que utiliza el relé SIEMENS 7SA6 en la detección de una oscilación de potencia se utiliza el paquete computacional Matlab 7.8.

Matlab es un programa que realiza un sin número de cálculos con vectores y matrices, tiene un lenguaje de programación propio, también puede trabajar con números escalares, cadena de caracteres y realizar una gran variedad de gráficos en dos y tres dimensiones.

En la figura 2-7 se muestra un proceso a seguir en forma de un diagrama funcional de la rutina de programación llamada FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia).

La ventana principal de la rutina de programación que ayuda a la calibración y simulación de la función de oscilación de potencia se indica en la figura 2-8.

En la rutina de programación FORDI 1.0 se considera que las funciones PSB y OST se encuentran activadas.

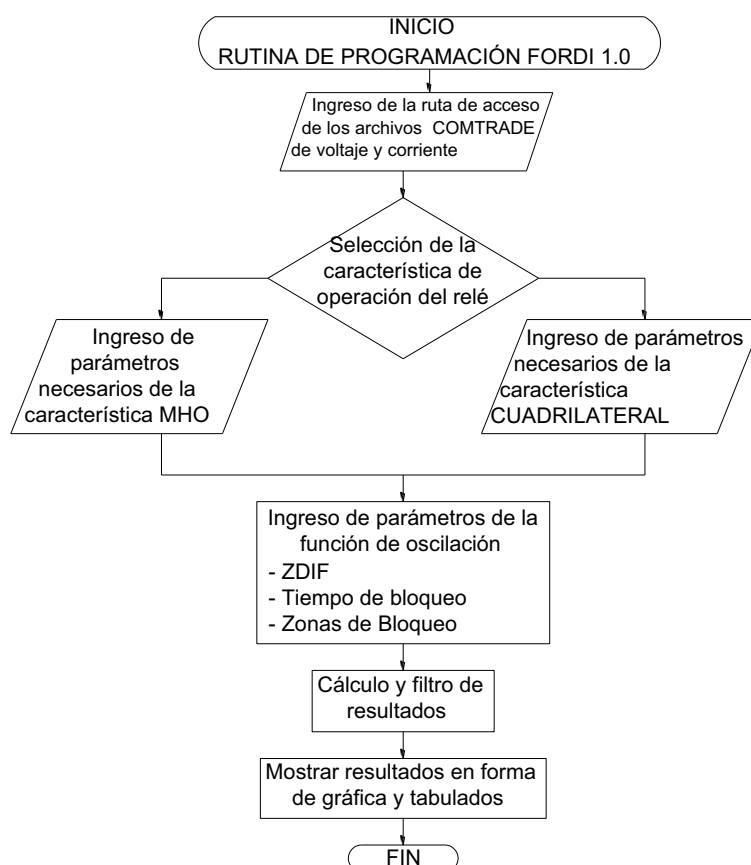


Figura 2- 7. Diagrama funcional de la rutina de programación FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia)

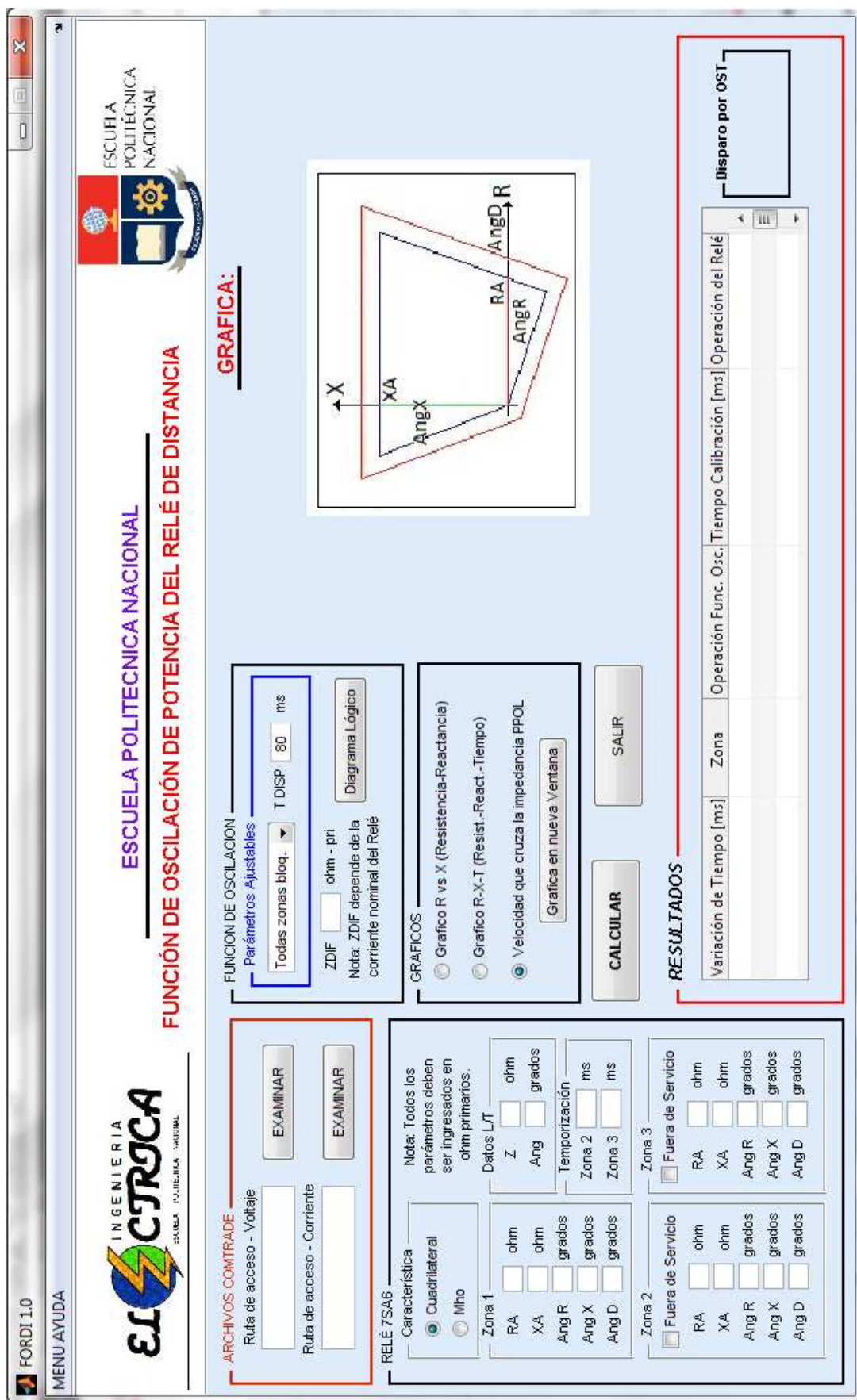


Figura 2-8. FORDI 1.0 (Función de Oscilación del Relé de Distancia)

2.5.1.- INGRESO DE DATOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Los valores de voltaje y de corriente primarios se ingresan a través de archivos COMTRADE, al presionar el botón *EXAMINAR* aparece una ventana en la que se puede direccionar el archivo .DAT que contiene los datos de corriente y de voltaje, como se indica en la figura 2-9.

También se puede escribir directamente la ruta de acceso y el nombre del archivo COMTRADE donde se encuentra tanto los valores de voltaje como de corriente.

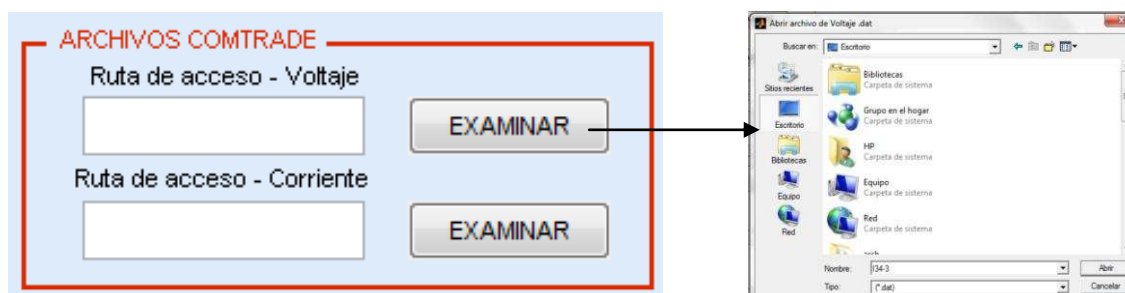


Figura 2- 9. Ingreso de la ruta de acceso de los archivos COMTRADE

Los valores de voltaje y corriente tienen que encontrarse en forma de un fasor, por lo tanto los archivos COMTRADE deben contener dos señales analógicas, en la primera señal debe encontrarse el módulo del voltaje o corriente y en la segunda señal debe encontrarse el ángulo en grados del voltaje o corriente. Esto es necesario con el fin de obtener valores de entrada correctos.

2.5.2.- INGRESO DE DATOS GENERALES DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN

En la figura 2-10 se indica la parte izquierda de la rutina de programación FORDI 1.0, en la que se debe ingresar los parámetros de la línea de transmisión a proteger, las zonas de operación del relé y los tiempos de temporización de las zonas 2 y 3.

Todos los parámetros deben ser ingresados en ohmios primarios ya que los datos de voltaje y corriente se encuentran en valores primarios.

El ingreso de los datos de las diferentes zonas de operación depende de la característica a utilizarse, se puede seleccionar entre zonas de operación *Cuadrilateral* o *Mho*.

En la figura 2-11(a) se indica de una manera clara los datos que se ingresan para una característica cuadrilateral y de una manera similar para una característica mho en la figura 2-11(b), estas figuras se las puede observar a la derecha de la rutina de programación FORDI 1.0.

The screenshot shows the 'RELÉ 7SA6' configuration screen. It includes the following elements:

- Característica:** Radio buttons for 'Cuadrilateral' (selected) and 'Mho'.
- Nota:** 'Todos los parámetros deben ser ingresados en ohm primarios.'
- Zona 1:** Parameters RA, XA, Ang R, Ang X, and Ang D, each with a checkbox and unit (ohm or grados).
- Datos L/T:** Parameters Z and Ang with checkboxes and units (ohm or grados).
- Temporización:** Parameters for Zona 2 and Zona 3 with checkboxes and unit (ms).
- Zona 2 and Zona 3:** Each has a 'Fuera de Servicio' checkbox and parameters RA, XA, Ang R, Ang X, and Ang D with checkboxes and units.

Callouts on the left indicate 'Selección de la zona de operación' pointing to the characteristic type and 'Ingreso de datos de las características de operación seleccionadas' pointing to the parameter fields. Callouts on the right indicate 'Datos de la L/T' pointing to the L/T data fields and 'Temporización de las zonas 2 y 3' pointing to the timing fields.

Figura 2- 10. Ingreso de datos generales en FORDI 1.0

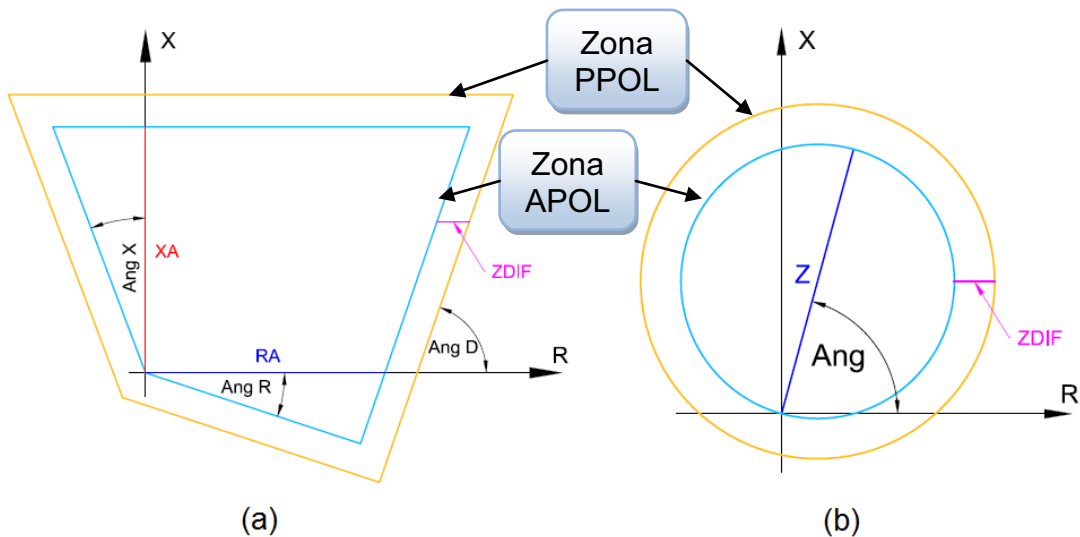


Figura 2- 11. Zonas de operación que utiliza FORDI 1.0

Se considera a la zona 1 como instantánea y las zonas 2 y 3 temporizadas por un tiempo ajustable en *ms*.

Solo se simulan tres zonas de operación ya que en la práctica son las más utilizadas para la protección de las líneas de transmisión ante fallas.

Al seleccionar la opción *Fuera de Servicio*, la cual se encuentra en cada zona de operación, oculta a la zona y no la considera en el caso de estudio.

2.5.3.- INGRESO DE DATOS DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN DEL RELÉ

En la figura 2-12 se indica la ventana en la que se debe ingresar los datos que necesita la función de oscilación del relé SIEMENS 7SA6.

Los parámetros ajustables en este relé son las zonas de bloqueo y el tiempo total de bloqueo.

Las zonas de bloqueo se pueden seleccionar entre bloquear todas las zonas de operación, bloquear la zona 1, bloquear las zonas 2 y 3 y bloquear las zonas 1 y 2.

El tiempo de bloqueo se debe ingresar en *ms* y se encuentra preestablecido ajuste de 80 *ms*.

En el relé SIEMENS 7SA6 el parámetro ZDIF es fijo y depende de la corriente nominal del relé que se esté utilizando, en la rutina de programación FORDI 1.0 el parámetro ZDIF es ingresado por el usuario para facilitar calibración en diferentes niveles de voltaje y calibración de relés que tengan una lógica de operación similar a la del relé SIEMENS 7SA6.

En la ventana que se indica en la figura 2-12, *ZDIF* debe ser ingresada en valores primarios, como se dijo anteriormente este valor depende de las relaciones de los TC, TP y de la corriente nominal del relé SIEMENS 7SA6.

Figura 2- 12. Ingreso de datos de la función de oscilación

Presionando el botón *Diagrama Lógico* se desplaza una nueva ventana en la que se indica el diagrama lógico total que utiliza el relé SIEMENS 7SA6 para detectar una oscilación de potencia.

2.5.4.- RESULTADOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN

Después de presionar el botón *Calcular* la rutina de programación procesa los datos de entrada y los muestra en la tabla que se indica en la figura 2-13, esta se encuentra en la parte inferior de la rutina de programación FORDI 1.0.

Variación de Tiempo [ms]	Zona	Operación Func. Osc.	Tiempo Calibración [ms]	Operación del Relé
175	1	1	175	No Trip

Disparo por OST
NO

Figura 2- 13. Resultados de la rutina de programación

En la tabla se observan varios resultados que se encuentran relacionados directamente.

- **Variación de Tiempo.-** Es el tiempo en que la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la zona de operación y cumple con todos los criterios de detección de una oscilación. La zona de operación se indica en la columna dos de la tabla de resultados y las unidades de la variación del tiempo se encuentran en *ms*.
- **Zona.-** Indica el número 1, 2 o 3 para la representación del estudio de la zona 1, zona 2 o zona 3 respectivamente.
- **Operación de la Función de Oscilación.-** En esta columna indica si el relé detecta una oscilación de potencia o una falla en la zona de operación indicada en la columna dos.

En el caso de que el relé detecte como una falla se muestra "0" y si detecta una oscilación de potencia indica "1" si es la primera oscilación que ingresa al relé, "2" para la segunda oscilación y así sucesivamente para las siguientes oscilaciones que ingresan a la zona de operación.

- **Tiempo de Calibración.-** Si el relé detecta una oscilación de potencia, en esta columna se observa el tiempo aproximado mínimo de bloqueo que necesita el relé, para que no opere en una condición de oscilación de potencia.

En el caso de que una oscilación ingrese a varias zonas de operación, el tiempo aproximado mínimo de bloqueo es el que se muestra en la zona de mayor alcance, antes de que la impedancia medida por el relé salga de la última zona de operación.

- **Operación del Relé.-** Tiene dos opciones Trip y No Trip (Disparo y No Disparo). Si la operación del relé es Trip los resultados que se indican en las siguientes columnas no son validos debido a que el relé ya operó.

En la ventana de resultados también se indica una casilla que muestra el estado del disparo por oscilación de potencia inestable (OST), esta puede ser, *SI* para una operación de la función OST y *NO* para la no operación de la función.

2.5.5.- GRÁFICOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN

En la rutina de programación FORDI 1.0 se muestran varios gráficos para el mejor entendimiento de las oscilaciones de potencia en el relé de distancia.

En la figura 2-14 se observa la ventana en la que se tiene una lista de tres gráficos que se muestran en FORDI 1.0.

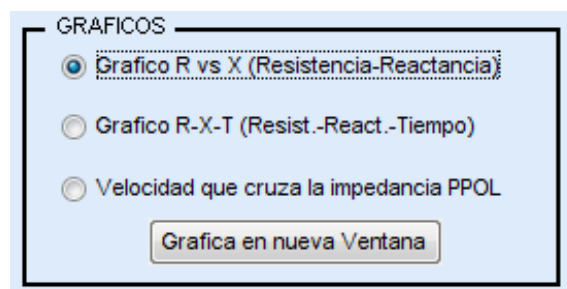


Figura 2- 14. Ventana de gráficos que se muestran en FORDI 1.0

Al presionar el botón *Grafica en nueva Ventana* inmediatamente aparece una nueva ventana en la que se puede manipular la grafica presentada en FORDI 1.0

2.6.- DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA SUBROUTINA DE PROGRAMACIÓN

El código que utiliza la rutina de programación FORDI 1.0 consta de varios archivos (*.m, *.fig), el programa consta de una interfaz grafica para la utilización sencilla de la rutina de programación, cuenta de varios archivos de imagen (*.jpg y *.png) que son utilizados como elementos virtuales, también posee un archivo de documentación (*.pdf) en el que se encuentra el manual del usuario de la rutina de programación.

Entre los archivos M-File más importantes se mencionan los siguientes:

- PRESENTACION.m
- FUNCIONDEOSCILACION.m
- ARCHIVO.m
- PRINCIPAL.m
- IMPEDANCIA_EN_POLP.m
- CONTINUIDAD_DEL_TRAYECTO.m
- MONOTONIA_DEL_TRAYECTO.m
- ESTABILIDAD_DEL_TRAYECTO.m
- FUNCIONOST.m

2.6.1.- PRESENTACION.m

El archivo presentacion.m muestra una ventana en la que se describe información general del proyecto de titulación, también inicia la rutina de programación FORDI 1.0 direccionando al archivo funciondeoscilacion.m para que se ejecute la interfaz gráfica.

2.6.2.- FUNCIONDEOSCILACION.m

En el archivo funciondeoscilacion.m se encuentra todo el código de programación para obtener la interfaz grafica, este archivo ejecuta algunas subrutinas para realizar el proceso de cálculos y graficas.

2.6.3.- ARCHIVO.m

Esta subrutina abre los archivos .DAT y .CFG para obtener los valores reales que tiene el archivo COMTRADE, el dato de entrada de esta subrutina es la ruta de acceso donde se encuentra el archivo COMTRADE, incluido el nombre y la extensión .DAT

2.6.4.- PRINCIPAL.m

En la figura 2-15 se muestra el diagrama de flujo del archivo principal.m, esta rutina de programación ejecuta las subrutinas de los bloques impedancia en PPOL, continuidad del trayecto, monotonía del trayecto y estabilidad del trayecto.

Las subrutinas utilizadas en el diagrama de flujo se detallan más adelante.

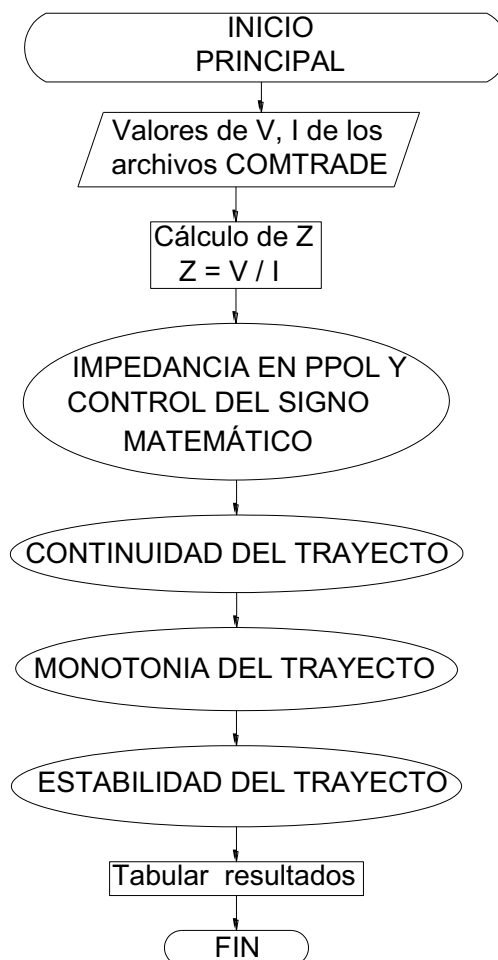


Figura 2- 15. Diagrama de flujo del archivo principal.m

2.6.5.- IMPEDANCIA_EN_POLP.m

Esta subrutina de programación discrimina si la característica de operación es del tipo Mho o Cuadrilateral e indica si la impedancia ingresa o no ingresa a la zona de operación.

En la figura 2-16 se muestra el diagrama de flujo utilizado para determinar si la impedancia calculada por el relé se encuentra dentro de la zona de operación PPOL, también en esta subrutina se discrimina entre una característica de operación mho y cuadrilateral.

Las subrutinas dentro de la zona mho y dentro de la zona cuadrilateral se detallan en las figura 2-17 y 2-18 respectivamente.

Estas subrutinas contienen como valores de entrada los vectores de resistencia (R), reactancia (X), la dimensión del vector R (#datos) y los datos necesarios para formar la característica de operación a utilizarse.

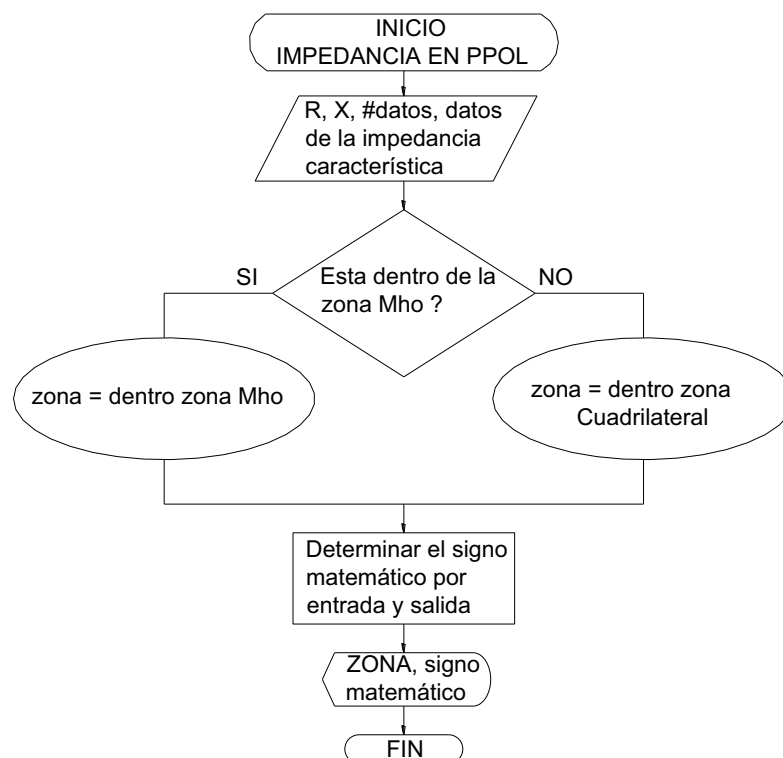


Figura 2- 16. Diagrama de flujo que determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica PPOL

El resultado de esta subrutina es un vector llamado zona que contiene, "1" si la impedancia se encuentra dentro de la zona de operación y caso contrario "0" si la impedancia se encuentra fuera de la zona de operación utilizada.

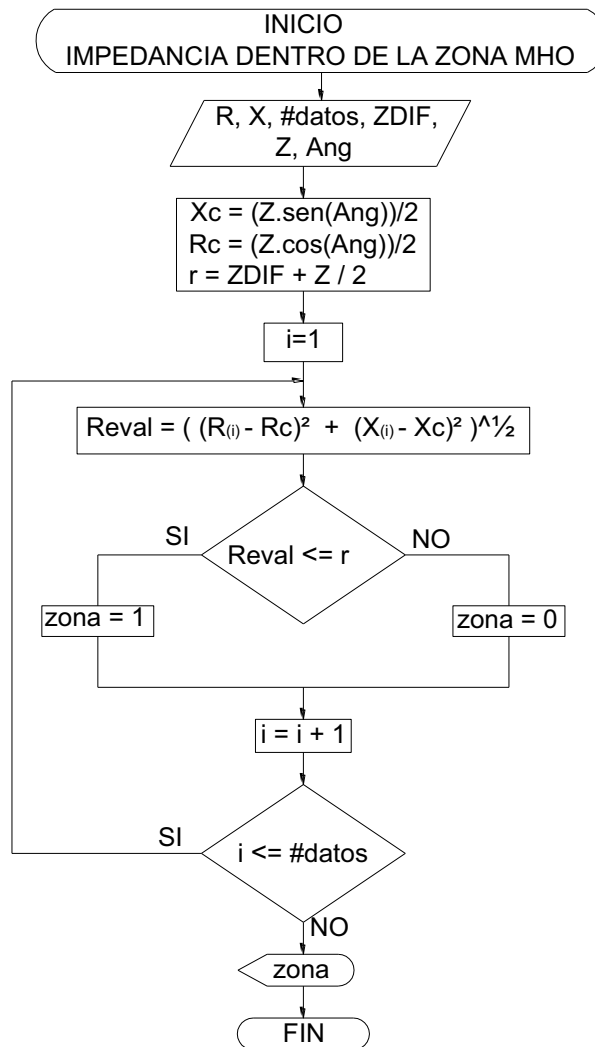


Figura 2- 17. Diagrama de flujo que determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica Mho

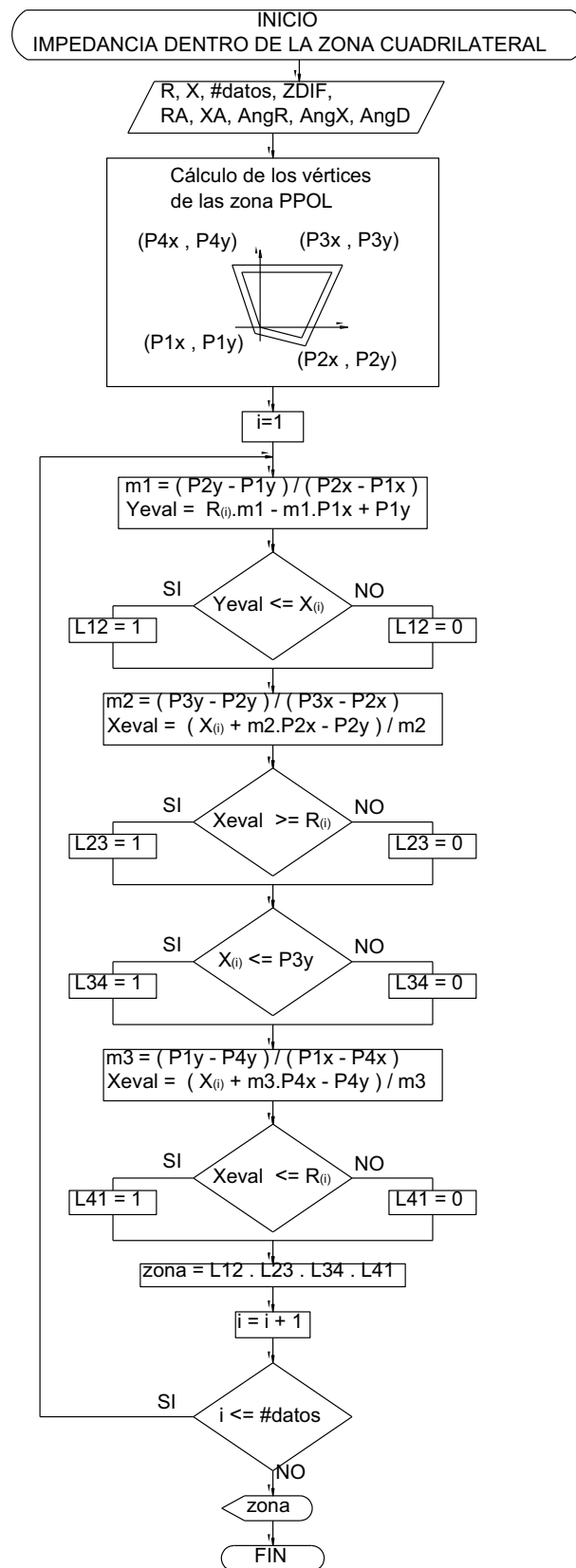


Figura 2- 18. Diagrama de flujo que determina si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la característica cuadrilateral

2.6.6.- CONTINUIDAD_DEL_TRAYECTO.m

El archivo CONTINUIDAD_DEL_TRAYECTO.m mide la variación de la impedancia calculando la diferencia de un punto de prueba y el próximo, para esto utiliza la inecuación $|dR(k) - dR(k + 1)| < \text{valor umbral}$. En la figura 2-19 se muestra el diagrama de flujo del bloque continuidad del trayecto.

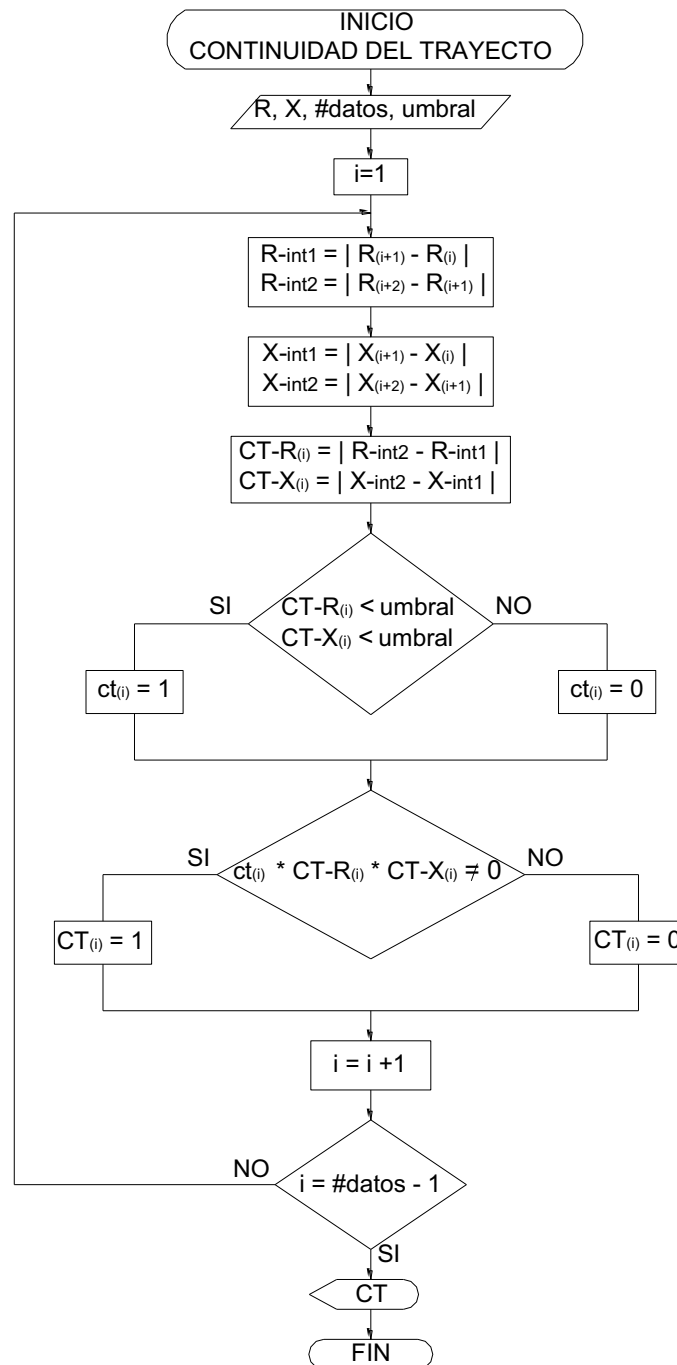


Figura 2- 19. Diagrama de flujo del bloque continuidad del trayecto

Los datos de entrada de la subrutina continuidad del trayecto son: el vector de resistencia (R) y reactancia (X), la dimensión del vector de R (#datos) y el valor umbral.

El resultado es un vector denominado CT en el que contiene "1" si la variación de la impedancia en un determinado tiempo es menor al valor umbral, caso contrario contiene el valor de "0".

2.6.6.1.- DETERMINACIÓN DEL VALOR UMBRAL

El valor umbral es un valor fijo que no es proporcionado por el fabricante, por esta razón se asume un valor igual al de ZDIF, se lo justifica asumiendo un SEP que se indica en la figura 2-20.

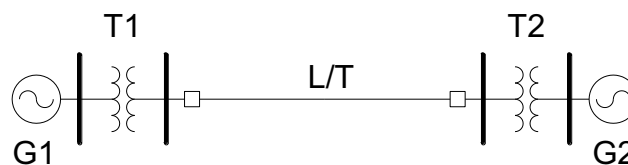


Figura 2- 20. Sistema eléctrico de potencia de prueba

El SEP consta de dos generadores, dos transformadores de la misma potencia en los extremos y una línea de transmisión. El valor de las reactancias de los generadores y L/T se toma como referencia parámetros estándar citados en el libro "Power System Stability And Control" de Prabha Kundur.

En la tabla 2-1 se indica la reactancia de las L/T para diferentes niveles de voltaje asumiendo una longitud adecuada y despreciando la resistencia y capacitancia de la L/T.

Tabla 2- 1. Datos característicos de L/T (1)

Voltaje nominal del SEP [kV]	X [ohm/km]	L [km]	XL [ohm]
230	0,488	250	122
500	0,325	510	165,7

Para determinar la potencia que puede circular por la L/T se toma en cuenta el método analítico de cargabilidad de líneas propuesto por St. Clair, el estudió la característica de transferencia de potencia en función de la longitud de la L/T. (14)

Desde 1953 St. Clair difundió la curva de cargabilidad que se indica en la figura 2-21. Esta curva indica la potencia que puede transmitir la L/T en función del SIL (Surge Impedance Loading) y según la longitud de la L/T, la longitud debe encontrarse en millas.

Donde **SIL** es la potencia entregada por una línea sin pérdidas a una resistencia de carga igual a la impedancia característica $Z_c = \sqrt{L/C}$, los valores típicos se indican en la tabla 2-2. (15)

Tabla 2- 2. Valores de SIL para L/T aéreas típicas de 60 Hz (15)

Voltaje nominal del SEP [kV]	$SIL = V_n^2 / Z_c$ [MW]
230	134 - 145
500	850 - 1075

Tomando como referencia la longitud de la L/T que se indica en la tabla 2-1, asumiendo el valor del SIL según la tabla 2-2 para cada nivel de voltaje y observando la curva de St. Clair se determina el valor de la potencia que puede transmitir la L/T.

Como se indica en la tabla 2-3 la potencia que puede circular por la L/T es la multiplicación de K_{SIL} y SIL, esta potencia es tomada como potencia base para el cálculo de los valores reales de las reactancias de los transformadores y de los generadores.

K_{SIL} se obtiene de la curva de St. Clair según la longitud de la L/T.

Tabla 2- 3. Potencia de transmisión según St. Clair

Voltaje nominal del SEP [kV]	L [millas]	SIL [MW]	K_{SIL} (St. Clair)	$S_b[MVA]=K_{SIL}*SIL$
230	155	134	1,4	188
500	317	850	0,95	808

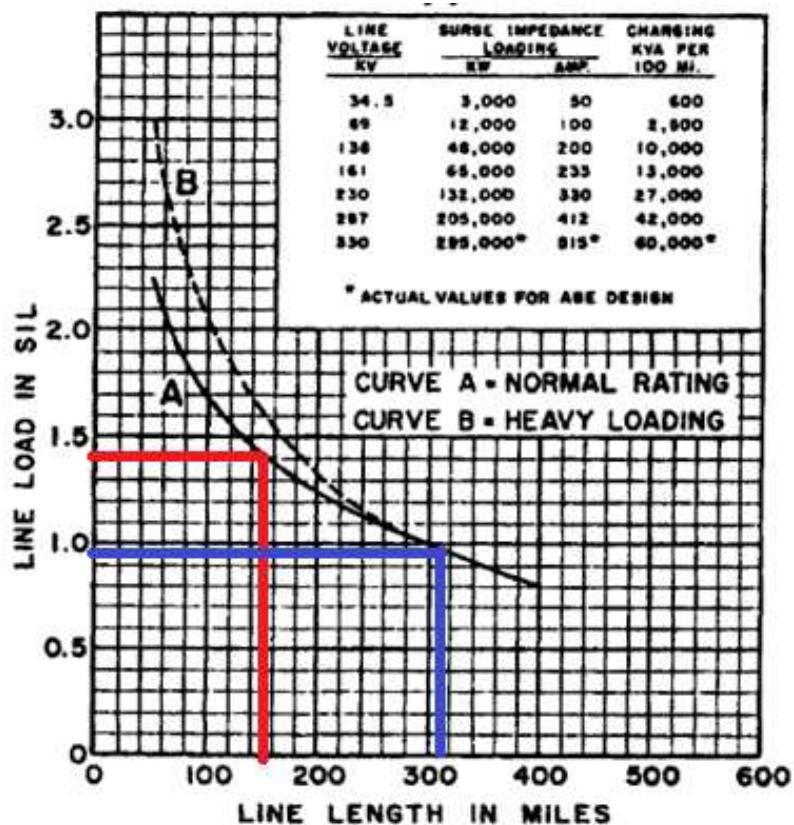


Figura 2- 21. Cargabilidad de las líneas de transmisión en términos de SIL (16)

En la tabla 2-4 se indica el valor de la reactancia de los generadores. Asumiendo el voltaje nominal del generador y con la potencia base obtenida anteriormente se calcula el valor de la reactancia en ohms para cada caso.

Tabla 2- 4. Datos característicos del generador (1)

Voltaje nominal del SEP [kV]	X [pu]	Vg [kV]	Zbase [ohm]	XG [ohm]
230	0,3	13,8	1,015	0,304
500	0,3	13,8	0,236	0,070

En la tabla 2-5 se indica el valor en ohm de la reactancia estándar de transformadores de potencia para los diferentes niveles de voltaje, tomando como potencia base la indicada en la tabla 2-3.

Tabla 2- 5. Datos característicos del transformador (17)

Voltaje nominal del SEP [kV]	X [pu]	Zb [ohm]	XT [ohm]
230	0,10	281,9	28,2
500	0,15	309,6	46,4

El proceso anterior se realiza para obtener valores aproximados de la impedancia que existe entre las dos fuentes de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia de niveles de voltaje de 230 y 500 kV.

En la tabla 2-6 se indica la reactancia total (X_{TOTAL}) que existe entre las dos fuentes, esta es la suma de las reactancias de los generadores 1 y 2, de los transformadores 1 y 2, y de la L/T.

Tabla 2- 6. Reactancia total entre las dos fuentes de voltaje

Voltaje nominal del SEP [kV]	XG1 [ohm]	XT1 [ohm]	XL [ohm]	XT2 [ohm]	XG2 [ohm]	XTOTAL [ohm]
230	0,304	28,2	122	28,2	0,304	179
500	0,070	46,4	165,7	46,4	0,070	259

Durante una oscilación de potencia, la forma de los cambios del ángulo de potencia (δ) y también del valor de $d\delta/dt$, depende en la estabilidad o inestabilidad de la oscilación de potencia. Si la oscilación de potencia es inestable, δ aumentará continuamente, y en esta condición, $d\delta/dt$ puede suponerse constante como se indica en la ecuación 15: (18)

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s \quad \text{Ec. 15}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_p \quad \text{Ec. 16}$$

Donde ω_s es la velocidad angular relativa, ω_s se encuentra en función de la "frecuencia de oscilación" de las dos fuentes sistema equivalente. (18)

Asumiendo que el movimiento de la impedancia durante una oscilación es solo por el eje R (eje de resistencia) del diagrama de impedancia y que las dos fuentes

de voltaje del sistema son iguales, se obtiene la ecuación 17 que es la velocidad con la que cambia la impedancia de oscilación (5).

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\pi}{2} \cdot X \cdot f_p \cdot \tan\left(\frac{\delta}{2}\right) \left[\frac{\Omega}{s}\right] \quad \text{Ec. 17}$$

La ecuación 17 indica la velocidad de la impedancia durante una oscilación de potencia en función de la impedancia que existe entre las dos fuentes de voltaje, la frecuencia de oscilación y el ángulo de potencia.

La velocidad de la impedancia al momento de cruzar zona PPOL debe ser menor a $ZDIF / \left(\frac{1}{4} \text{ ciclo}\right)$ para ser considerada como una oscilación de potencia.

Por ejemplo si $ZDIF = 5 \text{ ohm} - \text{pri}$, la velocidad máxima que una oscilación de potencia debe tener en la zona PPOL es de $1200 \text{ } \Omega\text{-pri/s}$ ($dR/dt = 5/0.004167$), caso contrario si la velocidad de la impedancia es mayor la función de oscilación la considera como una falla.

En el relé SIEMENS 7SA6 el valor de $ZDIF$ es fijo y depende de la corriente nominal, considerando las relaciones de TC y TP para los niveles de voltajes de 230 kV y 500 kV se obtiene la impedancia $ZDIF$ en valores primarios, como se indica en la tabla 2-7.

Como la corriente secundaria del TC es de 5 A, la impedancia de $ZDIF = 1 \text{ } \Omega - \text{secu}$ debe transformarse a $\Omega - \text{primarios}$ según la relación de TC y TP.

Tabla 2- 7. Datos de $ZDIF$ en ohm-primarios

Voltaje nominal del SEP [kV]	R-TC	R-TP	$ZDIF$ [ohm-pri]
230	1200A/5A	$(230\text{kV}/\sqrt{3})/120\text{V}$	4,6
500	2000A/5A	$(500\text{kV}/\sqrt{3})/120\text{V}$	6

Despejando la frecuencia de oscilación (f_p) de la ecuación 17 y considerando un $ZDIF = 5 \text{ ohm} - \text{pri}$, se puede graficar la frecuencia de oscilación en función del ángulo de potencia (δ) para los diferentes valores de impedancia que se citan en la tabla 2-6. Esto se puede observar en la figura 2-22.

El relé de distancia SIEMENS 7SA6 puede detectar frecuencias de oscilación de hasta 7 Hz. (6).

Asumiendo que existen oscilaciones cuando el ángulo de potencia supera los 70° , se justifica el valor umbral igual al de $ZDIF$ ya que en la figura 2-22 se observa que con un $ZDIF = 5 \Omega - pri$ las frecuencias de oscilación que se pueden detectar se encuentran inferior a 7 Hz, que es la frecuencia que puede detectar el relé SIEMENS 7SA6.

Si se aumenta la impedancia $ZDIF$ para la misma impedancia que existe entre las fuentes y el mismo rango de ángulos de potencia, la frecuencia que puede detectar el relé aumenta.

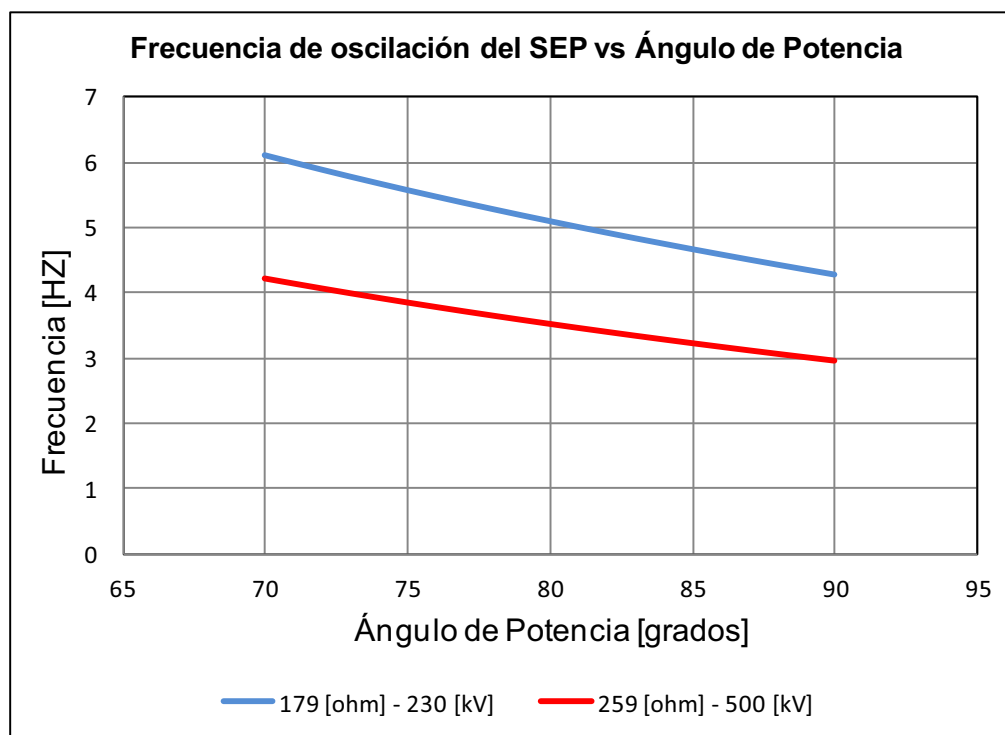


Figura 2- 22. Frecuencia de oscilación VS ángulo de potencia

Considerando el peor escenario con 10 generadores y sus respectivos transformadores en paralelo, se obtiene que la reactancia que existe entre las fuentes de voltaje disminuye. En la tabla 2-8 se indica la reactancia total entre las dos fuentes de voltaje para este escenario.

Tabla 2- 8. Reactancia total entre las dos fuentes de voltaje para el peor escenario

Voltaje nominal del SEP [kV]	X G1 + XT1 [ohm]	XL [ohm]	XG2 + XT2 [ohm]	XTOTAL [ohm]
230	2,85	122	2,85	128
500	4,64	165,7	4,64	175

La graficar de la frecuencia de oscilación en función del ángulo de potencia (δ) se observa en la figura 2-23 para los valores de impedancia que se indican en la tabla 2-8.

En la figura 2-23 se puede observar que si la reactancia que existe entre las dos fuentes de voltaje disminuye, la frecuencia de oscilación de potencia que puede detectar el relé aumenta alrededor de 7 Hz y se aproxima a la frecuencia que detecta el relé SIEMENS 7SA6.

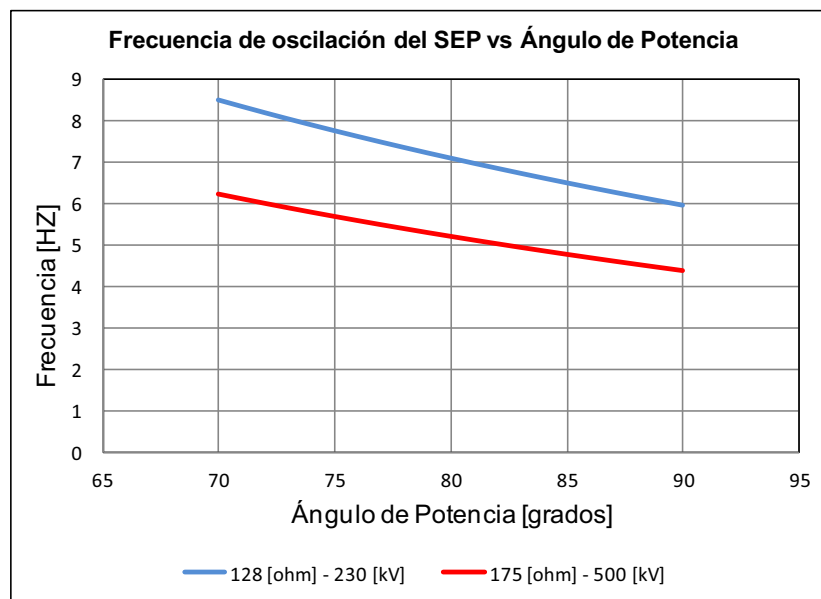


Figura 2- 23. Frecuencia de oscilación VS ángulo de potencia para el peor escenario

2.6.7.- MONOTONIA_DEL_TRAYECTO.m

El archivo MONOTONIA_DEL_TRAYECTO.m determina la variación de la impedancia en la dirección de R del plano complejo R-X.

En la figura 2-24 se muestra el diagrama de flujo del bloque monotonía del trayecto, tiene como datos de entrada el vector de resistencia (R) y reactancia (X) calculada por el relé, la dimensión del vector de resistencia (#datos) y los datos necesarios para formar la característica de operación del relé.

El resultado de la subrutina monotonía del trayecto es un vector llamado MT en el que contiene "1" si existe variación de la impedancia en la dirección de R, caso contrario "0".

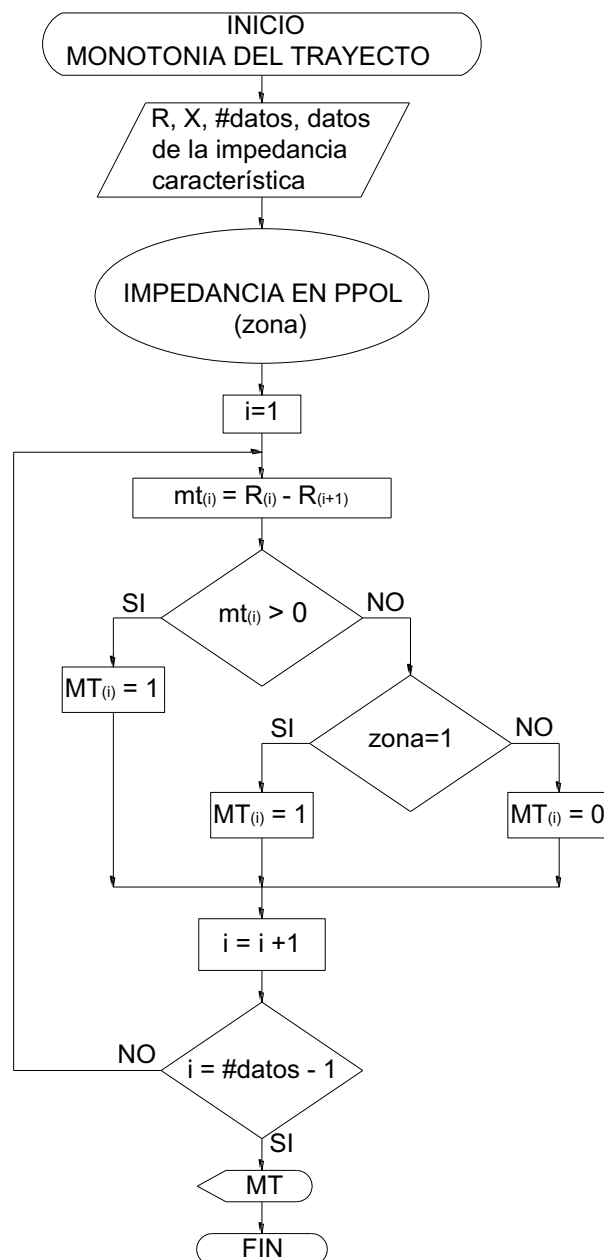


Figura 2- 24. Diagrama de flujo del bloque monotonía del trayecto

2.6.8.- ESTABILIDAD_DEL_TRAYECTO.m

El archivo ESTABILIDAD_DEL_TRAYECTO.m calcula el centro de la curva de inestabilidad estática (ver la figura 2-5) y comprueba si el valor de la reactancia medida por el relé es menor a la reactancia calculada.

El cálculo del centro de la curva de inestabilidad estática no es proporcionado por el fabricante del relé, por esta razón se asume que el bloque de estabilidad de la trayectoria tiene una respuesta positiva siempre y cuando la impedancia medida cumpla con las siguientes condiciones.

- El centro de la curva de inestabilidad estática se encuentra en el 50% de la impedancia de la L/T a proteger.
- El ángulo de la impedancia medida por el relé debe encontrarse 45° y 135° .

Las oscilaciones de potencia generalmente suceden en L/T largas. (8) Por esta razón se desprecia la impedancia que existe a los extremos de la L/T y se asume que la impedancia entre las dos fuentes es la impedancia de la L/T.

Las condiciones anteriores se justifican utilizando el SEP que se indica en la figura 1-1, tomando como referencia E_M y variando el ángulo de potencia de la fuente de voltaje E_G .

La figura 2-25, se obtiene al variar el ángulo de potencia de 0° a 360° en la ecuación 1 y graficar la corriente en un plano complejo, el eje de las abscisas con la parte real de la corriente y el eje de las ordenadas con la parte imaginaria de la corriente.

En esta figura 2-25 la referencia del fasor de corriente es el fasor de voltaje en el punto de medición.

La figura 2-25 se asemeja a la figura presentada por el fabricante (ver la figura 2-5), también se observa que cuando el ángulo de potencia se encuentra en el rango de 90° y -90° la corriente tiene valores altos, obteniendo su máximo valor cuando el ángulo de potencia es igual a 180° .

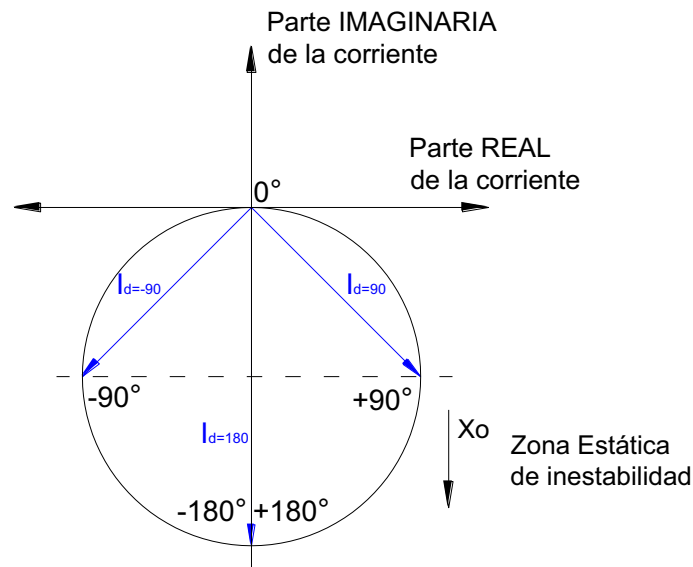


Figura 2- 25. Lugar geométrico del fasor de corriente del sistema de dos máquinas de la figura 1-1, durante una condición de oscilación de potencia (7)

A continuación se analiza la impedancia que mira el relé de distancia para los ángulos de potencia en la que la corriente es alta, asumiendo que los voltajes en los extremos de la L/T son iguales.

- Cuando $\delta = 90^\circ$.

La corriente del SEP de la figura 1-1 se encuentra dada por la relación:

$$I = (V \angle 90^\circ - V) / jX$$

Y la impedancia medida por el relé de distancia es:

$$Z_{R1} = \frac{V \angle 90^\circ}{(V \angle 90^\circ - V) / jX} = \frac{X}{2} + j \frac{X}{2}$$

Donde X es la reactancia de la L/T, ya que se desprecia la parte resistiva y capacitiva de la L/T.

- Cuando $\delta = -90^\circ$.

De igual manera que el caso anterior la corriente se encuentra dada por:

$$I = (V \angle -90^\circ - V) / jX$$

Y la impedancia que mira el relé de distancia es:

$$Z_{R2} = \frac{V \angle -90^\circ}{(V \angle -90^\circ - V)/jX} = -\frac{X}{2} + j\frac{X}{2}$$

La figura 2-26 se muestra el diagrama R-X de las impedancias obtenidas cuando el ángulo de potencia es 90° y -90° , las reactancias en estos puntos son la mitad de la L/T a proteger.

Se puede observar también las impedancias encontradas anteriormente Z_{R1} y Z_{R2} tienen ángulos referidos al eje de las abscisas de 45° y 135° respectivamente, de esta manera se justifica el criterio que se asume en el bloque de estabilidad de la trayectoria.

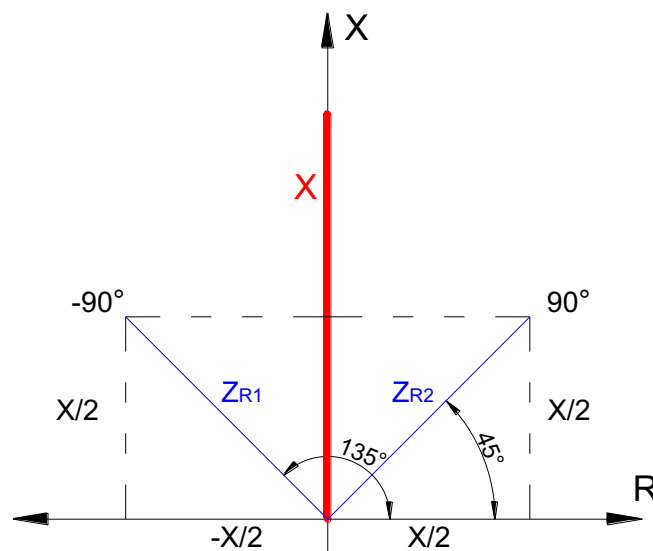


Figura 2- 26. Diagrama R-X - con ángulos de potencia de 90° y -90°

En la figura 2-27 se visualiza el diagrama de flujo del bloque estabilidad del trayecto, tiene como variables de entrada los vectores R, X (resistencia, reactancia), la dimensión del vector R y la parte reactiva de la línea de transmisión (Lx).

El resultado de la subrutina estabilidad del trayecto es un vector denominado ET, que tiene como valor "1" si la impedancia calculada cumple con los criterios del bloque estabilidad del trayecto, caso contrario el resultado es "0".

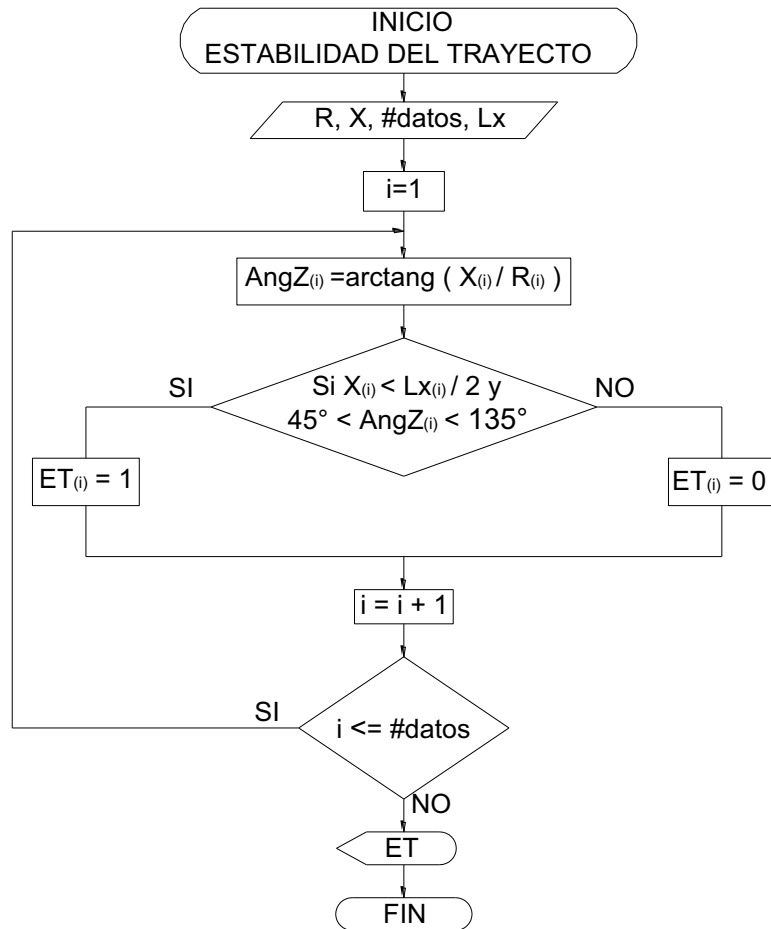


Figura 2- 27. Diagrama de flujo del bloque estabilidad del trayecto

2.6.9.- FUNCIONOST.m

Esta subrutina de programación compara el valor de la resistencia al ingresar y salir de la impedancia PPOL, si el signo de la impedancia con la que ingreso es diferente con el signo que salió se ejecuta el disparo por oscilaciones de potencia inestables.

Para establecer el disparo por OST la impedancia que mide el relé también tiene que ingresar a la impedancia APOL.

El bloque *Simetría del Trayecto* no es simulado en la rutina de programación ya que esta rutina es utilizada para determinar posibles ajustes de la función de oscilación en el relé de distancia.

Además las oscilaciones de potencia se producen en forma simétrica (contienen únicamente componentes de secuencia positiva), en el caso de que exista

asimetría en las impedancias medidas el relé SIEMENS 7SA6 le considera directamente como una falla.

2.7.- METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN CON LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN FORDI 1.0

Para la calibración de la función de oscilación se puede seguir los puntos a continuación citados.

1. Realizar estudios de estabilidad transitoria del SEP para las diferentes condiciones operativas y contingencias, esto se realiza para obtener las partes del sistema que tienen problemas de estabilidad angular y determinar si es necesaria la activación de la función de oscilación.

La simulación de eventos de fallas, desconexiones de carga o generación se puede realizar con el módulo de transitorios electromecánicos de POWER FACTORY – DIgSILENT.

2. Determinar la ubicación del centro de oscilación del SEP para las peores condiciones operativas y contingencias del sistema, el relé necesita ser calibrado si el centro de oscilación se encuentra dentro de las zonas de operación, caso contrario no es necesario la calibración de la función de oscilación.

Una gran ayuda que brinda DIgSILENT es que se puede graficar la impedancia que mira el relé en el plano complejo R-X durante los casos de estudios propuestos, con esto se puede determinar si la impedancia ingresa o no ingresa a las zonas de operación del relé.

3. Obtener los archivos COMTRADE tanto de voltaje como de corriente en el lugar donde se encuentra instalado el relé de distancia.
4. Ingresar los datos necesarios en la rutina de programación FORDI 1.0 para poder determinar las condiciones que permitan mejorar la estabilidad del sistema y la continuidad del servicio eléctrico.

CAPITULO III

APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE OSCILACIONES DE POTENCIA

En este capítulo se describe la forma de obtener archivos COMTRADE de las oscilaciones de potencia a través del software POWER FACTORY de DIgSILENT y señalar los posibles ajustes de la función de oscilación mediante la rutina de programación FORDI 1.0.

3.1.- POWER FACTORY DE DIgSILENT

El software POWER FACTORY de DIgSILENT permite realizar una simulación digital de los sistemas eléctricos de potencia, con el cual se puede realizar cálculos de redes eléctricas a través de modelos matemáticos basados en las normas ANSI¹¹, IEEE y IEC.

El software Power Factory tiene los siguientes módulos que ayudan al estudio de sistemas eléctricos de potencia.

- Estudios de flujos de potencia
- Estudios de cortocircuitos
- Estudios de estabilidad
- Estudios de transitorios electromagnéticos
- Estudios de protecciones
- Estudios de confiabilidad
- Estudios de armónicos
- DPL (DIgSILENT Programming Language)

¹¹ ANSI (American National Standards Institute - Instituto Nacional Americano de Estándares). Organización encargada de estandarizar ciertas tecnologías en EEUU.

3.2.- MÉTODOS DE CÁLCULO DEL MÓDULO DE ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

Con el módulo de transitorios electromagnéticos se puede realizar el estudio del comportamiento dinámico de sistema eléctricos de potencia, para ello se realiza eventos de simulación como por ejemplo cortocircuitos, simulación de arranques de motores, salida o entrada de elementos de la red como entrada de capacitores a la red, desconexión de una línea, etc.

En este módulo se puede observar el comportamiento de las diferentes tipos de variables de la red en función del tiempo o en función de otras variables. Existen muchas variables que se pueden monitorear como por ejemplo:

- Fasor de voltaje y corriente en valores reales y en por unidad
- Ángulos de potencia para motores y generadores
- Potencia mecánica de turbinas
- Voltaje interno, corriente de excitación de las maquinas sincrónicas.

En este módulo se realizan estudios tanto de transitorios electromagnéticos y electromecánicos.

3.2.1.- TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS (EMT)

En el módulo de transitorios electromagnéticos las corrientes y voltajes están representados en sus valores instantáneos, se puede simular eventos simétricos y asimétricos.

3.2.2.- TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS (RMS)

Este módulo resuelve un sistema eléctrico usando ecuaciones fasoriales.

El proceso que se realiza para una simulación de transitorios electromecánicos es el siguiente (19):

1. Cálculo de los valores iniciales, el cual está definido por el flujo de carga del SEP.

Tabla 3- 1. Datos de los generadores del SEP de prueba (17)

Generador	Potencia [<i>MVA</i>]	Voltaje [<i>kV</i>]	X'_d [<i>pu</i>]	H [<i>MJ/MVA</i>]
1	400	20	0,067	11,2
2	250	18	0,10	8,0

Tabla 3- 2. Datos de L/T y transformadores del SEP de prueba (17)

Barra a Barra	Z serie		Y paralelo
	R [<i>pu</i>]	X [<i>pu</i>]	B [<i>pu</i>]
Transformador 1-4	-	0,022	-
Transformador 2-5	-	0,040	-
Línea 3-4	0,007	0,040	0,082
Línea 3-5 (1)	0,008	0,047	0,098
Línea 3-5 (2)	0,008	0,047	0,098
Línea 4-5	0,018	0,110	0,226

En la figura 3-2 se indica la simulación del SEP de prueba en Power Factory – DigSilent y al realizar el flujo de potencia se obtiene los datos que se indican en la tabla 3-3.

Tabla 3- 3. Datos de los valores obtenidos por el flujo de potencia (17)

Barra	Voltaje	Generación		Carga	
		P [<i>pu</i>]	Q [<i>pu</i>]	P [<i>pu</i>]	Q [<i>pu</i>]
1	$1,030\angle 8,88^\circ$	3,500	0,712	-	-
2	$1,020\angle 6,38^\circ$	1,850	0,298	-	-
3	$1,000\angle 0^\circ$	-	-	-	-
4	$1,018\angle 4,68^\circ$	-	-	1,00	0,44
5	$1,011\angle 2,27^\circ$	-	-	0,50	0,16

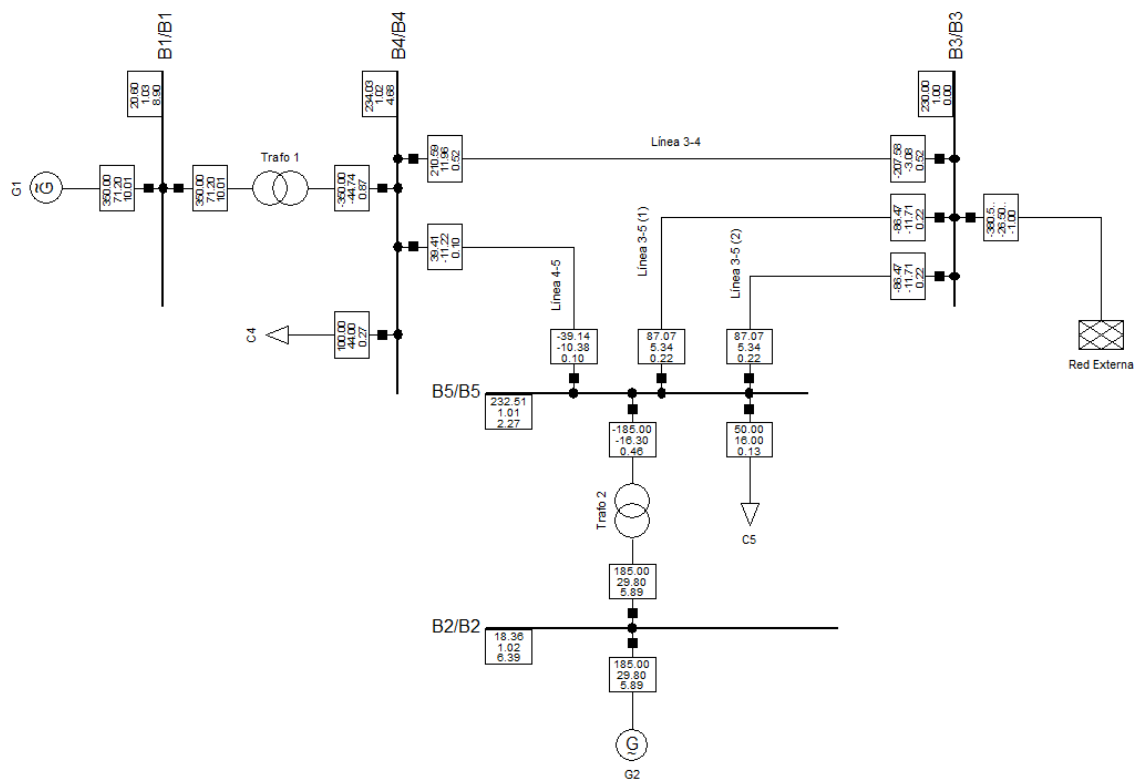


Figura 3- 2. SEP de prueba en Power Factory – DigSilent

Después de obtener el flujo de potencia con lo que se tiene las condiciones iniciales del SEP se realiza la definición de eventos.

Para validar los datos obtenidos por Power Factory, el primer caso de estudio que se simula es el que se indica en la bibliografía del SEP de prueba, asumiendo los siguientes puntos. (17)

- La potencia mecánica de entrada de cada máquina es constante
- El amortiguamiento es despreciable
- El generador está representado por una reactancia transitoria constante en serie con un voltaje interno transitorio constante
- El ángulo mecánico del rotor de cada una de las máquinas coincide con δ , que es el ángulo de potencia.
- Todas las cargas se pueden considerar como impedancias en derivación a tierra con valores que se determinan por las condiciones que prevalecen inmediatamente antes de las condiciones transitorias.

Caso de estudio.- Simulación de una falla trifásica en la línea de transmisión 4-5 cerca de la barra 4, esta es despejada 0,225 s después de ocurrida la falla con la apertura tripolar de los dos disyuntores de la L/T fallada.

Para simular el caso de estudio con el módulo transitorios electromecánicos primero se debe definir los eventos necesarios para simular el caso de estudio.

El caso de estudio planteado tiene 3 eventos los cuales se indican a continuación:

1. Cortocircuito en la L/T 4-5 cerca de la barra 4 a los 0 s.
2. Abrir los disyuntores asociados a la L/T 4-5 después de 0,225 s.
3. Despeje del corto cortocircuito, tiene que ser al mismo tiempo en que se abren los disyuntores asociados a la L/T 4-5.

En el *Anexo A* se detalla los pasos a seguir para la simulación de transitorios electromecánicos en Power Factory - DigSilent.

Después de realizar una adecuada simulación del caso de estudio y como resultado final se obtiene la gráfica que se indica en la figura 3-3.

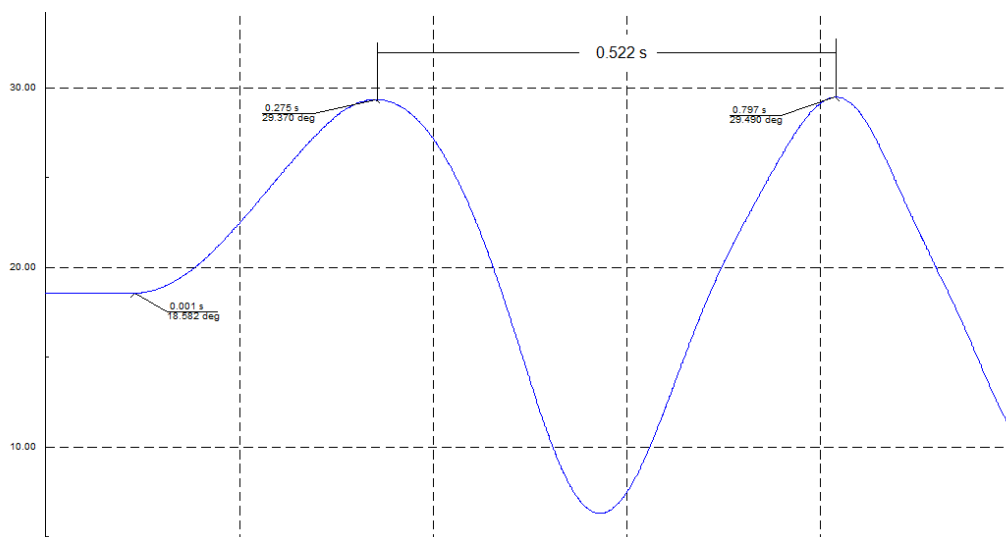


Figura 3- 3. Ángulo del rotor del generador 2 con respecto a ángulo de la máquina de referencia en grados - calculado en Power Factory - DigSilent

La figura 3-4 indica en ángulo del rotor del generador 2 con respecto al de la máquina de referencia que se presenta en la bibliografía (ejemplo 16.9 del libro

“Análisis de Sistemas de Potencia” de J. Grainger y W. Stevenson). Se puede observar también que la frecuencia de oscilación (f_p) igual a 1,9 Hz.

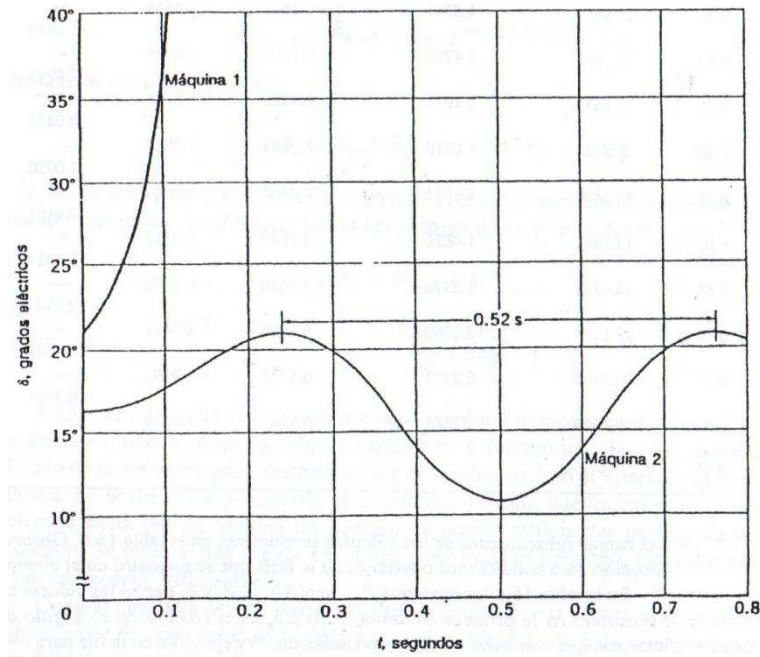


Figura 3- 4. Curva de oscilación para los generadores 1 y 2, para un despeje de falla a 0,225 s (17)

Al comparar las figuras 3-3 y 3-4 se puede observar que existe gran similitud entre los resultados obtenidos por Power Factory – DigSilent y por los autores del libro “Análisis de Sistemas de Potencia” de J. Grainger y W. Stevenson.

De esta manera se valida los resultados obtenidos por Power Factory – DigSilent.

3.4.- OBTENER ARCHIVOS COMTRADE A TRAVÉS DEL SOFTWARE POWER FACTORY – DIGSILENT

La rutina de programación FORDI 1.0 utiliza dos archivos COMTRADE, en el que se tiene los valores de voltaje y corriente en el lugar donde se encuentra instalado el relé de distancia, los datos deben presentarse forma de un fasor (módulo y ángulo).

Como se indica en la figura 3-5 cada archivo COMTRADE .DAT tanto de voltaje como de corriente deben poseer dos señales analógicas, la primera señal indica los módulos de los datos, la segunda señal indica los ángulos de los fasores.

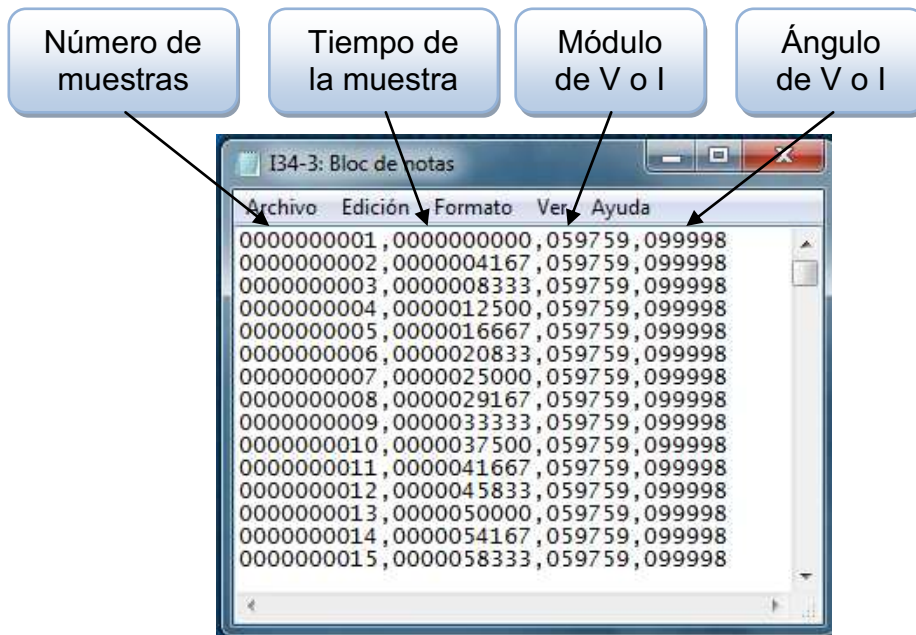


Figura 3- 5. Archivo COMTRADE .DAT

Para obtener los archivos COMTRADE se hace una simulación de transitorios electromecánicos (RMS), se grafica el voltaje y la corriente en el lugar donde se encuentra instalado el relé de distancia.

Para la simulación RMS se sigue los mismos pasos que se describen en el *anexo A* con la diferencia de que en la ventana de la figura A-12 (ver anexo A) se debe escoger *Subplot (2y)(VisPlot2)*, esto se realiza para graficar dos variables en el mismo *Panel de Instrumentos Virtuales (VI)*, esto se indica en la figura 3-6.

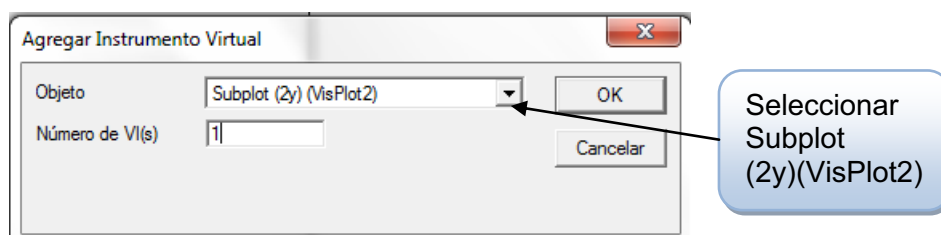


Figura 3- 6. Ventana que se selecciona que tipo de gráfica se va a realizar

Como se muestra en la figura 3- 7 al hacer doble clic en la nueva página creada aparece una ventana llamada *Subgráfica con dos ejes y*, en el *Eje1* se ingresa la variable que identifica al módulo que puede ser del voltaje o de la corriente y en el *Eje2* se ingresa el ángulo de la variable correspondiente al eje1.

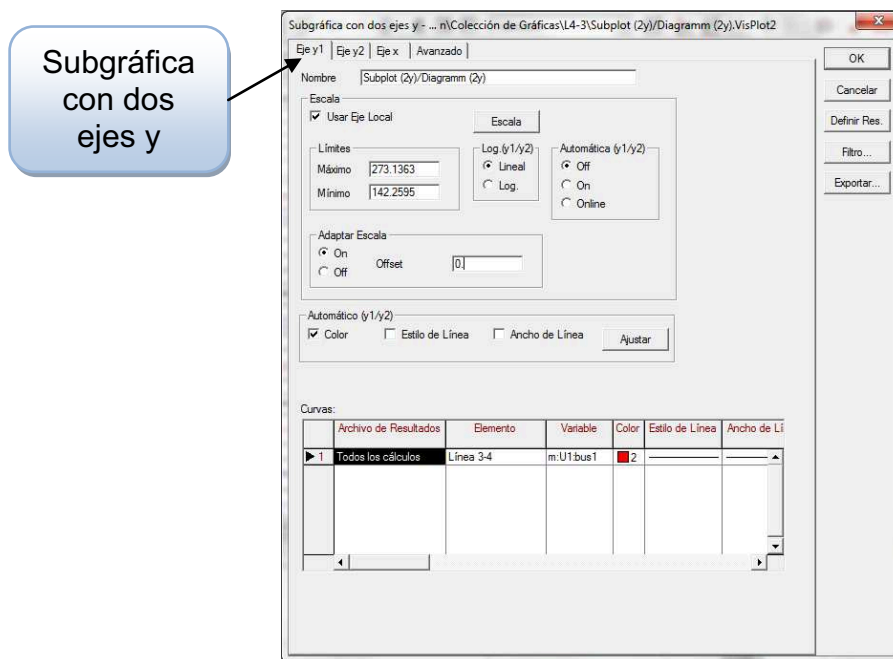


Figura 3- 7. Ventana Subgráfica con dos ejes y

Las variables que se van monitorear durante la simulación se indican en la tabla 3-4. Se debe utilizar dos *Panel de Instrumentos Virtuales (VI)*, uno para las señales de voltaje y otro para las señales de corriente.

Tabla 3- 4. Variables a monitorear en la simulación RMS

TIPO	VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	UNIDADES
VOLTAJE	U1:bus1	Fasor de Tensión Línea – Neutro, Magnitud	[kV]
	phiu1:bus1	Fasor de Tensión, Ángulo	[grados]
CORRIENTE	I1:bus1	Fasor de Corriente, Magnitud	[kA]
	phii1:bus1	Fasor Corriente, Ángulo	[grados]

En las variables que se muestran en la tabla 3-4 la terminación *bus1* indica que los datos obtenidos son del *terminal i* de la línea de transmisión seleccionada, en el caso de que se necesite los valores de la *terminal j* de la L/T se escoge las mismas variables pero con su terminación en *bus2*.

Para obtener el archivo COMTRADE de los datos graficados en cada *Panel de Instrumentos Virtuales (VI)*, se hace clic derecho en la ventana *Panel de Instrumentos Virtuales (VI)* y al seleccionar *Exportar* aparece una nueva ventana que se observa en la figura 3-8.

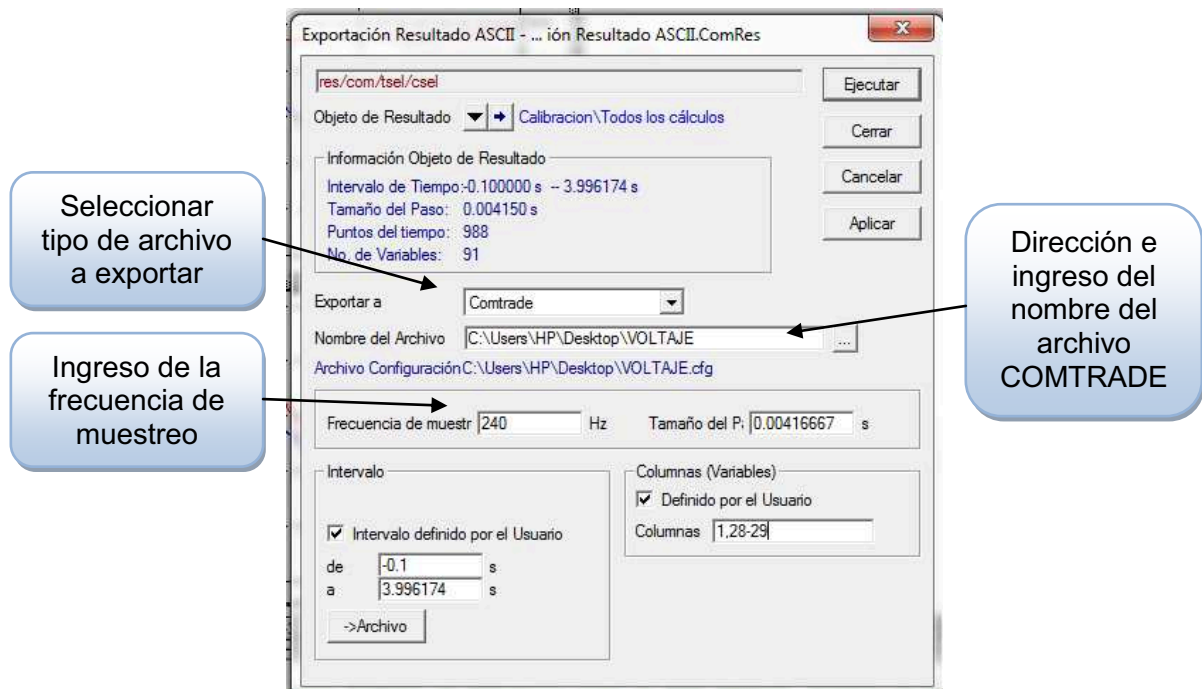


Figura 3- 8. Ventana exportación de resultados

En la ventana que se muestra en la figura 3-8 se debe seleccionar COMTRADE en la parte renombrada como "*Exportar a*", En "*Nombre del Archivo*" se debe direccionar el lugar donde se desea guardar el archivo e ingresar el nombre del archivo COMTRADE, en este caso el nombre es VOLTAJE.

En "*Frecuencia de muestreo*" se ingresa 240 Hz ya que el relé SIEMENS 7SA6 calcula la impedancia en ciclos de $\frac{1}{4}$ del periodo.

Después de presionar *Ejecutar* y al direccionarse a la carpeta donde se guardo el archivo COMTRADE deben existir dos archivos con el mismo nombre pero diferente extensión.

Como se indica en la figura 3-9 el archivo COMTRADE llamado VOLTAJE tiene dos archivos con extensión diferente, uno con extensión .CFG y otro con extensión .DAT.



Figura 3- 9. Carpeta que contiene al archivo COMTRADE

3.5.- SIMULACIÓN DEL RELÉ DE DISTANCIA Y ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS EN POWER FACTORY – DIgSILENT

Una vez simulado el SEP de prueba en DIgSILENT se pueden ingresar diferentes elementos al sistema para que de la simulación se aproxime a la realidad.

En este proyecto se estudia exclusivamente el relé de distancia, en DIgSILENT primero se debe ingresar los transformadores de corriente y los transformadores de potencial para luego ingresar el relé de distancia a utilizar, este proceso se detalla en el anexo B.

En el anexo B también se detalla el proceso a seguir para graficar la impedancia medida por el relé durante estudios de transitorios electromecánicos RMS.

Las relaciones de transformación de los TC y TP se consideran igual a uno, ya que para este estudio no son necesarios los valores de las impedancias secundarias.

En el SEP de prueba se nombra al relé de distancia como R34-4 ya que se encuentra instalado en la barra 4 y protege a la L/T 3-4, así sucesivamente para todos los relés de distancia del SEP.

En el SEP de prueba, la curva de oscilación del generador 1 que se observa en la figura 3-4 es inestable para el despeje de la falla de 0,225 s. Pero esto no ocurre para un despeje de la falla a 0,190 s en el que el sistema permanece estable, los 0,190 s es llamado tiempo crítico.

El *tiempo crítico* es el máximo tiempo que puede permanecer una falla en el sistema sin que los generadores salgan de sincronismo.

En la figura 3-10 se observa la impedancia medida por el relé de distancia (R34-4) para diferentes tiempos de despeje de la falla, la impedancia de color azul indica un tiempo de despeje de la falla de 0,150 s, la impedancia de color rojo es para un tiempo de despeje de 0,180 s y la impedancia de color verde para un tiempo de despeje de 0,230 s.

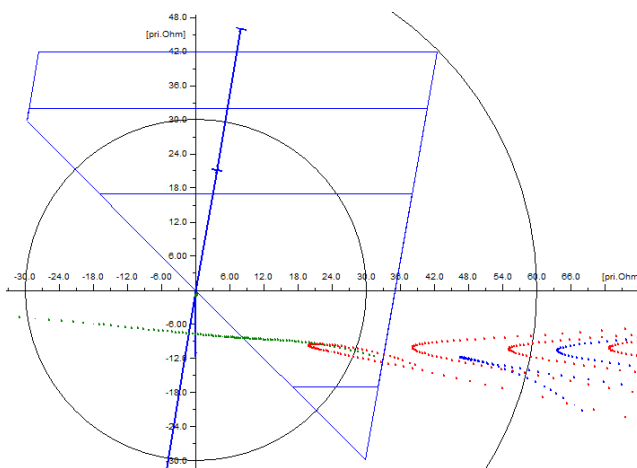


Figura 3- 10. Impedancia medida por el relé de distancia para diferentes tiempos de despeje de la falla – Fuente DigSilent

En la figura 3-10 se observa que, mientras más fuerte es la contingencia, la impedancia medida por el relé se aproxima más a la zona de operación.

3.6.- CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN CON LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN FORDI 1.0

Considerando el SEP de prueba y para el caso de estudio propuesto anteriormente como la peor condición del sistema, se determina que durante oscilaciones de potencia las variaciones de impedancia ingresan a la zona de operación del relé R34-4 (relé que se encuentra en la barra 4 protegiendo la L/T 34).

A continuación se detalla el comportamiento de los relés de distancia instalados a los extremos de la L/T 34.

3.6.1.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA ESTABLE

En el caso de estudio planteado, el sistema permanece estable, si la falla trifásica en la L/T 4-5 cerca de la barra 4 es despejada a 0,180 s después de ocurrida la falla.

Con ayuda de DIgSILENT-Power Factory se logra observar que durante la oscilación estable, la variación de la impedancia solo ingresa a la zona de operación del relé R34-4, por esta razón la función de oscilación del relé R34-4 debe ser activada.

En el *Anexo C* se muestran las variaciones de las impedancias medidas por los relés de distancia instalados en el SEP durante la oscilación de potencia presentada en el caso de estudio, también se indican los ajustes de las zonas de operación de los relés instalados en el SEP.

Una vez identificado el relé de distancia en el que la oscilación de impedancia ingresa a la zona de operación, se procede a obtener los archivos COMTRADE de los datos de voltaje y corriente.

Determinando la relación del TP y TC de $(230kV/\sqrt{3})/120V$ y $1500A/5A$ respectivamente, se encuentra el *ZDIF* en valores primarios, en este caso la corriente nominal del relé es de 5A, y esto determina que $ZDIF = 1\Omega - sec$ para el relé de distancia SIEMENS 7SA6.

$$ZDIF = 1\Omega - sec. \frac{(230kV/\sqrt{3})/120V}{1500A/5A} \cong 4\Omega - prim$$

Ingresando los parámetros de ajuste del relé R34-4, *ZDIF* en Ω -primarios y los archivos COMTRADE a la rutina de programación FORDI 1.0, se obtienen los siguientes resultados:

3.6.1.1.- GRAFICO R-X (RESISTENCIA – REACTANCIA)

En la figura 3-11 se indica la variación de la impedancia durante una simulación RMS, el primer evento que observa el relé es la falla que se localiza atrás de la

posición del relé, después de un tiempo la falla es despejada y la impedancia de oscilación ingresa a la zona 1 de operación del relé.

La figura 3-11(a) se obtiene de la simulación RMS en DlgSILENT-Power Factory y la figura 3-11(b) se obtiene de la rutina de programación FORDI 1.0, de esta manera se comprueba el que los datos ingresados son correctos.

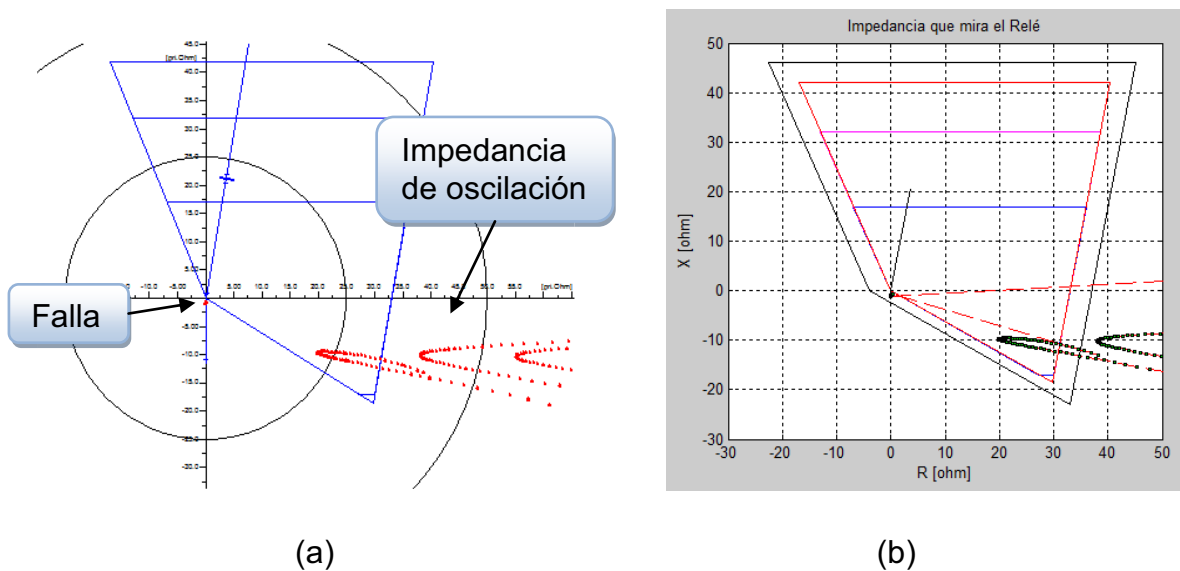


Figura 3- 11. Diagrama R-X con la impedancia calculada por el relé R34-4 durante una oscilación estable

Cada punto que se dibuja en la oscilación de impedancia es un punto de cálculo de la impedancia que realiza el relé.

3.6.1.2.- GRAFICO R-X-T (RESISTENCIA – REACTANCIA-TIEMPO)

En la figura 3-12 se observa de una manera más clara el evento estudiado, al iniciar el evento la impedancia calculada por el relé cambia de la zona de carga al lugar del corto circuito, esto es atrás de la posición del relé.

Después de ser despejada la falla la impedancia empieza a oscilar e ingresa una vez a la zona de operación, la segunda y tercera oscilación de impedancia se atenúa ya que la oscilación que se produjo en el sistema es estable.

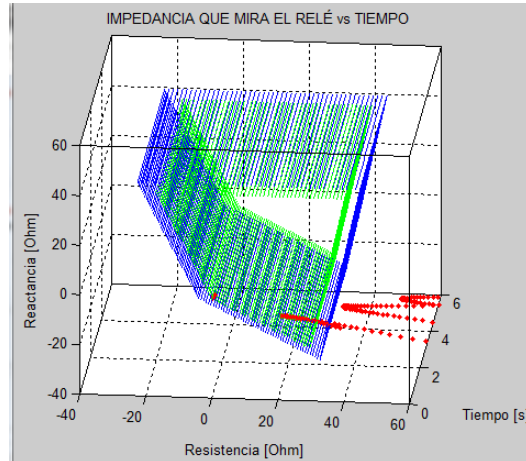


Figura 3- 12. Diagrama R-X-T con la impedancia calculada por el relé R34-4 durante una oscilación estable – Fuente FORDI 1.0

El diagrama R-X-T solo grafica la última zona de operación y la zona de impedancia PPOL.

3.6.1.3.- GRAFICO VELOCIDAD DE LA IMPEDANCIA CON LA QUE CRUZA LA CARACTERÍSTICA PPOL.

La figura 3-13 indica la velocidad de la impedancia con la que cruza la zona PPOL, en esta gráfica muestra el número de veces que la impedancia cruza la zona PPOL.



Figura 3- 13. Velocidad de la impedancia con la que cruza la característica PPOL– Fuente FORDI 1.0

Si el punto graficado que representa a la velocidad se encuentra bajo la recta de color rojo, indica que el relé considera a la impedancia que ingresa a la zona de operación como una oscilación de potencia

Caso contrario si el punto que se grafica se encuentra sobre la recta de color rojo, el relé considera a la impedancia que ingresa a la zona como una falla.

En este caso de estudio, como se indica en la figura 3-11 la impedancia cruza la zona PPOL solo una vez, y tiene una velocidad de 262,5 Ω/s .

Para validar el resultado de la velocidad al ingresar a la zona PPOL se hace una aproximación a la figura 3-11 como se observa en la figura 3-14.

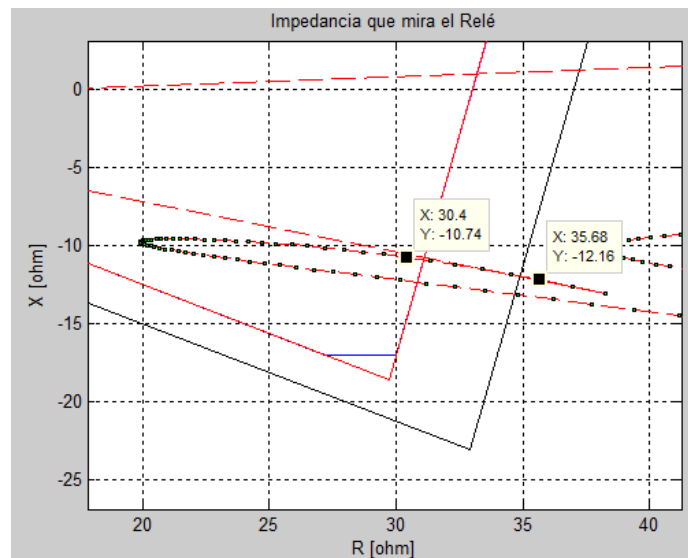


Figura 3- 14. Aproximación de la figura 3-11(b) en la oscilación de impedancia que ingresa a la zona 1– Fuente FORDI 1.0

La velocidad se calcula midiendo la impedancia (Z) que existe entre el punto de medición antes de ingresar a la zona PPOL y el primer punto después de ingresar a la zona APOL, sobre el intervalo de tiempo que transcurre al cruzar la zona PPOL.

El relé realiza un cálculo de la impedancia cada 0,004167 s y en este caso de estudio la impedancia tarda 5 intervalos de tiempo en cruzar la zona PPOL, de esta manera la velocidad de la impedancia al ingresar a la zona PPOL es:

$$v_z = \frac{\sqrt{(35,68 - 30,4)^2 + (-12,16 - 10,74)^2}}{5 * 0,004167} = 262,4 \frac{\Omega}{s}$$

De esta manera se valida el dato obtenido en la figura 3-13 ya que las velocidades son similares.

3.6.1.4.- TABLA DE RESULTADOS

En la figura 3-15, se visualiza la tabla de resultados obtenido de la rutina de programación FORDI 1.0, en la tabla se muestra que la impedancia ingresa durante un intervalo de tiempo de 221 ms a la zona 1.

Variación de Tiempo [ms]	Zona	Operación Func. Osc.	Tiempo Calibración [ms]	Operación del Relé
220.8330	1	1	220.8330	No Trip

Disparo por OST

NO

Figura 3- 15. Tabla de resultados– Fuente FORDI 1.0

En la columna 3 indica que la impedancia que ingresa a la zona 1 es considerada como una oscilación de potencia, y en la columna 4 indica que el tiempo mínimo de bloqueo de la función de oscilación es de 221 ms.

Asumiendo un margen de 20% de seguridad, el tiempo de bloqueo de la zona 1 para que no dispare por una oscilación de potencia estable es de 270 ms.

También se observa a la derecha en la figura 3-15, el recuadro de OST indicando que no existen oscilaciones de potencia inestables.

Por lo tanto los posibles ajustes de la función de oscilación se muestran en la tabla 3-5.

Tabla 3- 5. Posibles ajustes de la función de oscilación del relé de distancia 7SA6

Tiempo de Bloqueo (T DISP Oscilación)	270 ms
Zona de Bloqueo (PROG. Oscilación)	Zona 1

3.6.1.5.- VARIACIÓN DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN

Otra manera para que el relé de distancia no opere en una condición de oscilación de potencia estable es logrando que las oscilaciones de impedancia ingresen a las zonas de operación temporizadas y que el tiempo de temporización de las

zonas de operación sea mayor al tiempo que la impedancia permanece en la zona de operación.

Para el caso anteriormente planteado, en una condición de oscilación de potencia estable se puede variar los alcances resistivos de las zonas, teniendo la precaución de que la oscilación de impedancia no ingrese a la zona 1.

En la figura 3-16(a) se visualiza el diagrama R-X de las zonas de operación del relé R34-4 aumentando el alcance resistivo.

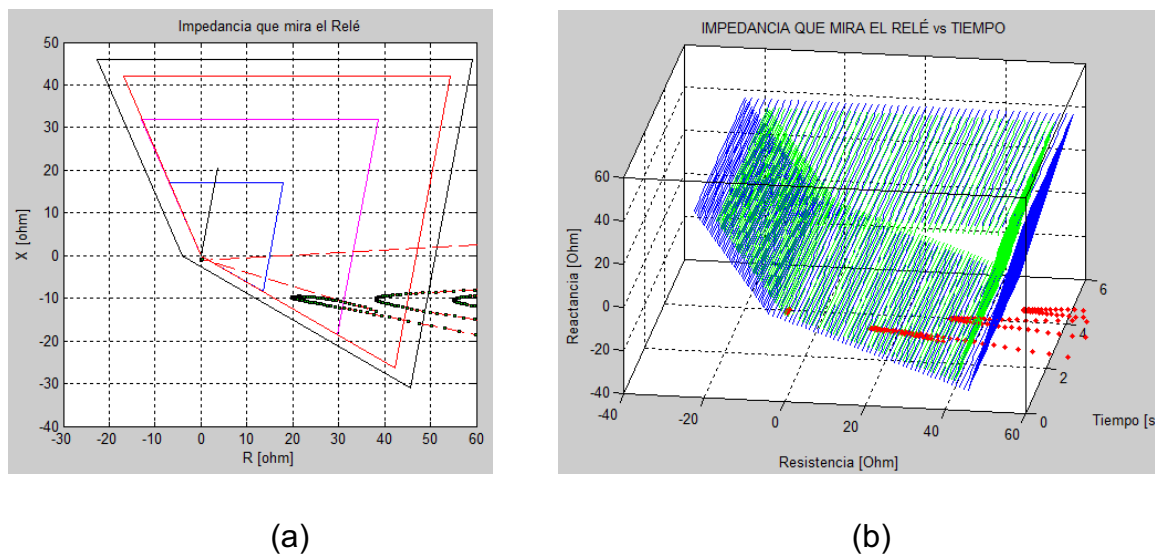


Figura 3- 16. (a) Diagrama R-X del relé R34-4, (b) Diagrama R-X-T del relé R34-4
– Fuente FORDI 1.0

En la figura 3-16(b) se muestra el diagrama R-X-T en el que después de aumentar el alcance resistivo ingresa una segunda oscilación a las zonas de operación.

Para este caso con los tiempos de temporización de 250 ms y 800 ms para las zonas 2 y 3 respectivamente son suficientes para que no se produzca un disparo por una oscilación de potencia estable.

3.6.2.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA INESTABLE

En el caso de estudio planteado, el sistema pierde el sincronismo, si la falla trifásica en la L/T 4-5 cerca de la barra 4 es despejada a 0,230 s después de ocurrida la falla.

En ese caso de oscilación de potencia inestable se analiza los relés de distancia que se encuentran en la L/T 34.

- **Relé de distancia ubicado en la barra 4 que protege a la L/T34 - (R34-4)**

En la figura 3-17 se muestra el diagrama R-X del relé R34-4, el primer evento que observa el relé es la falla trifásica atrás de la ubicación del relé.

El segundo evento que ocurre es una oscilación de potencia inestable después de ser despejada la falla. En este caso por la forma de la zona de operación, el relé no puede detectar la oscilación de potencia inestable, ya que al momento de ingresar y salir de la zona de operación las resistencias tienen el mismo signo positivo.

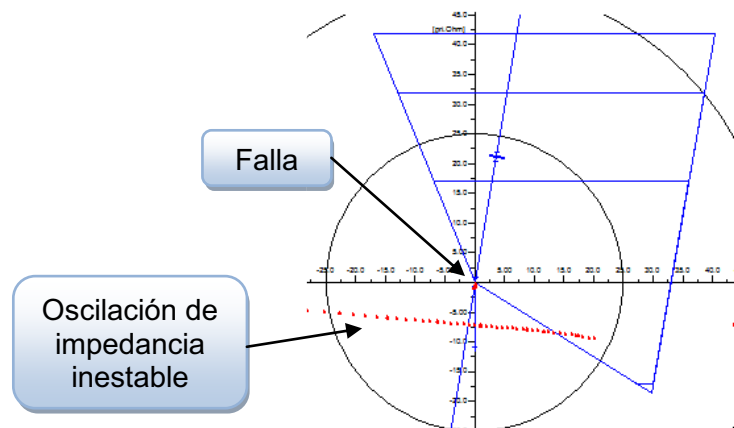


Figura 3- 17. Diagrama R-X con la impedancia calculada por el relé R34-4 durante una oscilación inestable – Fuente DigSilent

De la figura 3-17 también se observar que el centro eléctrico se encuentra atrás de la posición del relé R34-4, es decir el centro eléctrico para este caso de estudio se encuentra en el transformador 1 del SEP de prueba.

- **Relé de distancia ubicado en la barra 3 que protege a la L/T34 –(R34-3)**

En la figura 3-18 se muestra el diagrama R-X del relé R34-3, de igual manera que el relé R34-4, el primer evento que observa los dos relés es la falla trifásica.

Después de despejada la falla el relé R34-3 observa una oscilación de impedancia que ingresa a la zona PPOL con un signo de la resistencia negativo y

sale de la zona PPOL con signo de resistencia positivo. Con esto cumple la condición de disparo por OST.

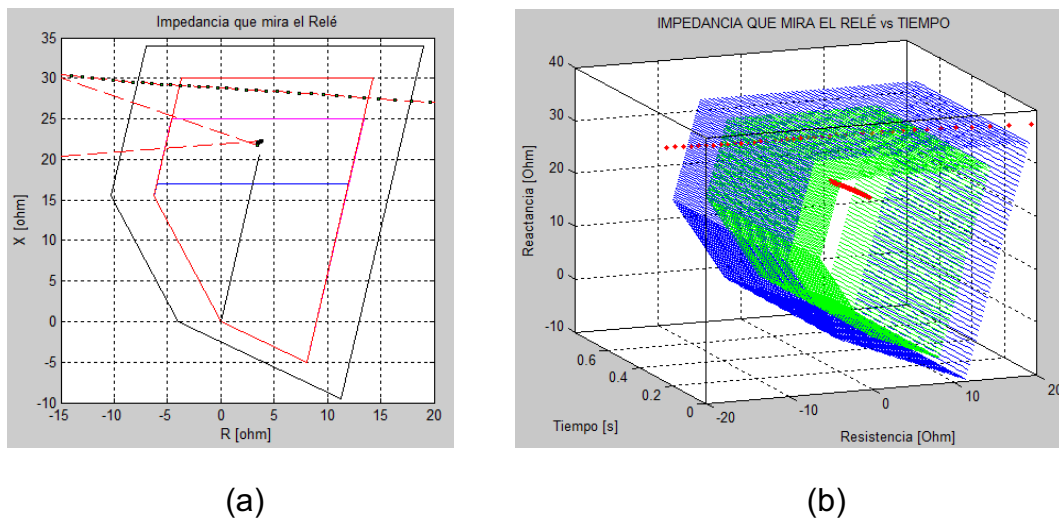


Figura 3- 18. (a) Diagrama R-X del relé R34-3, (b) Diagrama R-X-T del relé R34-3
– Fuente FORDI 1.0

Una vez detectada la oscilación de potencia inestable la parte derecha de la tabla de resultados debe indicar un “SI” en el bloque disparo por OST, esto se puede observar en la figura 3-19.

Variación de Tiempo [ms]	Zona	Operación Func. Osc.	Tiempo Calibración [ms]	Operación del Relé
0	2	0		0 No Trip
212.5000	2	0		0 No Trip
70.8330	3	1	70.8330	No Trip

Disparo por OST: SI

Figura 3- 19. Tabla de resultados para una oscilación de potencia inestable –
Fuente FORDI 1.0

En la tabla de resultados se indica que la primera variación de la impedancia ingresa a la zona 2, esta no es considerada como una oscilación y no dispara el relé ya que el tiempo de temporización es mayor a 212 ms, este tiempo es el que la impedancia se encuentra en la zona 2.

La segunda vez, la impedancia ingresa a la zona 3 de operación durante un tiempo de 71 ms, esta impedancia es considerada como una oscilación de potencia y es bloqueada por un tiempo superior a 71 ms.

Para entender de una manera más clara los dos eventos que se producen en este caso de estudio se observa las velocidades que tiene la impedancia al momento de ingresar a la zona de operación del relé R34-3, esto se muestra en la figura 3-20.

En el caso de estudio, la primera vez que la impedancia ingresa a la zona de operación es producto de la falla trifásica, esto se puede observar en la figura 3-20, ya que la primera velocidad que se grafica se encuentra mucho más arriba que la recta de color rojo, esto indica que el relé considera como una falla a la impedancia que ingresa a la zona de operación.

La segunda vez que la impedancia ingresa a la zona de operación, ingresa con una menor velocidad. Esta impedancia que ingresa a la zona de operación el relé la puede considerar como una oscilación de potencia.

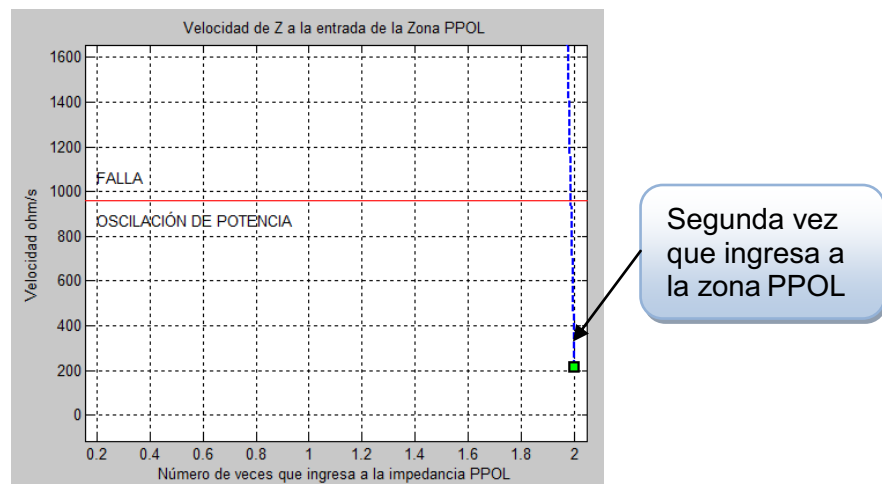


Figura 3- 20. Velocidad de la impedancia con la que cruza la característica PPOL– Fuente FORDI 1.0

3.6.3.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA FALLA SIMÉTRICA

En el SEP de prueba se simula una falla trifásica franca en la L/T34 al 75% de la barra 4 y se obtiene los archivos COMTRADE de voltaje y corriente.

Los archivos COMTRADE son tomados en el lugar donde se encuentra instalado el relé R34-4.

Al ingresar los datos a la rutina de programación FORDI 1.0 se puede observar los resultados que se muestran en la figura 3-21. En este caso de estudio la impedancia se traslada rápidamente de una zona de carga a la zona de operación del relé, esto se observa en la figura 3-21(a).

En la figura 3-21(b) se observa que una vez que la impedancia ingresa a la zona de operación se mantiene durante todo el proceso de simulación, estos resultados son correctos ya que la falla no es despejada en la simulación RMS.

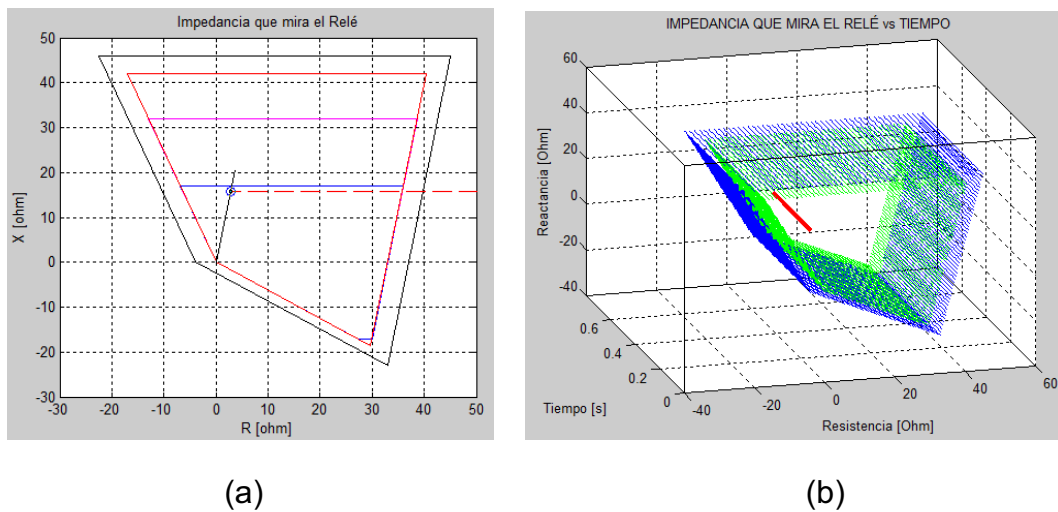


Figura 3- 21. (a) Diagrama R-X del relé R34-4, (b) Diagrama R-X-T del relé R34-4 – Fuente FORDI 1.0

En la figura 3-22 se indica los resultados obtenidos para el caso de estudio de la falla trifásica, el resultado como debe de esperarse es una operación del relé (Trip) ya que como se observa en la figura 3-21(a) la impedancia calculada por el relé al momento de la falla ingresa a la zona 1 que es instantánea.

El tiempo que se indica en la columna 1 de la figura 3-22 es el tiempo que la impedancia se encuentra en la zona 1 durante la simulación.

RESULTADOS				
Variación de Tiempo [ms]	Zona	Operación Func. Osc.	Tiempo Calibración [ms]	Operación del Relé
0	1	0		0 Trip
279.1660	1	0		0 Trip

Disparo por OST
NO

Figura 3- 22. Tabla de resultados para una falla trifásica franca – Fuente FORDI

3.6.4.- COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA FALLA ASIMÉTRICA

En el SEP de prueba se simula una falla monofásica de la fase A en la L/T45 cerca de la barra 4, esta falla es despejada con la apertura de L/T en forma tripolar a 0,180 s después de ocurrida la falla.

En la figura 2-23 se observa el diagrama R-X del relé R34-3, en la que las impedancias oscilan en diferentes lugares geométricos esto es resultado de la falla asimétrica.

En la figura 3-23 indica la impedancia medida por el relé en cada una de las fases, así la oscilación de impedancia de color rojo es la medida en la fase A, la impedancia de color azul y verde son medidas en las fases B y C del relé de distancia.

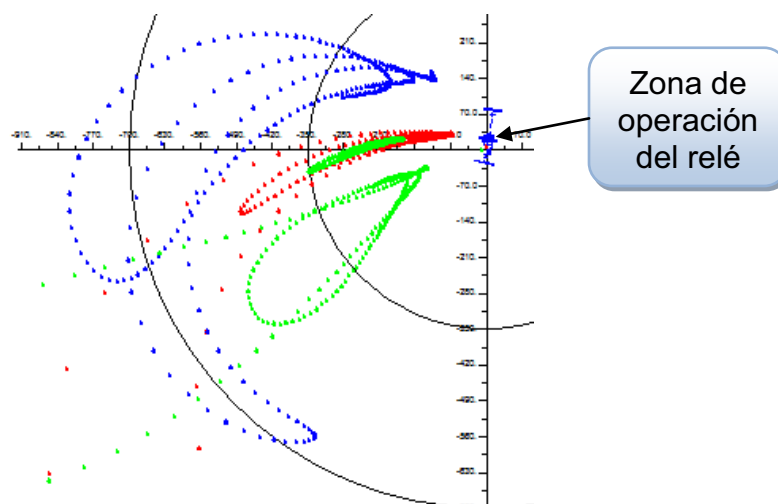


Figura 3- 23. Diagrama R-X del relé R34-3 – Fuente DigSilent

En este caso en que las impedancias medidas por el relé de distancia SIEMENS 7SA6 son asimétricas, la función de oscilación no se activa y el relé directamente considera a la impedancia como una falla.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

- Las oscilaciones de potencia en un SEP son producto de perturbaciones como pueden ser cortocircuitos, salida de servicio de generadores o líneas de transmisión, aplicación o pérdida de grandes cargas.
- Las perturbaciones hacen que exista una variación del ángulo de potencia (δ), dependiendo de la gravedad de la perturbación se pueden producir oscilaciones de potencia estables o inestable.
- Durante una oscilación de potencia estable la impedancia medida por el relé puede ingresar a las zonas de operación y luego de un tiempo la impedancia sale de esta zona, la operación inadecuada del relé de distancia en este proceso puede llevar al sistema a tener mayor inestabilidad. Por este motivo durante una oscilación de potencia estable es necesario bloquear las zonas de operación.
- Durante una oscilación de potencia inestable es conveniente la operación del relé de distancia, ya que el sistema no se encuentra en condiciones operativas.
- Las oscilaciones de la impedancia tienden a pasar por el centro eléctrico del SEP, si el relé de distancia se encuentra ubicado adelante del centro eléctrico no es necesario la activación de la función de oscilación, caso contrario si el relé se encuentra ubicado atrás del centro eléctrico es posible que las oscilaciones de impedancia ingresen a las zonas de operación del relé y sea necesario la activación de la función de oscilación.
- Generalmente para la calibración de la función de oscilación de potencia es necesario ajustar el tiempo de bloqueo de las zonas de operación y la

impedancia ZDIF¹², en el caso del relé de distancia SIEMENS 7SA6 se ajusta el tiempo de bloqueo y las zonas de operación a bloquear, en este relé la impedancia ZDIF es un valor fijo.

- Se puede prevenir un disparo durante una oscilación de potencia estable tratando de que la oscilación de la impedancia ingrese a las zonas temporizadas (zona 2 y zona 3) y que el tiempo en el que la impedancia se encuentra dentro de la zona sea menor al tiempo de temporización de la zona.
- El desarrollo en Matlab del algoritmo utilizado por la función de oscilación de potencia ayuda a estudiar el comportamiento de las oscilaciones de impedancia en el relé de distancia debido a que la función de oscilación no siempre se encuentra modelada en las librerías de Power Factory – DigSilent.
- La rutina de programación FORDI 1.0 ayuda a obtener posibles ajustes de la función de oscilación del relé de distancia 7SA6. Debido a que FORDI 1.0 analiza la velocidad de la impedancia ($\Delta Z/\Delta t$) también sirve para obtener ajustes aceptables en relés digitales que tengan similar principio de detección de oscilaciones de potencia.

4.2.- RECOMENDACIONES

- Para una correcta calibración de un relé de distancia a más de hacer un estudio de máxima potencia de transferencia, se debe hacer estudios de estabilidad transitoria para determinar si las oscilaciones de impedancia ingresan o no a las diferentes zonas de operación del relé.
- Es recomendable ajustar la función de oscilación siempre y cuando la impedancia de oscilación ingresa a las zonas de operación.

¹² Es la impedancia que se debe aumentar a la zona de mayor ajuste para formar la zona de detección de la oscilación.

- Para definir cuál es el relé de distancia apto para proteger a un sistema ante oscilaciones de potencia, se debe tener en cuenta que el rango de la frecuencia de oscilación que detecta el relé se encuentre dentro de la mayor frecuencia de oscilación del SEP.
- Para un adecuado ingreso de datos a la rutina de programación FORDI 1.0 es necesario que cada archivo COMTRADE tenga dos señales analógicas, la primera debe ser el módulo del voltaje o la corriente y la segunda señal debe ser el ángulo respectivo.
- Se recomienda multiplicar a los resultados obtenidos de la rutina de programación FORDI 1.0 por un factor de seguridad de 1.2

BIBLIOGRAFÍA

1. Kundur, Prabha, (2001), "Power System Stability and Control", Palo Alto, California : McGraw-Hill.
2. Kimbark, Edward W., (1948), "Power System Stability", Volumen I, New York.
3. Gonzáles-Longatt, Francisco M, (Febrero 2006), "Estabilidad de Sistemas de Potencia".
4. "Application of Overreaching Distance Relays".

Disponible en:

http://www.pes-psrc.org/Reports/D4_Application_of_Overreaching_Distance%20_Relays.pdf
5. Ziegler Gerhad, (1999), "Numerical Distance Protection: Principles and Applications", Siemens – Erlangen.
6. Manual, SIPROTEC, "Distance Protection 7SA6", SIEMENS.
7. Kimbark, Edward W., (1967), "Power System Stability and Control", Volumen II, Sixth Printing, USA.
8. Ortega, Christian E., "Metodología para el análisis de oscilaciones de potencia (power swing) y fuera de paso (out of step), y calibración de relés de protección (bloqueo y disparo) en líneas de transmisión", Tesis de Grado E.P.N., Quito 2009.
9. Anderson, John B., (1998), "Power System Protection", United States of America : P. M. Anderson.
10. IEEE, Power Engineering Society, (2005), "Power Swing And Out-Of-Step Considerations On Transmission Lines", A report to the Power System Relaying Committee.
11. IEEE, Khoradshadi-Zadeh, H., (2005), "Evaluation and Performance Comparison of Power Swing Detection Algorithms", Power Engineering Society General Meeting.

12. IEEE PES, Apostolov, A. P., (2004), "Superimposed Components Based Sub-cycle Protection of Transmission Lines", Power Systems Conference and Exposition.
13. Society, IEEE Power Engineering. "IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems".
14. Játiva, Jesús y Noboa, Napoleón, (1985), "Estudio de las características de cargabilidad de líneas de transmisión y la influencia del soporte de potencia reactiva", EPN - Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Volumen 6.
15. J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, (2003), "Sistemas de Potencia: Análisis y Diseño", Cengage Learning.
16. IEEE Power & Energy Society, Gutman, Richard, (November 1988), "Application of Line Loadability Concepts to Operating Studies".
17. J. Grainger, W. Stevenson, (1996), "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill. Inc., USA.
18. IEEE Power & Energy Society, (2008), "Fast Detector of Symmetrical Fault during Power Swing", The International Conference on Electrical.
19. DIgSILENT Power Factory "Manual 13.1 GmbH Gomaringen Germany 2006"

ANEXOS

ANEXO A

SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS

Se toma como ejemplo el ejercicio 16.9 del libro “Análisis de Sistemas de Potencia” de J. Grainger y W. Stevenson que se modela en Power Factory y se realiza una serie de casos de estudio.

CASO 1

- Simulación de una falla trifásica en la línea de transmisión 4-5 cerca de la barra 4, con un tiempo de falla de 0,225 s, luego será despejada con la apertura de los disyuntores asociados a la L/T fallada.

A.1.- DEFINICIÓN DE EVENTOS POWER FACTORY

Los posibles eventos que permite simular en Power Factory, por ejemplo, son la conexión o desconexión de disyuntores, generadores, cargas, cortocircuitos, etc.

En el caso 1 de estudio se tiene 3 eventos los cuales se indican a continuación:

1. Cortocircuito en la L/T 4-5 cerca de la barra 4 a los 0 s.
2. Abrir los disyuntores asociados a la L/T 4-5 después de 0,225 s.
3. Despeje del corto cortocircuito, tiene que ser al mismo tiempo en que se abren los disyuntores asociados a la L/T 4-5

Para definir cada uno de los eventos se realiza los siguientes pasos:

- **Evento 1.** Se selecciona el elemento a intervenir en este caso L/T 4-5, haciendo clic derecho y en el submenú *Definir* se hace clic en *Evento de Cortocircuito* como se indica en la figura A-1.

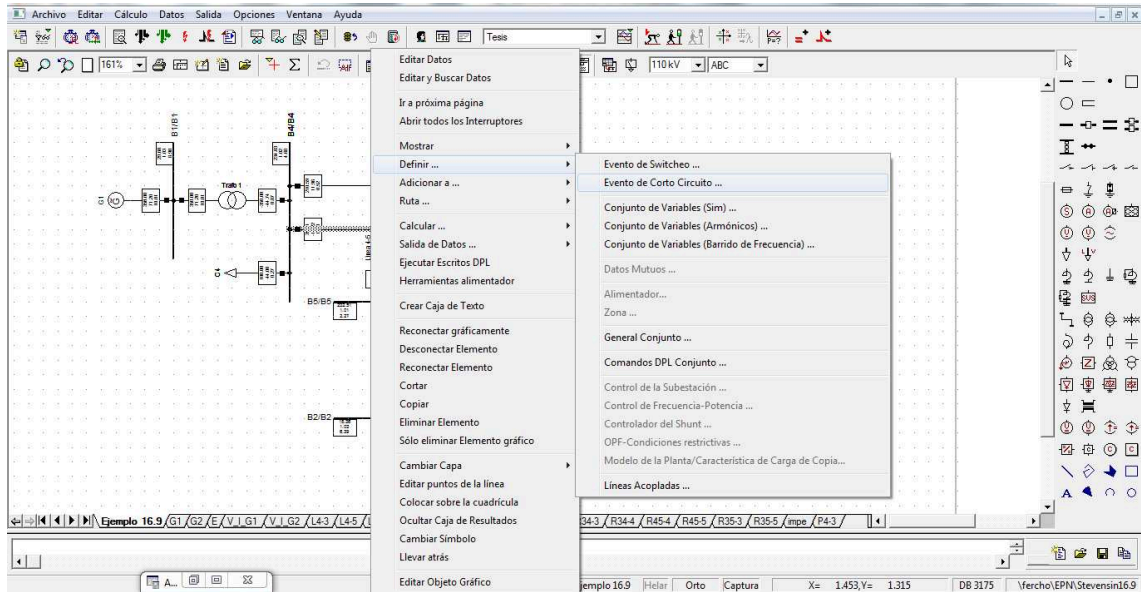


Figura A-1. Definición de eventos

Luego aparece una ventana llamada *Evento de Corto Circuito* que se indica en la figura A-2, ahí se ingresa el tiempo de ejecución del evento en este caso a 0 s y el tipo de falla que es un corto circuito trifásico sin impedancia de falla.

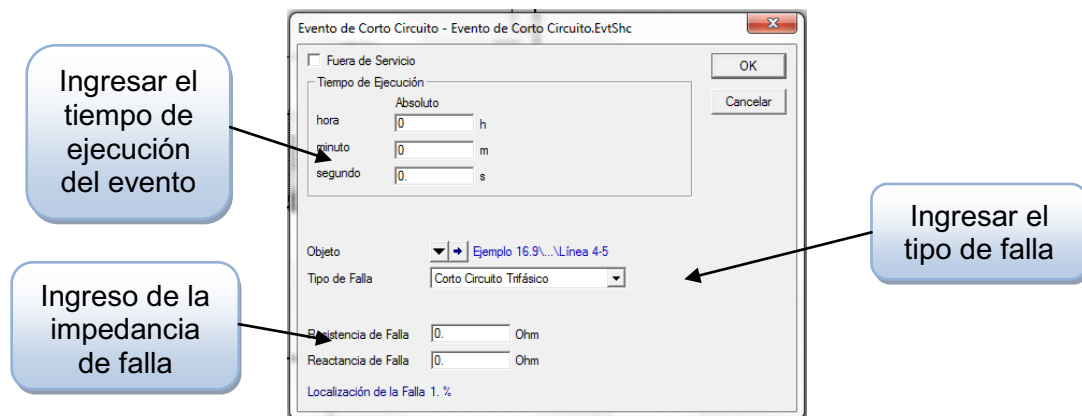


Figura A-2. Edición de eventos

No se debe olvidar la habilitación e indicar la localización del cortocircuito en la L/T (línea de transmisión) para simulaciones EMT y RMS, para esto se hace doble clic en la L/T y hay que ubicarse en submenú *Simulación RMS*, como se indica en la figura A-3.

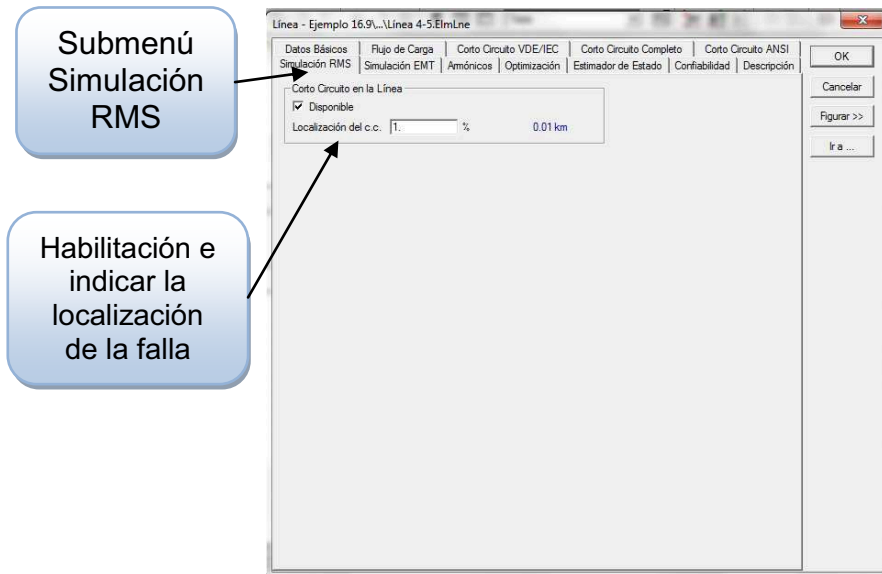


Figura A-3. Habilitación y la localización del cortocircuito en la línea de transmisión

- **Evento 2.** Este evento se lo realiza de forma similar a la del primer evento con la diferencia de que en el submenú *Definir* se elige *Evento de Switcheo* y luego aparece una ventana como se muestra en la figura A-4, ahí se indica el tiempo de ejecución del evento y en este caso es abrir todas las fases a los 0,225 s.

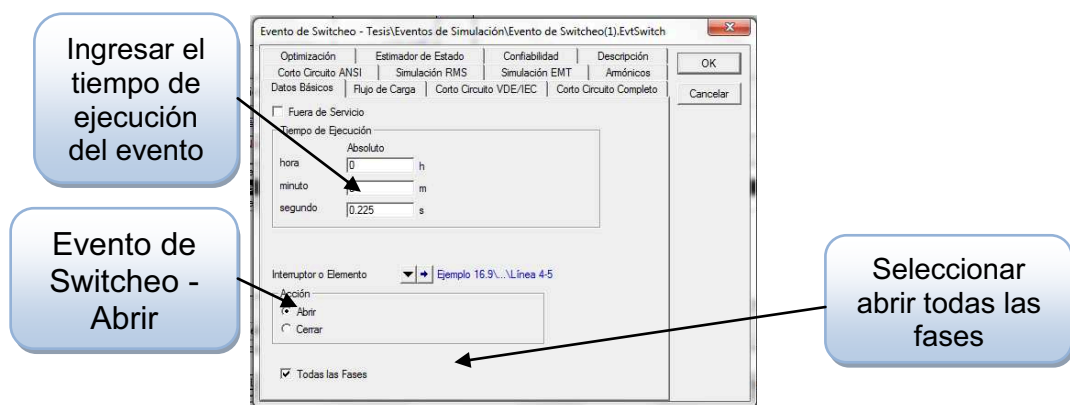


Figura A-4. Definición de Evento de Switcheo

- **Evento 3.** Se realiza en forma similar a la del primer evento, con la diferencia que en la ventana *Evento de Corto Circuito* y en la pestaña *Tipo de Falla* se selecciona *Despeje Corto Circuito*, como se indica en la figura A-5, no se debe olvidar que el despeje del corto circuito es producido por la

apertura da la L/T y por esta razón tiene que tener el mismo tiempo ejecución del evento 2.

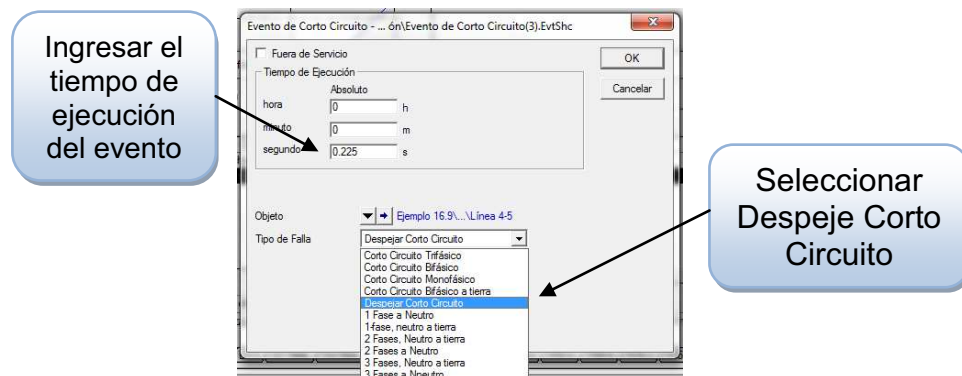


Figura A-5. Evento despeje corto circuito

A.2.- DEFINICIÓN DE VARIABLES A SER MONITOREADAS

Existen un sin número de variables que pueden ser monitoreadas, para definir las variables a monitorear se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se hace clic derecho sobre el elemento del sistema al cual se van a monitorear las variables, luego en el submenú *Definir* se da clic en *Conjunto de Variables (Sim)* como se indica en la figura A-6. En este caso el elemento a monitorear es el generador 1 (G1).

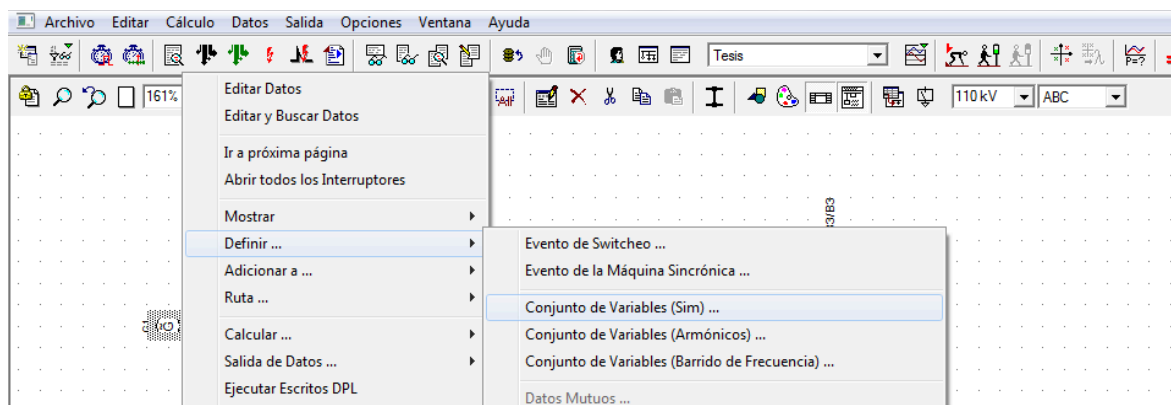


Figura A-6. Definición de los elementos para determinar las variables a monitorear

2. Luego aparece una ventana llamada *Todos los cálculos* en la que se encuentran todos los elementos ingresados como Conjunto de Variables (Sim), como se indica en la figura A-7.

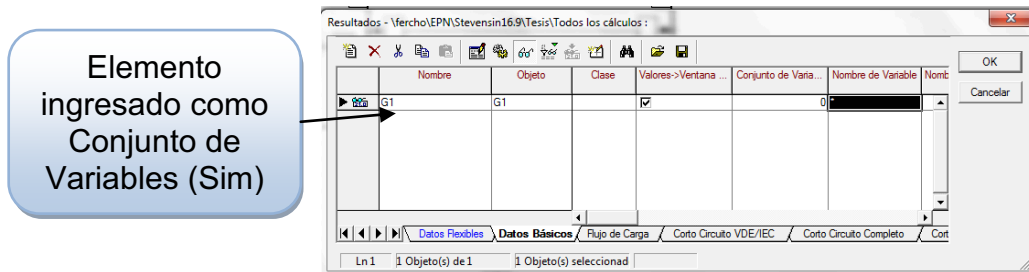


Figura A-7. Carpeta en la que se encuentran todas las variables (Sim)

3. En la ventana *Todos los cálculos* se hace doble clic en el elemento en el cual se van a monitorear las variables, en este caso en el generador 1 se va a monitorear al ángulo del rotor con respecto a la máquina de referencia.

Luego aparece una nueva ventana, en la cual se selecciona el tipo de simulación que se va a realizar, en este caso va a ser *Simulación RMS* y ahí se elige la variable a monitorear. Como se indica en la figura A-8, la variable para monitorear es la *firel* que representa el Angulo del Rotor con respecto al Angulo de la Máquina de referencia en grados.

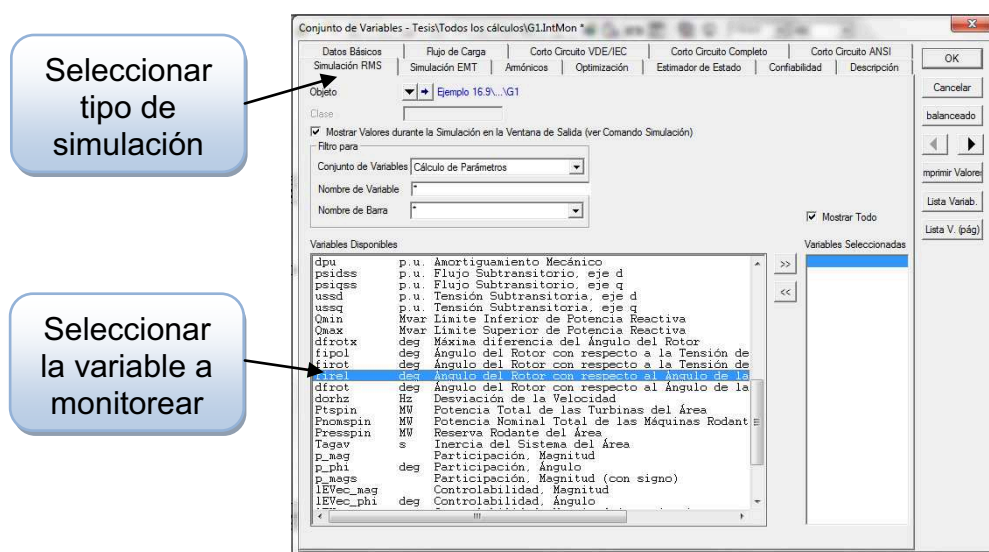


Figura A-8. Selección de variables a monitorear

4. Por último paso se confirma la selección de las variables a monitorear haciendo clic en OK, para monitorear variables de otros elementos del sistema se repiten los pasos anteriores.

A.3.- DEFINICIÓN DE LOS GRÁFICOS PARA OBSERVAR LAS VARIABLES QUE SON MONITOREADAS

Para observar el comportamiento de las variables en función del tiempo es necesario realizar los siguientes pasos:

1. Se hace clic derecho en la hoja de trabajo, a continuación en el submenú *Insertar Página* y se hace clic en *Crear Nueva Página* como se indica en la figura A-9.

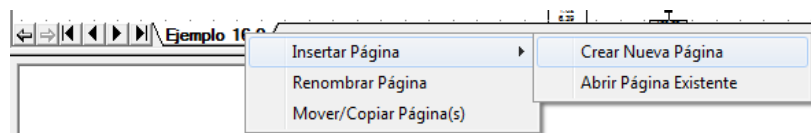


Figura A-9. Creación de una Nueva Página

A continuación aparece una nueva ventana, en la cual se ingresa el *Nombre* de la nueva página, en este caso se le nombra *G1* y se elige *Panel de Instrumentos Virtuales (VI)* como se indica en la figura A-10.

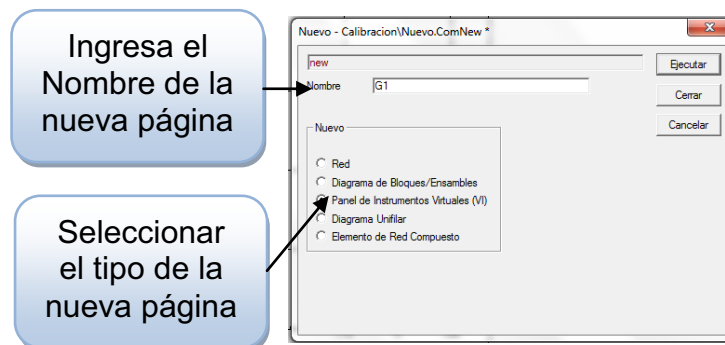


Figura A-10. Nombre y tipo de la Nueva Página

En la barra de herramientas de la nueva página se encuentra el icono *Agregar nuevo VI(s)* como se indica en la figura A-11.

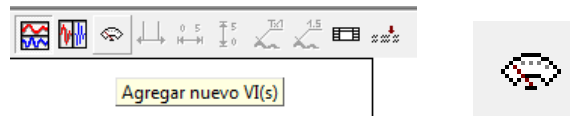


Figura A-11. Ventana Agregar Nuevo VI(s)

Después de hacer clic en el icono *Agregar nuevo VI(s)* aparece una nueva ventana como se indica en la figura A-12, en donde se puede seleccionar distintos tipos de gráficos, para el caso en que se necesita observar la variable monitoreada en función del tiempo se escoge *Subplot (VisPlot)* y también en *Número de VI(s)* indica el número de graficas que se desea en la pagina actual. Al final se presiona OK.

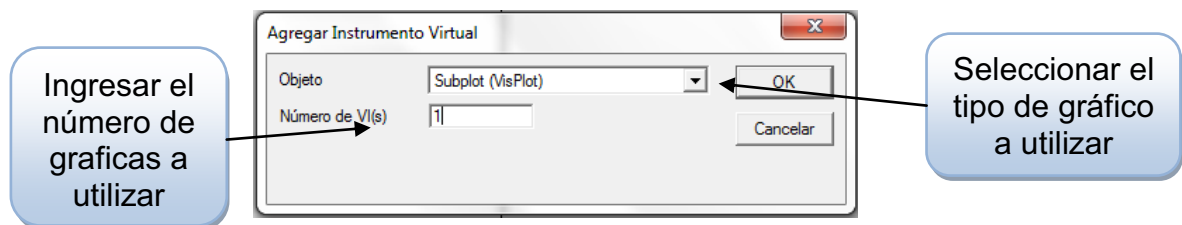


Figura A-12. Ventana que se selecciona que tipo de gráfica se va a realizar

En la nueva página que en este caso es llamada G1 se hace doble clic en la superficie de trabajo con esto aparece una nueva ventana llamada *Subgráfica* como se indica en la figura A-13.

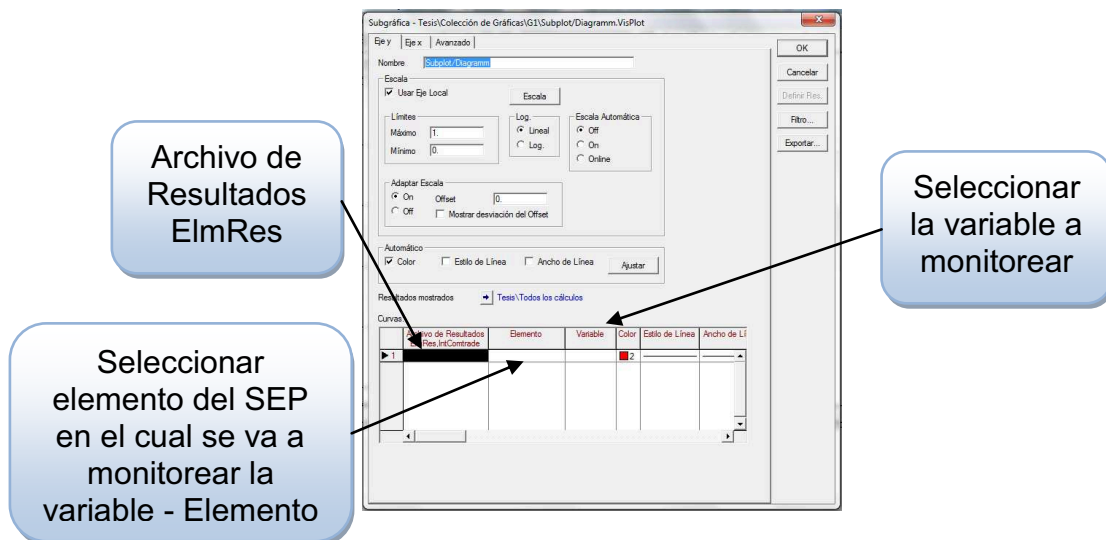


Figura A-13. Ventana Subgráfica

Como la variable a monitorear es en función del tiempo, solo hay que definir la variable en el eje Y, primero hay que direccionar la carpeta donde se encuentran los cálculos, para esto se hace doble clic en *Archivo de Resultados ElmRes*, que se encuentra en ventana *Subgráfica*, se elige la carpeta *Todos los cálculos* como se indica en la figura A-14, luego de esto se presiona OK.

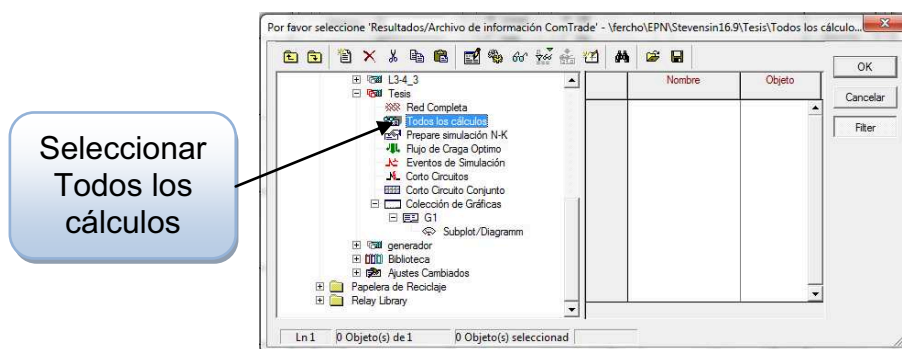


Figura A-14. Direccionar la carpeta Todos los cálculos

También en la ventana *Subgráfica* hay que definir el elemento del SEP en el cual se va a monitorear la variable, se hace doble clic en *Elemento* y aparece una nueva ventana como se indica en la figura A-15, en este caso el elemento que se va a monitorear es G1.

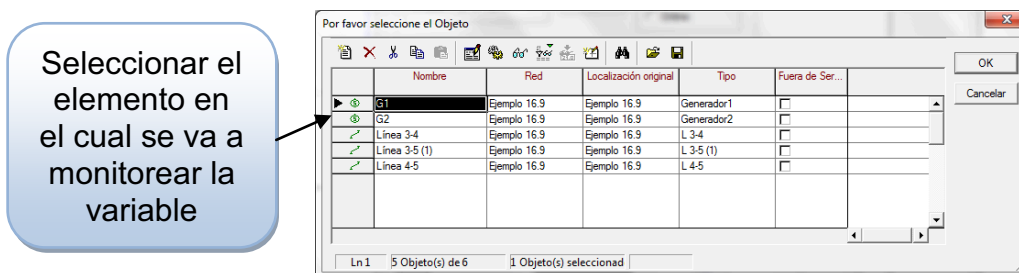


Figura A-15. Definición del elemento en el cual se van a monitorear las variables

Por último se hace doble clic en *Variable* y con esto se define la variable a monitorear, en la ventana aparecerán todas las variables anteriormente definidas en el elemento seleccionado como se indica en la figura A-16.

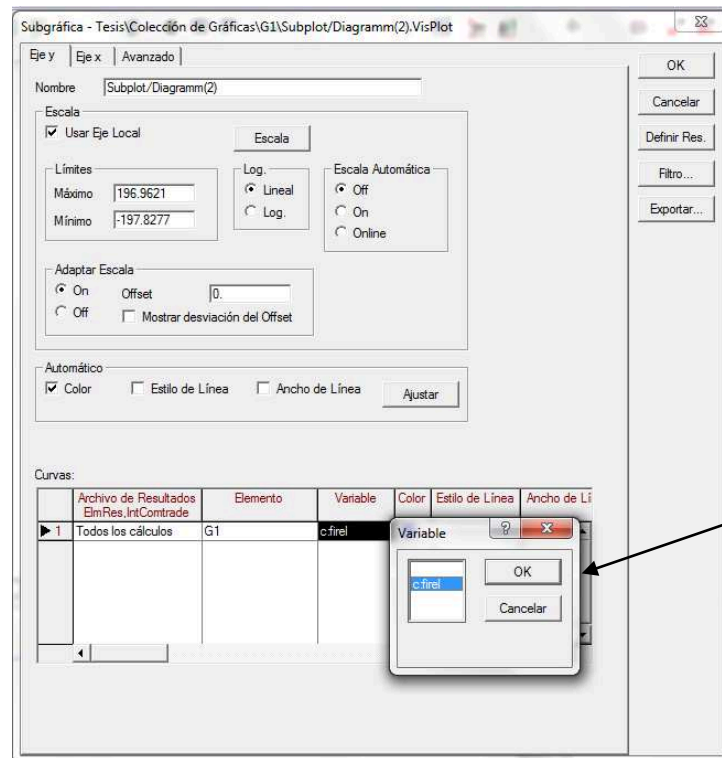


Figura A-16. Definición de la variable a monitorear

También se puede cambiar de color de la gráfica al color deseado, y para finalizar se hace clic en OK.

A.4.- SIMULACIÓN DE EVENTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Para iniciar la simulación en la barra de herramientas se hace clic el botón *Calcular Condiciones Iniciales*, como se señala en la figura A-17.

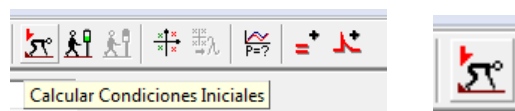


Figura A-17. Botón Calcular Condiciones Iniciales

Después de presionar el botón *Calcular Condiciones Iniciales*, aparece una nueva ventana llamada *Cálculo de las Condiciones Iniciales* que se indica en la figura A-18, en esta nueva ventana se elige el método de simulación si es EMT o RMS, para este caso se realiza una simulación RMS.

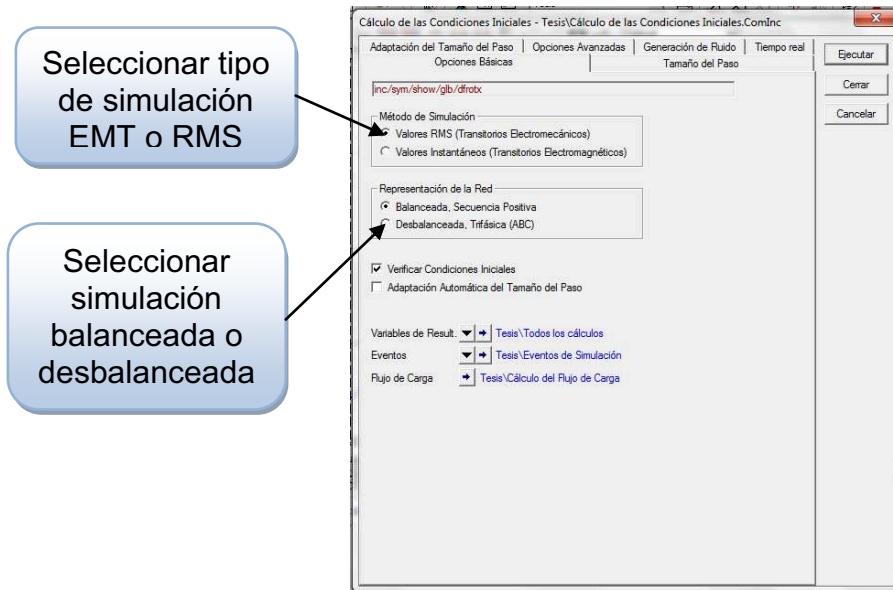


Figura A-18. Ventana llamada Cálculo de las Condiciones Iniciales

A continuación se hace clic en el botón *Iniciar Simulación* como se indica en la figura A-19

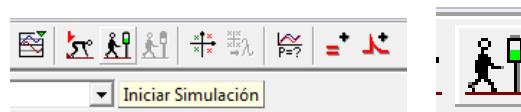


Figura A-19. Botón Iniciar Simulación

Luego aparece una nueva ventana que se indica en la figura A-20, en esta ventana se debe indicar el tiempo de total de simulación, en este caso 0.3 s

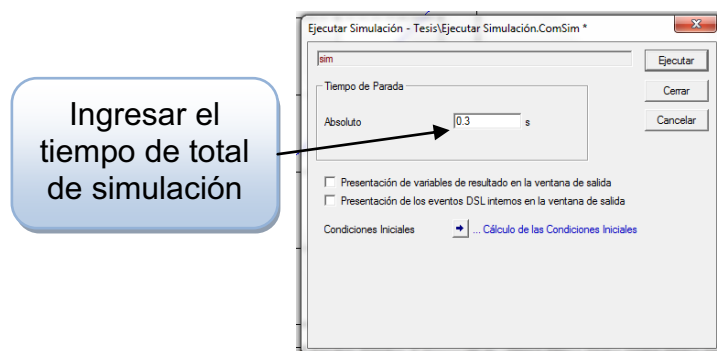


Figura A-20. Ventana en la que se indica el tiempo total de simulación

Como se indica en la figura A-21, el resultado final se observa en la página anteriormente creada que fue llamada G1.

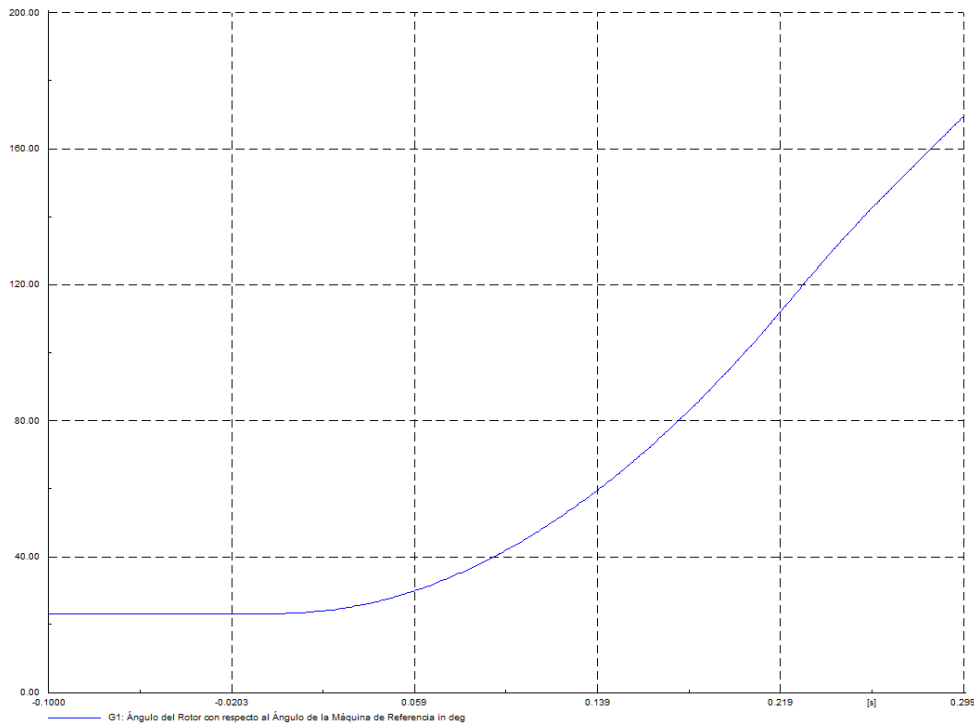


Figura A-21. Página nueva llamada G1 (Ángulo del rotor con respecto a ángulo de la máquina de referencia en grados)

Antes de realizar cambios en los eventos o ingresar nuevas variables a muestrear se debe restablecer los cálculos para esto se hace clic en el botón

Si se hace clic en el botón aparece la ventana llamada *Todos los cálculos* en la que se puede editar o ingresar nuevas variables a ser monitoreadas de los elementos del SEP ingresados.

Si se hace clic en el botón que se encuentra en la barra de herramientas aparece una ventana que se indica en la figura A-22 en la que se puede editar los eventos creados anteriormente.

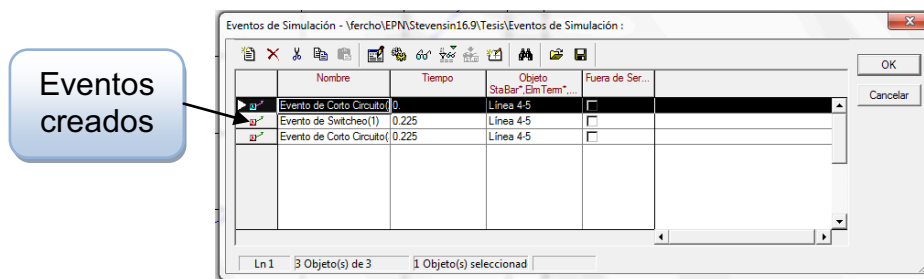


Figura A-22. Ventana de todos los eventos del caso de estudio

ANEXO B

SIMULACIÓN DEL RELÉ DE DISTANCIA EN POWER FACTORY

El relé de distancia mide la relación de entre voltaje y corriente a través de transformadores de potencial y de corriente respectivamente. Por lo tanto para simular el relé de distancia en un SEP es necesario ingresar primero los transformadores de corriente y de potencial, después el relé de distancia.

B.1.- INGRESAR TRANSFORMADOR DE CORRIENTE EN POWER FACTORY

Para ingresar un transformador de corriente se realizan los siguientes pasos:

1.- Se hace clic derecho en el extremo de la L/T en la que se va instalar el transformador de corriente, en el SEP de prueba se instala en la línea 3-4 en el extremo de la barra 4, se da clic derecho, luego en el submenú *Nuevos Dispositivos* se elige *Transformador de Corriente*, como se indica en la figura B-1.

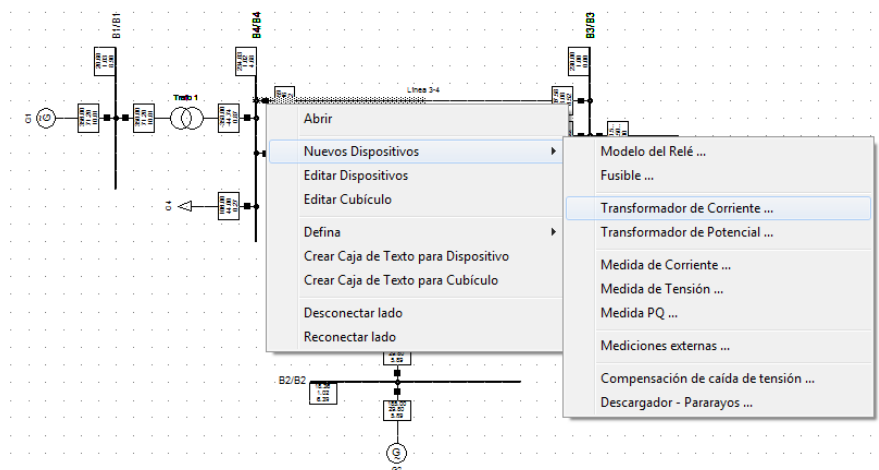


Figura B- 1. Procedimiento para elegir el transformador de corriente

2.- Luego aparece una nueva ventana llamada *Transformador de Corriente* como se indica en la figura B-2, en la que se debe ingresar el tipo de transformador de

corriente, para ello se hace clic en *Tipo* y luego en el submenú *Seleccionar Tipo del Proyecto*.

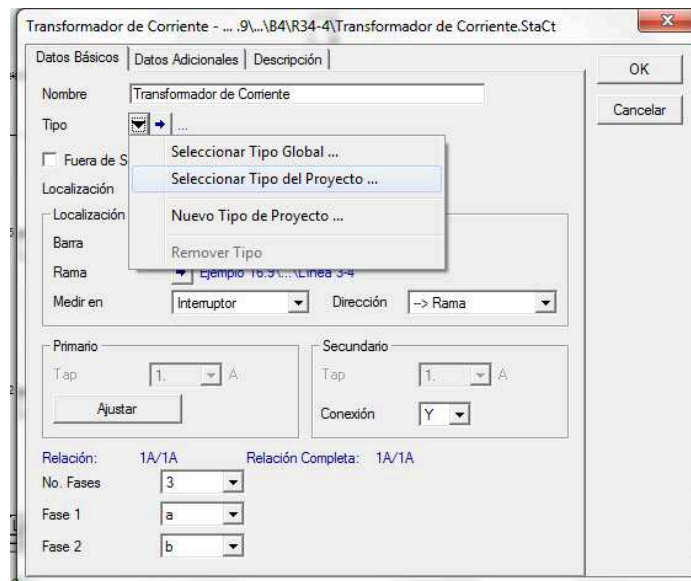



Figura B- 2. Ventana Transformador de Corriente

3.- A continuación se muestra una ventana en la cual se debe seleccionar el tipo de TC que se va a utilizar, si no se dispone de tipos de TCs, se debe crear uno, para este caso se da clic en el botón *Nuevo Objeto*  como se indica en la figura B-3.

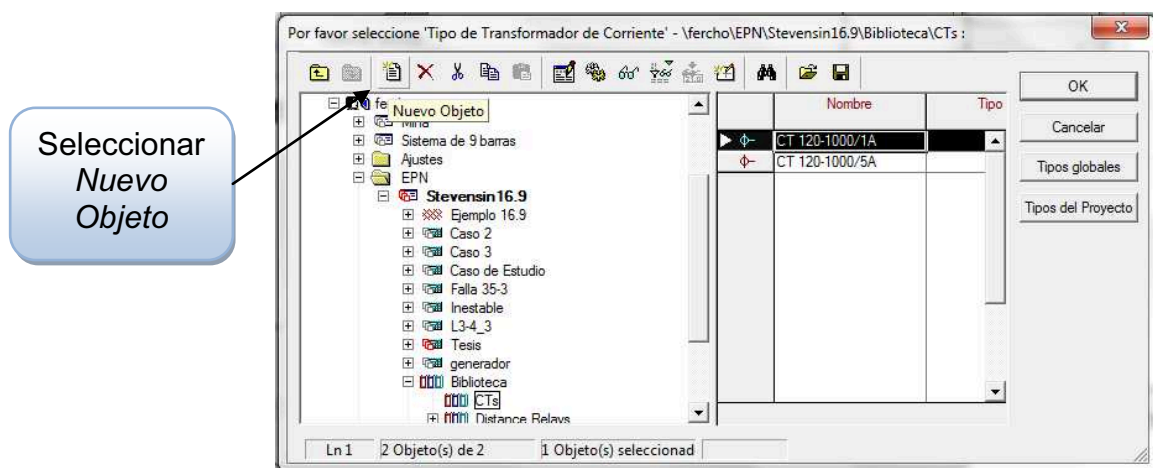


Figura B- 3. Ventana para seleccionar o crear el tipo de TC que se va a utilizar

4.- Después de presionar *Nuevo Objeto* aparece una nueva ventana que se indica en la figura B-4, en la opción *Tap primario* se ingresa el valor de la corriente del

primaria del TC y en la opción *Tap secundario* se ingresa el valor de la corriente secundaria del TC.

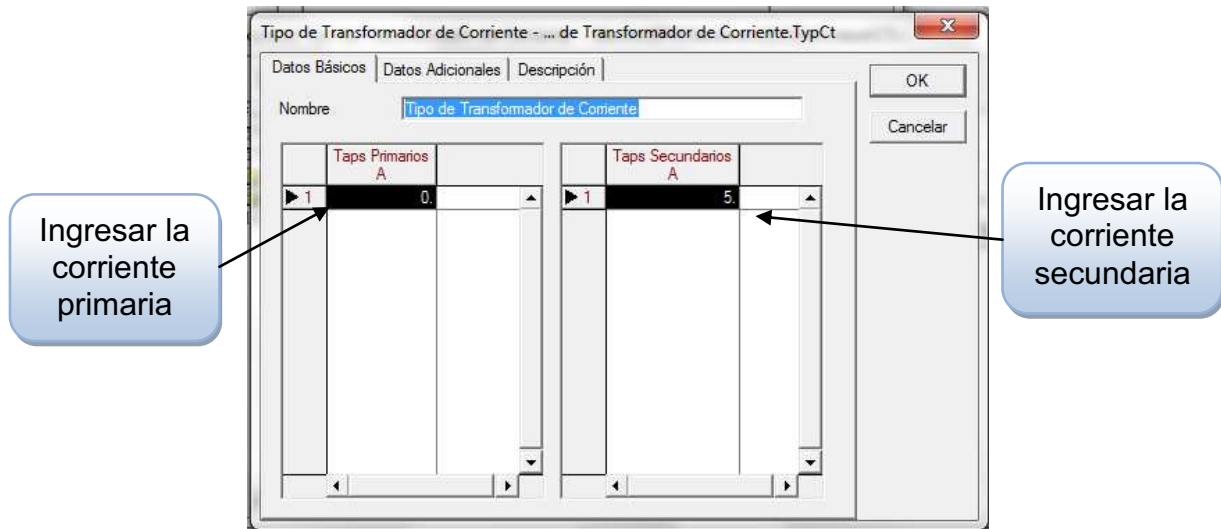


Figura B- 4. Ventana en la cual se crea el transformador de corriente

En este caso se utiliza la relación 5 A a 5 A, con esto se tiene que la impedancia primaria es igual a la impedancia secundaria, esto es solo propósito de análisis.

B.2.- INGRESAR TRANSFORMADOR DE POTENCIAL EN POWER FACTORY

Se realiza en forma similar a la de un transformador de corriente y de igual manera se elige una relación igual a uno, esto se realiza para propósitos de análisis ya que no es necesario tener los valores de impedancia secundaria.

B.3.- INGRESAR RELÉ DE DISTANCIA EN POWER FACTORY

Para ingresar el relé de distancia en la L/T se realiza en forma similar a la del transformador de corriente, a continuación se indican los pasos a seguir:

1.- Clic derecho en la L/T en la cual va a ser ingresado el relé, se escoge *Nuevo Dispositivos* y luego *Modelo del Relé*, como se indica en la figura B-5.

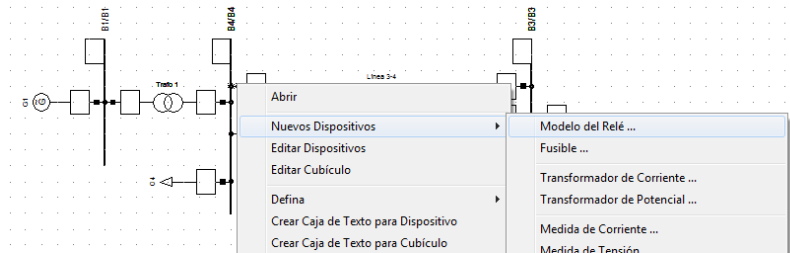


Figura B- 5. Procedimiento para elegir el modelo del relé

2.- Después aparece una nueva ventana llamada *Modelo del Relé* que se indica en la figura B-6, en la que se hace clic en *Tipo de Relé* y se elige *Seleccionar Tipo del Proyecto*.

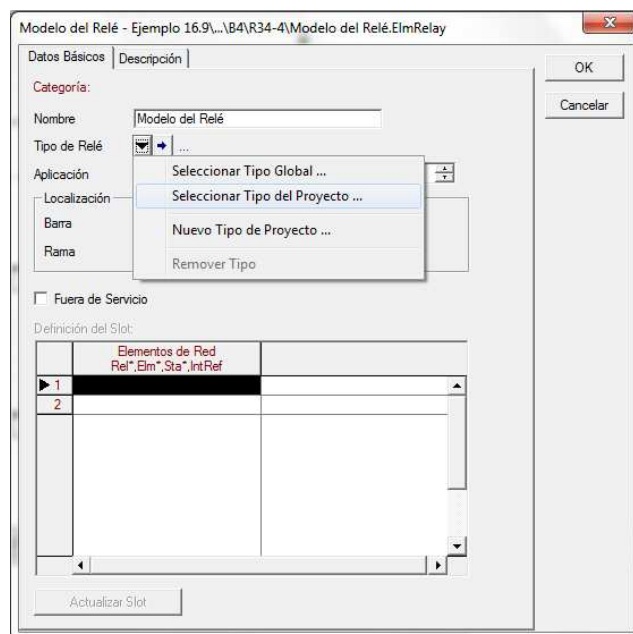


Figura B- 6. Ventana Modelo del Relé

3.- Luego aparece una nueva ventana en la que se elige el relé que se va a utilizar, en este caso para el ejemplo se utiliza un Offset Mta Mho que se encuentra en la Biblioteca/Distance Relays/GEC Alsthom/, como se indica en la figura B-7.

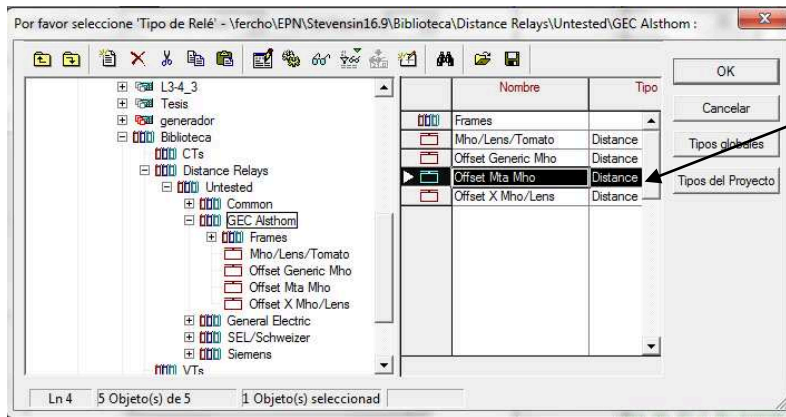


Figura B- 7. Ventana para seleccionar el relé de distancia

4.- Al momento de presionar OK se regresa a la ventana *Modelo del Relé* y se observa todas las características del relé de distancia ingresado, ahí se puede editar las zonas características, los tiempos de temporización de las zonas 2,3.

5.- Para una mejor calibración se procede a graficar el diagrama R-X, para ello se selecciona el lugar donde se encuentra el relé y se hace clic derecho para lo cual se selecciona *Crear Diagrama R-X*. Como se indica en la figura B-8.

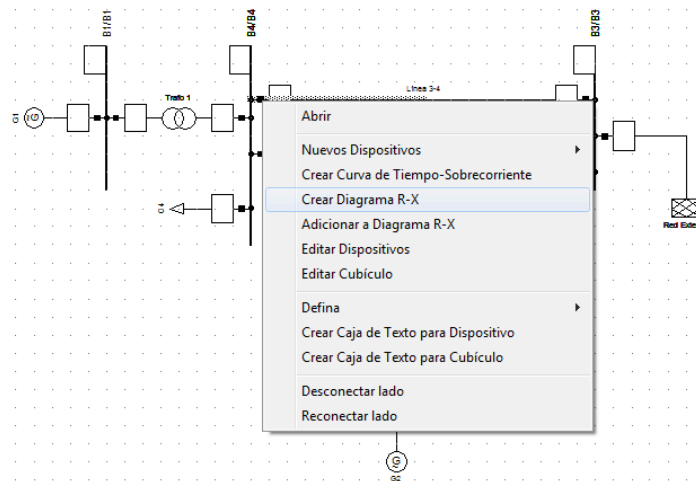


Figura B- 8. Procedimiento para crear el diagrama R-X

6.- El nuevo diagrama creado se indica en la figura B-9 en la que se puede observar las zonas de protección del relé de distancia, la línea de transmisión protegida, haciendo doble clic el perímetro de las diferentes zonas de impedancia se puede editar el alcance de la zona.

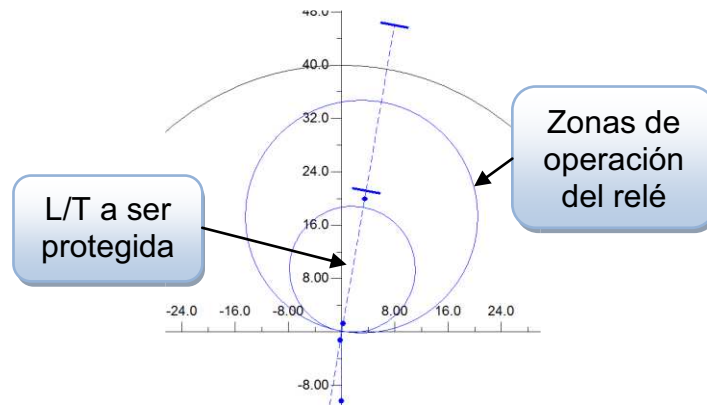


Figura B- 9. Zona de impedancia para un relé

B.4.- GRÁFICA DE LA IMPEDANCIA QUE MIDE EL RELÉ DURANTE UNA SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS (RMS)

La lógica de operación del relé Offset Mta Mho en forma de bloques se indica en la figura B-10.

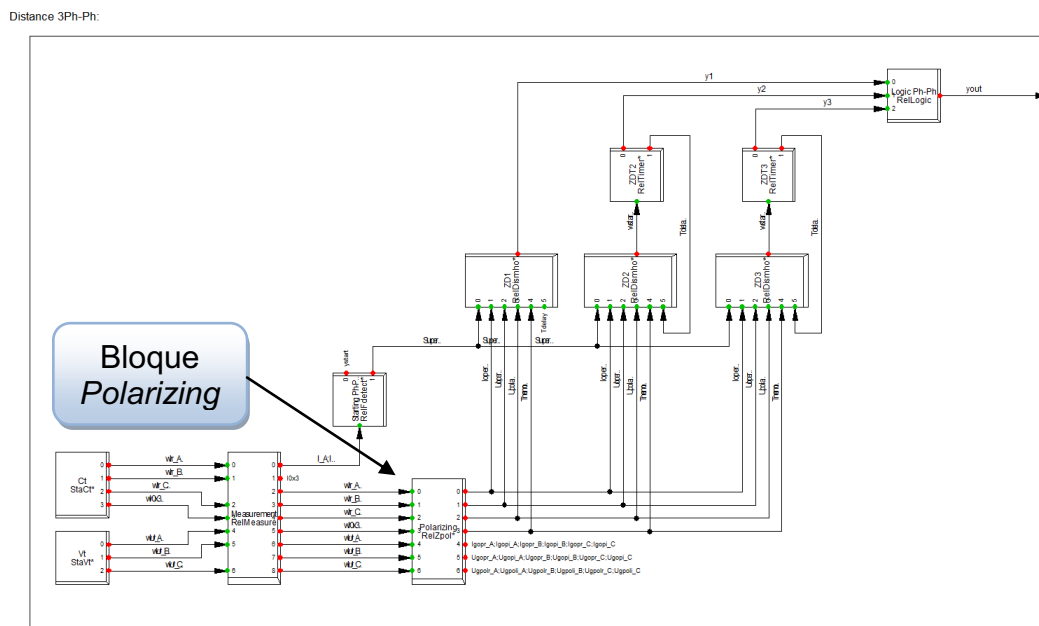


Figura B- 10. Lógica de operación del relé en forma de bloques

Como se indica en el anexo A, para realizar una gráfica primero hay que definir las variables a muestrear, estas son calculadas por en el bloque denominado *Polarizing* el cual realiza los cálculos de la impedancia ya que tiene valores de

entrada tanto de voltaje como de corriente y los valores de salida son las impedancias, como se indica en la figura B-10.

Para direccionar correctamente el lugar exacto donde se encuentra el relé en el sistema, existe la necesidad de renombrar el cubículo donde se encuentra el relé, para ello se realiza clic derecho en el lugar donde está ingresado el relé y se selecciona *Editar Cubículo* como se indica en la figura B-11.

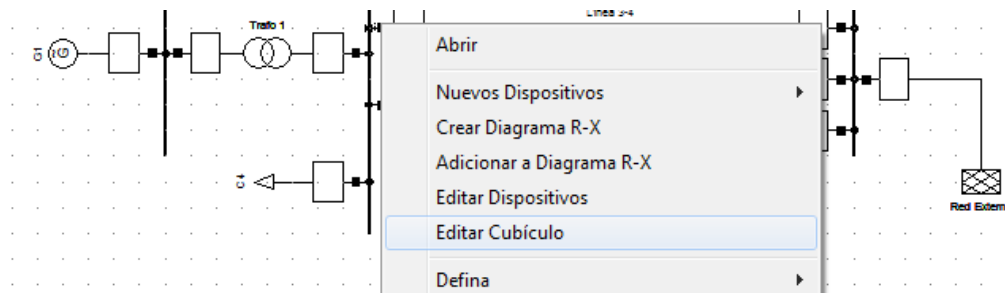


Figura B- 11. Proceso para editar cubículo

Luego aparece una ventana que se muestra en la figura B-12, en la se escribe el nombre del cubículo, en este caso se renombra como R34-4.

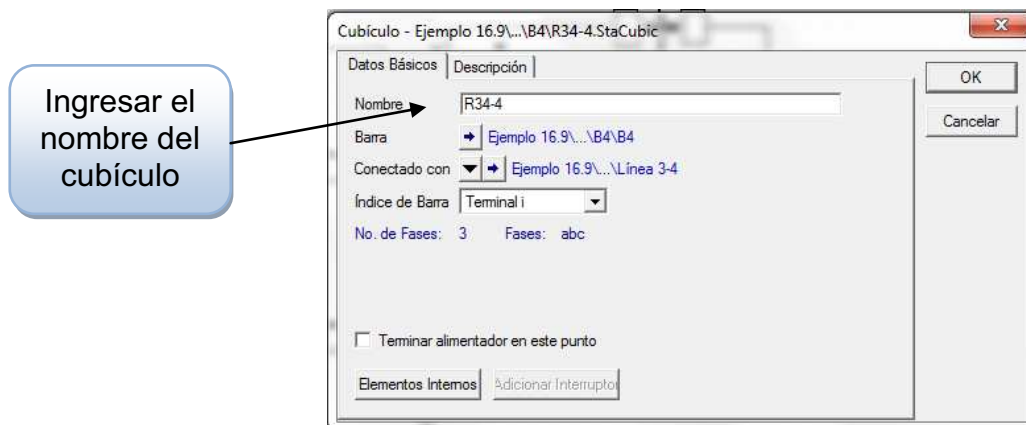


Figura B- 12. Renombrar el cubículo

Para indicar nuevas variables a monitorear se hace clic en , aparece una nueva ventana que se indica en la figura B-13. En la cual se debe ingresar el nuevo elemento que contiene las variables a monitorear.

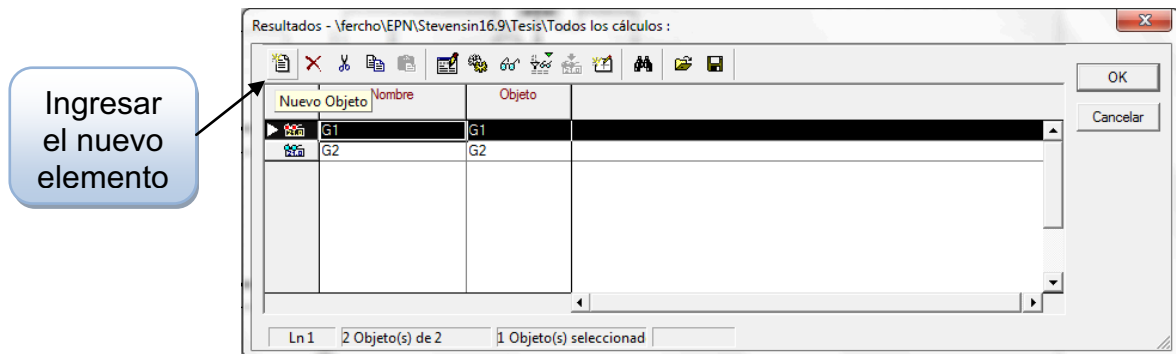


Figura B- 13. Carpeta que indica los elementos a monitorear

Después de hacer clic en *Nuevo Objeto* aparece una nueva ventana que se indica en la figura B-14, en esta ventana se debe seleccionar el elemento que realiza los cálculos de la impedancia, para eso se hace clic en *Objeto* luego *Seleccionar*.

En este caso es *Polarizing* realiza los cálculos, este es un bloque del modelo del relé de distancia.

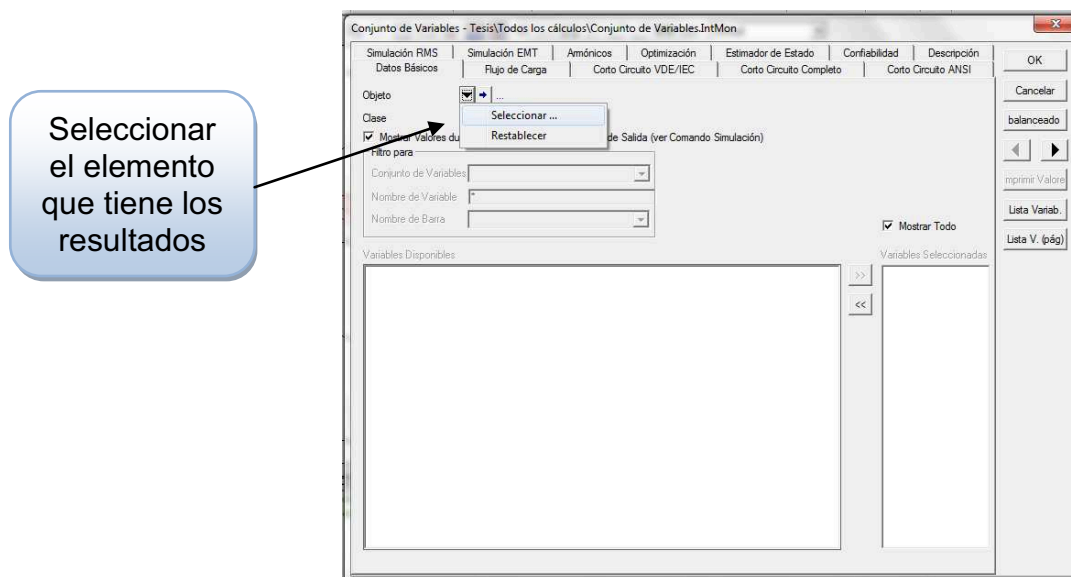


Figura B- 14. Ventana en la que se indica las variables a monitorear

Cada relé de distancia que está ingresado en el sistema tiene un bloque respectivo de cálculo de la impedancia, por este motivo hay que direccionar correctamente el elemento que tiene las variables a monitorear. Primero se busca la barra en la que se encuentra el relé, después al cubículo respectivo en el cual el relé está analizando y luego al bloque *Polarizing*, como se indica en la figura B-15.

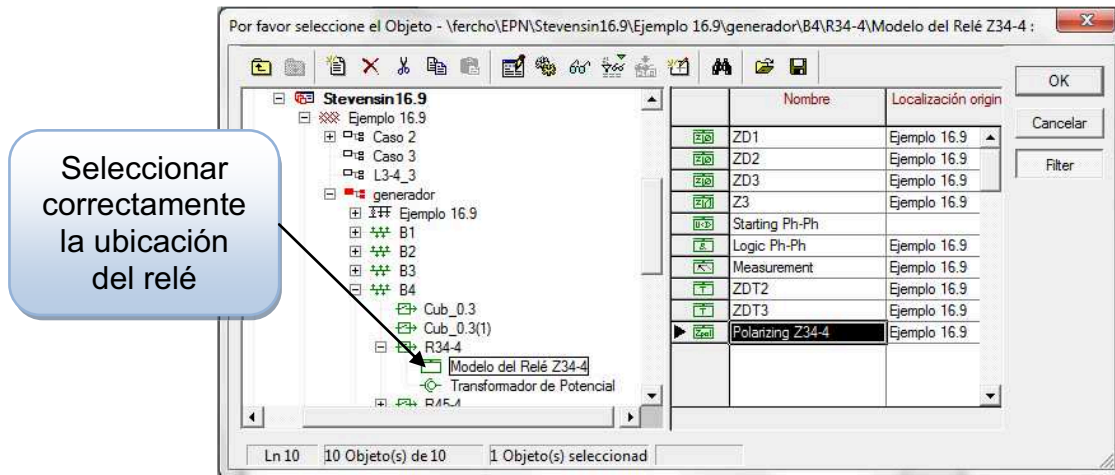


Figura B- 15. Ventana para seleccionar el elemento a cual se va a monitorear

Como se realiza una simulación RMS, hay que dirigirse al submenú *Simulación RMS* en la ventana *Conjunto de Variables*, luego se elige las variables de resistencia y reactancia, como se indica en la figura B-16.

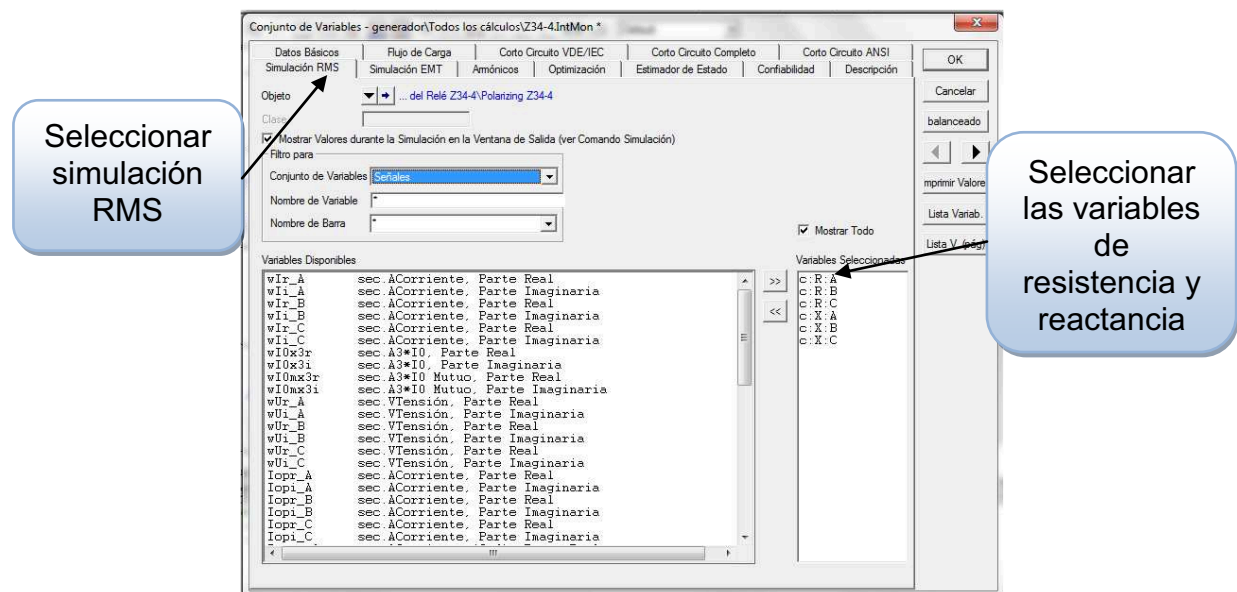


Figura B- 16. Selección de variables a monitorear

Una vez definidas las variables a monitorear se procede a graficar la resistencia y la reactancia, para ello se hace doble clic en el *diagrama R-X* y se elige en el submenú *Variables/Tiempo*, luego se hace clic en *Archivos de Resultados* y se selecciona *Todos los cálculos* como se indica en la figura B-17.

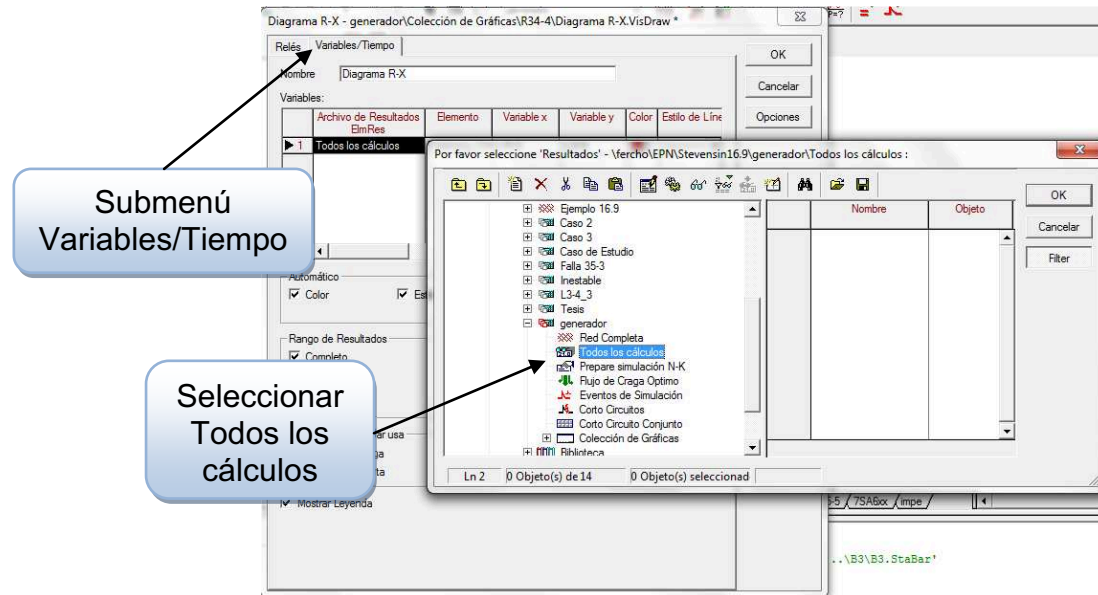


Figura B- 17. Direccional la carpeta Todos los cálculos

Al hacer clic en *Elemento* del submenú *Variables/Tiempo* se selecciona el bloque *Polarizing* del relé a ser graficado, esto se observa en la figura B-18.

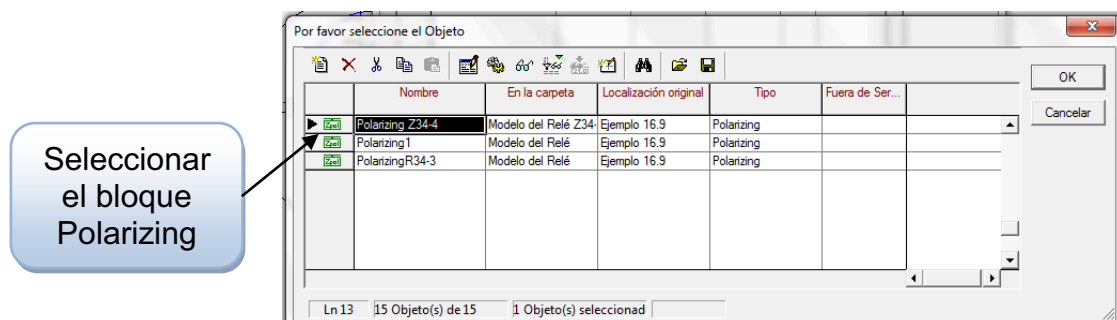


Figura B- 18. Definición del elemento en el cual se van a monitorear las variables

En *Variable X* se selecciona la resistencia (R) calculada por el *Polarizing*, en *Variable Y* se elige la reactancia (X), como se indica en la figura B-19.

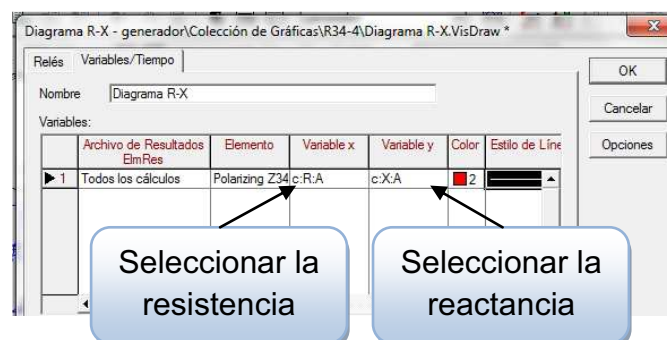


Figura B- 19. Definición de la variable a monitorear

Para finalizar se corre un evento y se observa en la figura B-20 el diagrama R-X además de las zonas de operación del relé, la trayectoria de la impedancia calculada por el relé de distancia durante el evento producido.

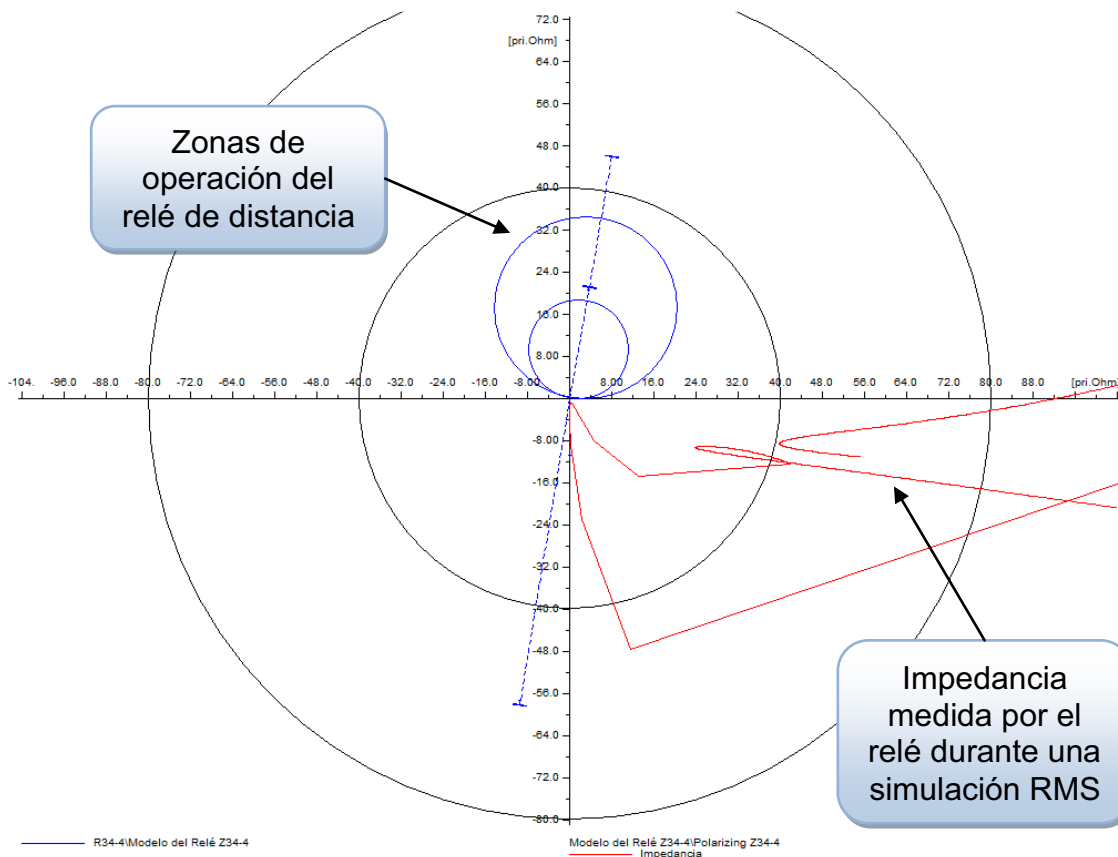


Figura B- 20. Impedancia medida por el relé durante un evento producido

ANEXO C

IMPEDANCIA CALCULADA POR EL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA ESTABLE

En el SEP de prueba al momento de existir una falla trifásica en la L/T 4-5 cerca de la barra 4 y despejar la falla a 0,180 s después de ocurrida, el sistema permanece estable.

Si se instalan relés de distancia en todas las L/T del SEP y al graficar la impedancia calculada por el relé de distancia durante la simulación RMS se obtienen las siguientes figuras.

C.1.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 3 Y PROTEGE LA L/T 34 – R34-3

Los parámetros de ajuste de las zonas de operación del relé R34-3 se indican en la tabla C-1.

Tabla C- 1. Parámetros de ajuste del relé R34-3

Relé R34-3	Z1	Z2	Z3
Temporización [ms]	-	250	800
RA [Ω - pri]	9	9	9
XA [Ω - pri]	17	25	30
Ang R [grados]	32	32	32
Ang X[grados]	22	22	22
Ang D[grados]	80	80	80

En la figura C-1 se puede observar que la variación de la impedancia durante la simulación RMS, el primer fenómeno que observa el relé de distancia es la falla

que ingresa a la zona 2 luego de un tiempo la falla es despejada y la impedancia calculada por el relé empieza a oscilar.

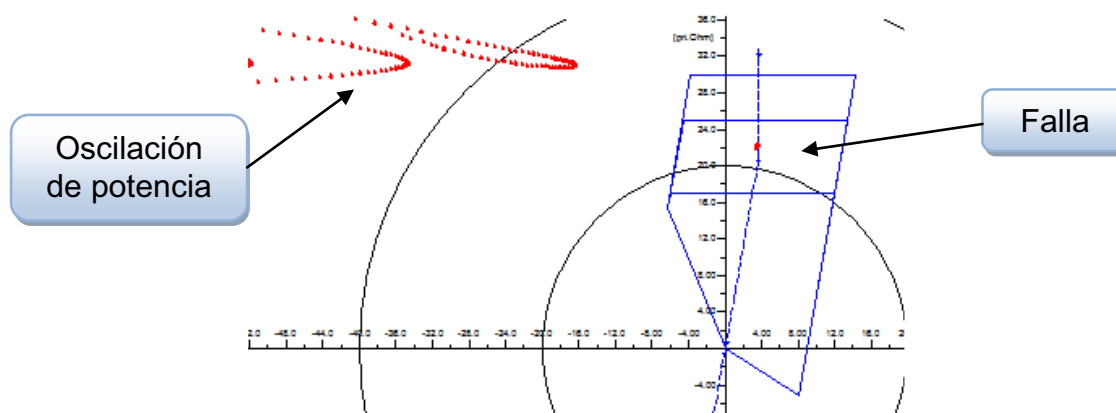


Figura C- 1. Zonas de operación del Relé R34-3 – Fuente DigSilent

C.2.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 3 Y PROTEGE LA L/T 34 – R34-4

Los parámetros de ajuste de las zonas de operación del relé R34-4 se indican en la tabla C-2.

Tabla C- 2. Parámetros de ajuste del relé R34-4

Relé R34-4	Z1	Z2	Z3
Temporización [ms]	-	250	800
RA [Ω - pri]	33	33	33
XA [Ω - pri]	17	32	42
Ang R [grados]	32	32	32
Ang X[grados]	22	22	22
Ang D[grados]	80	80	80

En la figura C-2 se observa la variación de la impedancia en el plano complejo R-X durante una simulación RMS, en la figura C-2(a) se observa que la oscilación de la impedancia se aproxima cada vez menos a la zona de operación a medida que la oscilación de potencia se atenúa.

En la figura C-2(b) se muestra un acercamiento de la zona de operación del relé R34-4, y se puede observar que durante una oscilación de potencia estable la impedancia ingresa a la zona 1 de operación del relé.

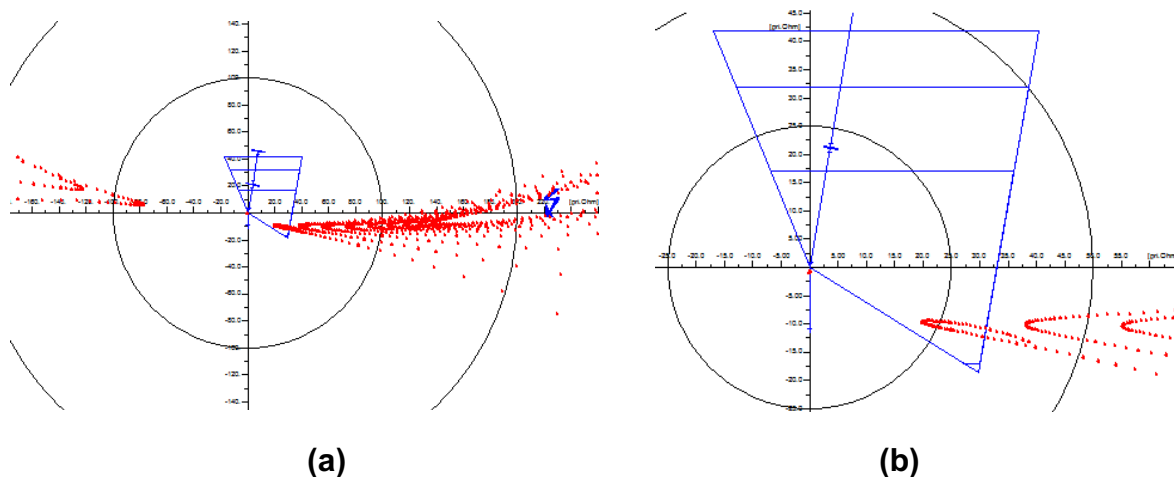


Figura C- 2. Zonas de operación del Relé R34-4 – Fuente DigSilent

C.3.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 4 Y PROTEGE LA L/T 45 – R45-4

Los parámetros de ajuste de las zonas de operación del relé R45-4 se indican en la tabla C-3.

Tabla C- 3. Parámetros de ajuste del relé R45-4

Relé R45-4	Z1	Z2	Z3
Temporización [ms]	-	250	800
RA [Ω - pri]	26	26	26
XA [Ω - pri]	48	70	83
Ang R [grados]	32	32	32
Ang X[grados]	22	22	22
Ang D[grados]	80	80	80

En la figura C-3 se muestra la zona de operación del R45-4 en la que la falla ingresa a la zona 1.

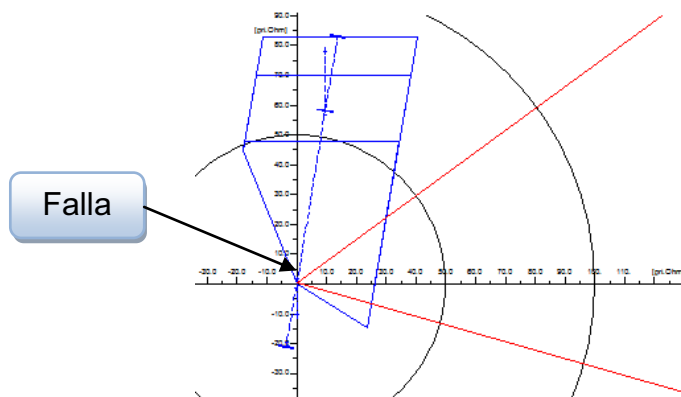


Figura C- 3. Zonas de operación del Relé R45-4 – Fuente DigSilent

Esto debía esperarse ya que se simula una falla trifásica en la línea 45 cerca de la barra 4, después de que la falla es despejada la impedancia medida por el relé sale de la zona de operación.

C.4.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 5 Y PROTEGE LA L/T 45 – R45-5

Los parámetros de ajuste de las zonas de operación del relé R45-5 se indican en la tabla C-4.

Tabla C- 4. Parámetros de ajuste del relé R45-5

Relé R45-5	Z1	Z2	Z3
Temporización [ms]	-	250	800
RA [Ω - pri]	18	18	18
XA [Ω - pri]	48	62	68
Ang R [grados]	32	32	32
Ang X[grados]	22	22	22
Ang D[grados]	80	80	80

Como la falla es en la L/T 4-5 es obvio que la impedancia debe ingresar la zona de operación como se indica en la figura C-4. Ingresa en la zona 2 ya que la falla ocurre en el otro extremo de la L/T, después de despejada la falla la impedancia medida por el relé sale de la zona de operación.

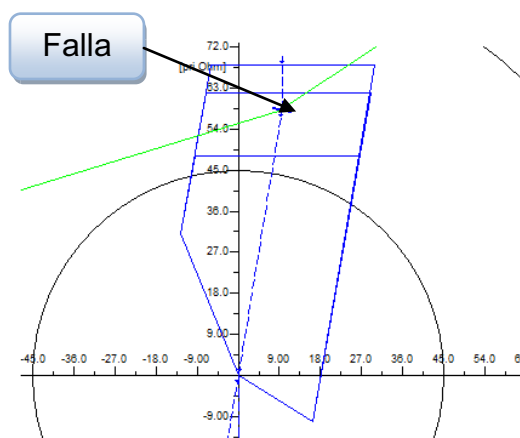


Figura C- 4. Zonas de operación del Relé R45-5 – Fuente DigSilent

C.5.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 3 Y PROTEGE LA L/T 35 – R35-3

Los parámetros de ajuste de las zonas de operación del relé R35-3 se indican en la tabla C-5.

Tabla C- 5. Parámetros de ajuste del relé R35-3

Relé R35-3	Z1	Z2	Z3
Temporización [ms]	-	250	800
RA [Ω - pri]	12	12	12
XA [Ω - pri]	20	35	50
Ang R [grados]	32	32	32
Ang X[grados]	22	22	22
Ang D[grados]	80	80	80

En la figura C-5 se observa la zona de operación del relé R35-3, la impedancia medida por el relé durante la simulación RMS oscila, pero en la figura C-5(b) se puede observar que la impedancia de oscilación no ingresa a la zona de operación.

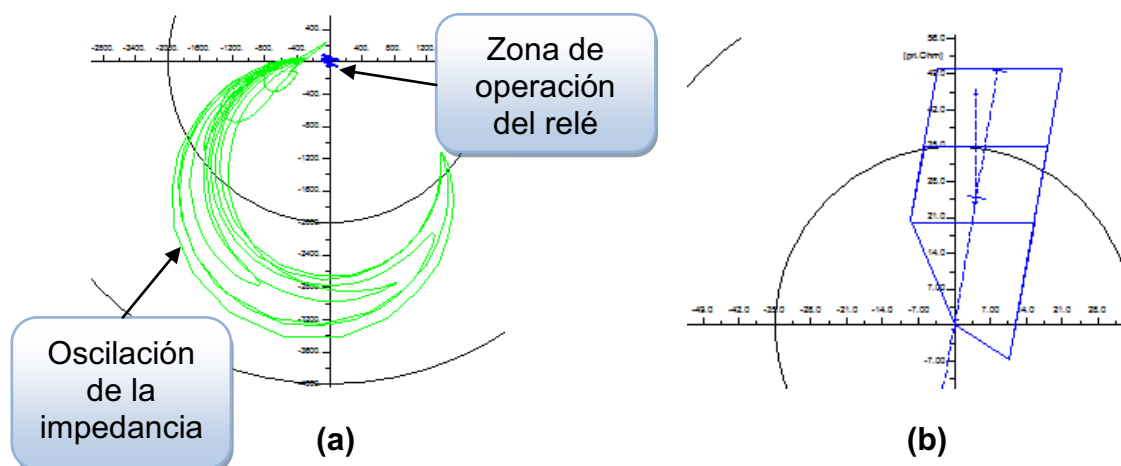


Figura C- 5. Zonas de operación del Relé R35-3 – Fuente DigSilent

C.6.- RELÉ INSTALADO EN LA BARRA 5 Y PROTEGE LA L/T 35 – R35-5

Los parámetros de ajuste de las zonas de operación del relé R35-5 se indican en la tabla C-6.

Tabla C- 6. Parámetros de ajuste del relé R35-5

Relé R35-5	Z1	Z2	Z3
Temporización [ms]	-	250	800
RA [Ω - pri]	32	32	32
XA [Ω - pri]	22	36	49
Ang R [grados]	32	32	32
Ang X[grados]	22	22	22
Ang D[grados]	80	80	80

De igual manera que el caso anterior la impedancia medida por el relé durante la simulación RMS oscila, pero esta oscilación de la impedancia no ingresa a la zona de operación del relé.

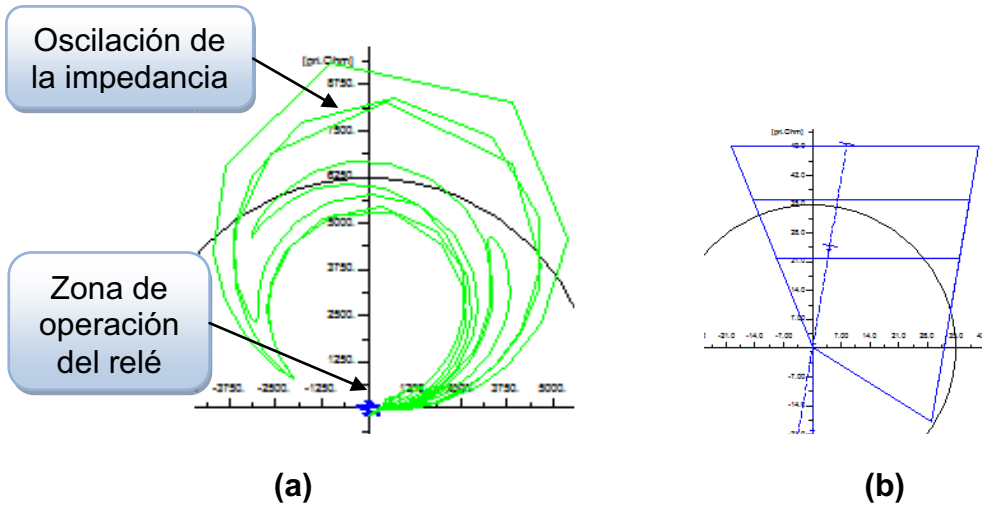


Figura C- 6. Zonas de operación del Relé R35-5 – Fuente DigSilent

El diagrama de impedancia R-X de los relés en los extremos de la L/T 35(2) no se muestran ya que son similares a los instalados a los extremos de la L/T 35(1).

ANEXO D

MANUAL DEL USUARIO

D.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

La rutina de programación FORDI 1.0 (Función de oscilación del relé de distancia), ayuda a determinar posibles ajustes de la función de oscilación de potencia en algunos relés de distancia.

El código que utiliza la rutina de programación FORDI 1.0 consta de varios archivos (*.m, *.fig), el programa consta de una interfaz grafica para la utilización sencilla de la rutina de programación, cuenta de varios archivos de imagen (*.jpg y *.png) que son utilizados como elementos virtuales, también cuenta con un archivo de documentación (*.pdf) en el que se encuentra el manual del usuario de la rutina de programación.

D.2.- REQUERIMIENTO DEL SOFTWARE Y DEL HARDWARE

La rutina de programación FORDI 1.0 se ha creado y ejecutado en una computadora HP G62 Notebook PC, con un procesador Intel(R) Core(TM) i5 CPU, M430 – 2.27 GHz y una memoria RAM de 4 GB.

La rutina de programación FORDI 1.0 ha sido desarrollado en Matlab 7.8 (R2009a), ejecutado en un sistema operativo Windows 7 y se utiliza la programación visual de Matlab GUI (Interfaces Gráficas de Usuario) para que la rutina de programación tenga un ambiente amigable con el usuario.

D.3.- ACCESO Y EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Para ingresar a la rutina de programación FORDI 1.0 primero se debe ejecutar el programa Matlab, luego se abre el archivo *.m llamado presentación.m, como se muestra en la figura D-1.

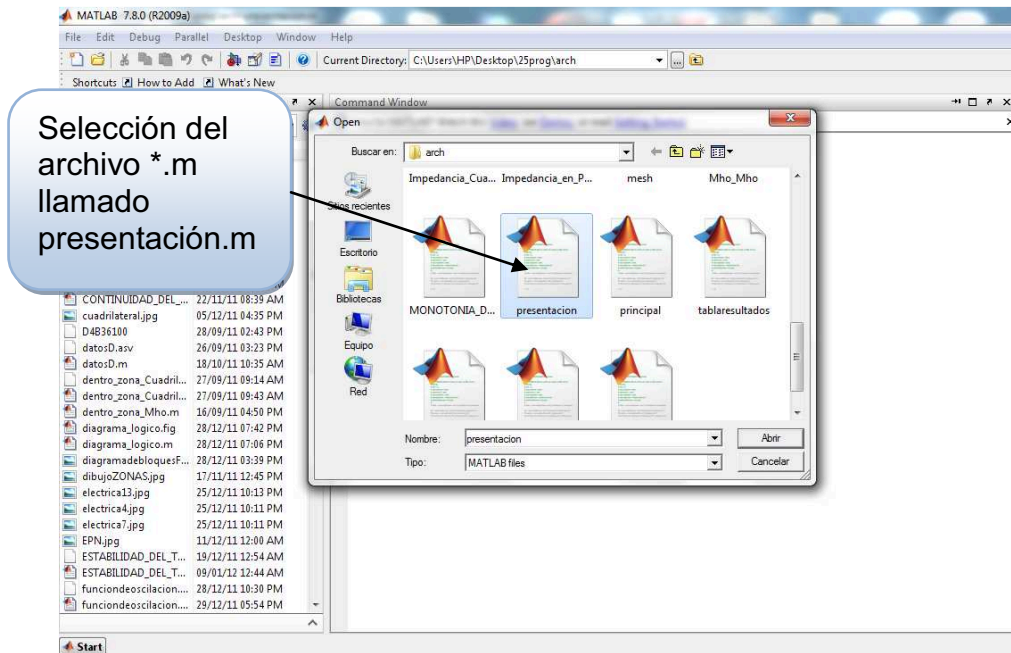


Figura D- 1. Ventana para buscar y abrir el archivo *.m llamado presentación.m

Después de abrir el archivo presentación.m, aparece una nueva ventana de edición de archivos *.m, en esta ventana se debe correr el programa presionando el botón que se encuentra en la barra de herramientas y se indica en la figura D-2.

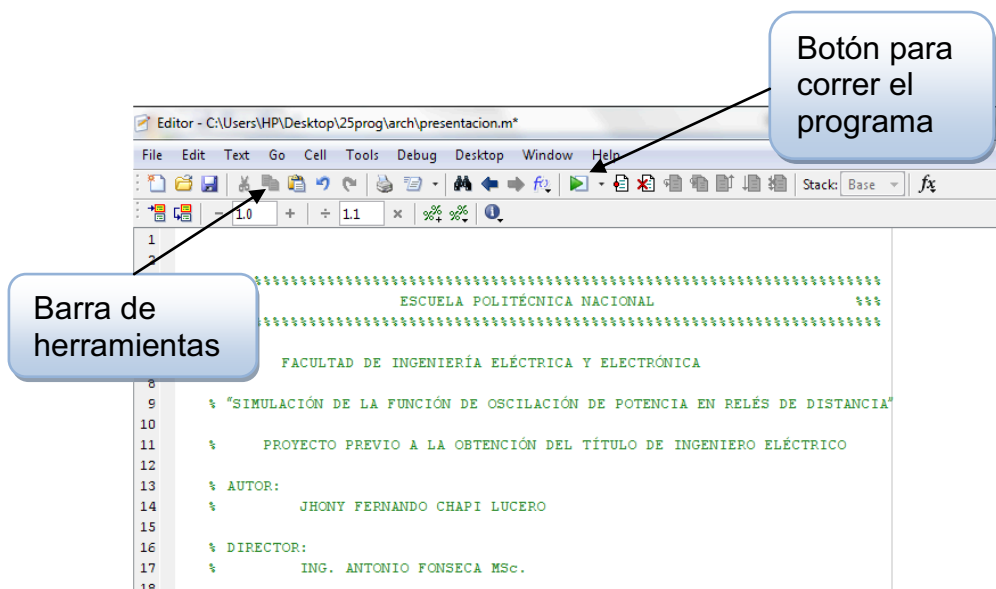


Figura D- 2. Ventana para la ejecución de la rutina de programación

Al momento de correr la rutina de programación puede que sea necesario la actualizar de el directorio y la ruta de acceso de los archivos *.m que se van a

ejecutar, para esto en la nueva ventana que aparece se debe presionar *Change Directory* (Cambiar directorio), como se muestra en la figura D-3.

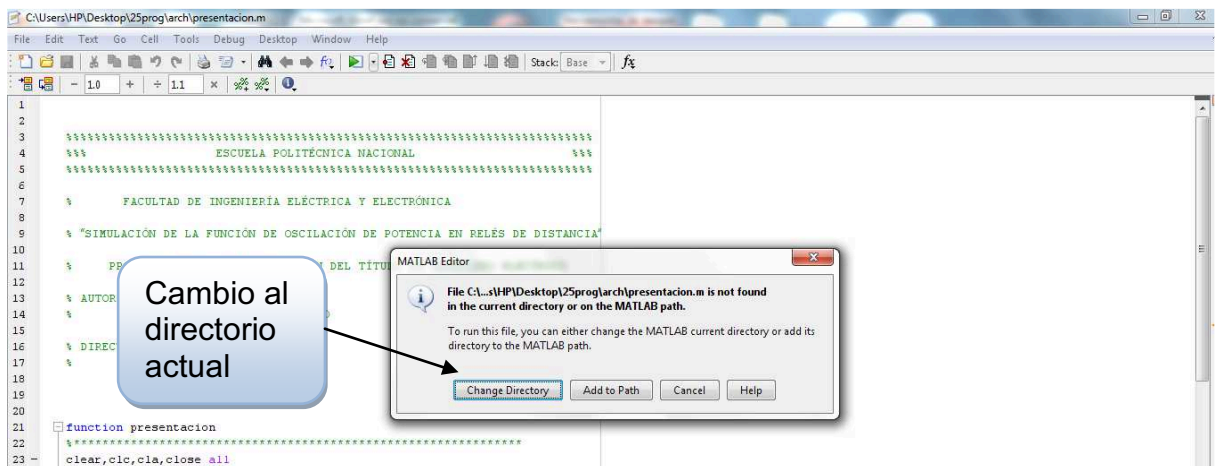


Figura D- 3. Ventana para actualizar de la dirección de los archivos *.m

Luego de ejecutar el programa y al no tener ningún error, en la figura D-4 se presenta la primera ventana de la rutina de programación que es una presentación general o carátula.



Figura D- 4. Carátula de la rutina de programación

En la ventana de la carátula se observa la información general y tiene un botón que da acceso a la siguiente ventana de la rutina de programación que se muestra en la figura D-5.



Figura D- 5. Ventana de la rutina de programación FORDI 1.0

Para un correcto funcionamiento de la rutina de programación FORDI 1.0 se debe ingresar correctamente los datos y esto se detalla a continuación.

D.3.1.- INGRESO DE LOS ARCHIVOS COMTRADE

A la izquierda de la ventana FORDI 1.0 se encuentra el botón EXAMINAR y luego de presionarlo aparece una nueva ventana en la que se debe seleccionar el archivo COMTRADE tanto de voltaje como de corriente, esto se observa en la figura D-6.

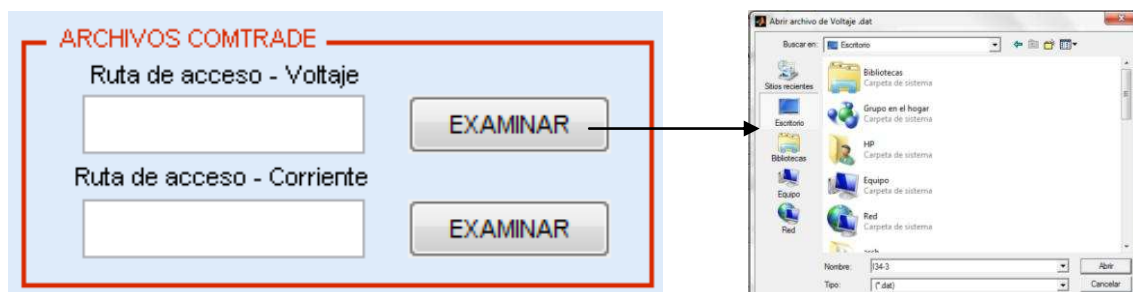


Figura D- 6. Ingreso del ruta de acceso de los archivos COMTRADE

D.3.2.- INGRESO DE DATOS DE LAS ZONAS DE OPERACIÓN

Para ingresar los datos de las zonas de operación primero se debe seleccionar el tipo de característica que va a utilizar, esta puede ser tipo Mho o Cuadrilateral, como se indica en la figura D-7.

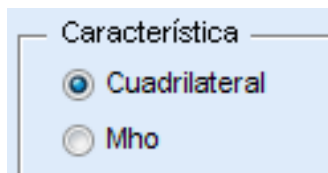


Figura D- 7. Selección de la característica de operación que se va a utilizar

Una vez seleccionada la característica que se va utilizar se debe ingresar, los datos de las zonas de operación, los parámetros de la línea de transmisión a proteger y los tiempos de temporización de las zonas 2 y 3.

Se considera a la zona 1 como instantánea y las zonas 2 y 3 temporizadas por un tiempo ajustable en *ms*.

En la figura D-8(a) se indica los datos que se deben ingresar en la característica cuadrilateral y en la figura D-8(b) se muestra la característica cuadrilateral aclarando el ingreso de cada uno de los dato.

RELÉ 7SA6

Característica

Cuadrilateral

Mho

Nota: Todos los parámetros deben ser ingresados en ohm primarios.

Zona 1

RA ohm

XA ohm

Ang R grados

Ang X grados

Ang D grados

Datos L/T

Z ohm

Ang grados

Temporización

Zona 2 ms

Zona 3 ms

Zona 2

Fuera de Servicio

RA ohm

XA ohm

Ang R grados

Ang X grados

Ang D grados

Zona 3

Fuera de Servicio

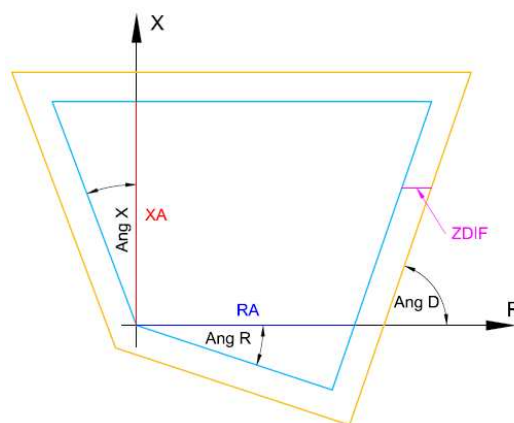
RA ohm

XA ohm

Ang R grados

Ang X grados

Ang D grados



(a)

(b)

Figura D- 8. Ingreso de datos de la zona de operación cuadrilateral en FORDI 1.0

De igual manera en la figura D-9(a) se indica los datos que se deben ingresar en la característica mho y en la figura D-9(b) se muestra la característica mho aclarando el ingreso de cada uno de los dato.

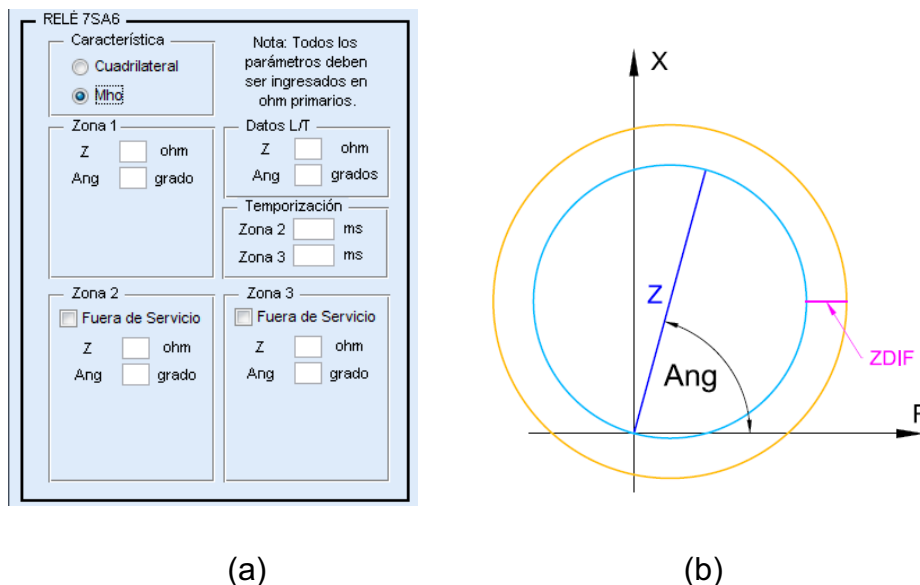


Figura D- 9. Ingreso de datos de la zona de operación mho en FORDI 1.0

Al seleccionar la opción *Fuera de Servicio* que se encuentra en cada zona de operación, oculta a la zona y no la considera en el caso de estudio.

D-3-3.- INGRESO DE DATOS DE LA FUNCIÓN DE OSCILACIÓN DEL RELÉ

En la figura D-10 se indica la ventana en la que se debe ingresar los datos que necesita la función de oscilación del relé SIEMENS 7SA6.

Se debe seleccionar las zonas de bloqueo que pueden ser: bloquear todas las zonas de operación, bloquear la zona 1, bloquear las zonas 2 y 3 y bloquear las zonas 1 y 2.

También se debe ingresar el tiempo de bloqueo en *ms*, este se encuentra preestablecido en un ajuste de 80 *ms*.

ZDIF es el valor de impedancia que se debe aumentar a la zona de mayor ajuste para formar la zona de detección de la oscilación, debe ser ingresada en ohms.

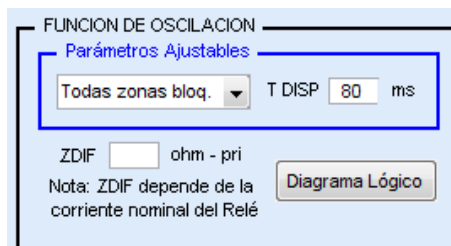


Figura D- 10. Ingreso de datos de la función de oscilación

Presionando el botón *Diagrama Lógico* se desplaza una nueva ventana, figura D-11, en la que se indica el diagrama lógico total que utiliza el relé SIEMENS 7SA6 para detectar una oscilación de potencia.

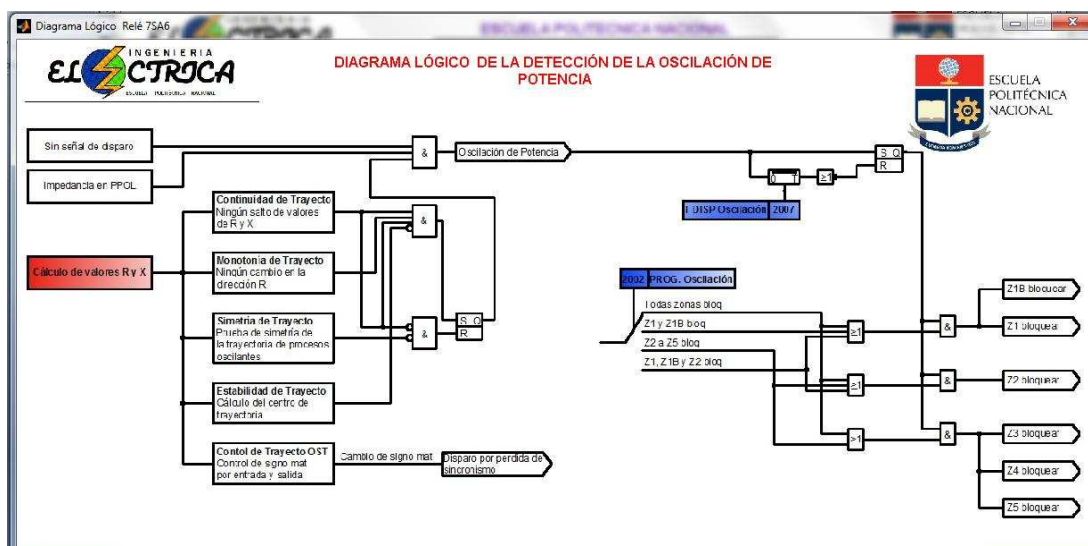


Figura D- 11. Diagrama lógico para detectar una oscilación de potencia utilizado por el relé SIEMENS 7SA6

D-3-4.- RESULTADOS DE FORDI 1.0

Después de presionar el botón *Calcular* la rutina de programación procesa los datos de entrada y los muestra en la tabla que se indica en la figura D-12.

Variación de Tiempo [ms]	Zona	Operación Func. Osc.	Tiempo Calibración [ms]	Operación del Relé
175	1	1	175	No Trip

Disparo por OST

NO

Figura D- 12. Resultados de la rutina de programación

En la tabla se indican varios resultados que se encuentran relacionados directamente.

- **Variación de Tiempo.-** Es el tiempo en que la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la zona de operación y cumple con todos los criterios de detección de una oscilación. La zona de operación se indica en la columna dos de la tabla de resultados y las unidades de la variación del tiempo se encuentran en *ms*.

- **Zona.-** Indica el número 1, 2 o 3 para la representación del estudio de la zona 1, zona 2 o zona 3 respectivamente.

- **Operación de la Función de Oscilación.-** En esta columna indica si el relé detecta una oscilación de potencia o una falla en la zona de operación indicada en la columna dos.
En el caso de que el relé detecte como una falla se muestra "0" y si detecta como una oscilación de potencia indica "1" si es la primera oscilación que ingresa al relé, "2" para la segunda oscilación y así sucesivamente para las siguientes oscilaciones que ingresan a la zona de operación.

- **Tiempo de Calibración.-** Si el relé detecta una oscilación de potencia, en esta columna se indica el tiempo aproximado mínimo de bloqueo que necesita el relé, para que no opere en una condición de oscilación de potencia.
En el caso de que una oscilación ingrese a varias zonas de operación, el tiempo aproximado mínimo de bloqueo es el que se indica en la zona de mayor alcance, antes de que la impedancia medida por el relé salga de la última zona de operación.

- **Operación del Relé.-** Tiene dos opciones Trip y No Trip (Disparo y No Disparo). Si la operación del relé es Trip los resultados que se indican en las siguientes columnas no son validos debido a que el relé ya opero.

En la ventana de resultados también se indica una casilla que muestra el estado del disparo por oscilación de potencia inestable (OST), esta puede ser, *SI* para una operación de la función OST y *NO* para la no operación de la función.

Para que realice correctamente los cálculos FORDI 1.0 necesitan al menos un valor de R y X antes de ingresar a la zona de operación.

D.3.5.- GRÁFICOS QUE SE MUESTRAN DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN

En la figura D-13 se observa la ventana en la que se puede seleccionar la grafica a mostrarse a la derecha de la rutina de programación, la gráfica puede ser R-X, R-X-T, y la velocidad de la impedancia al momento de ingresar a la zona de operación.

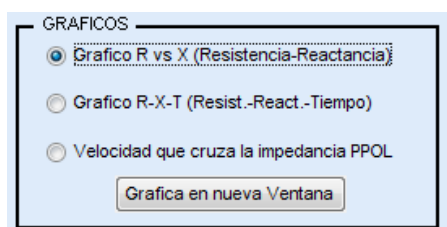


Figura D- 13. Ventana de la lista de gráficos que se indican en FORDI 1.0

Al presionar el botón *Grafica en nueva Ventana* inmediatamente aparece una nueva ventana en la que se puede manipular la grafica presentada en FORDI 1.0

D.3.6.- COMPLEMENTOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN FORDI 1.0

En la parte superior izquierda de la rutina de programación FORDI 1.0 se encuentra la barra de menú en la que existen dos opciones como se muestra en la figura D-14.



Figura D- 14. Barra de menú de la rutina de programación FORDI 1.0

Al seleccionar *Ayuda del GUI* se despliega un archivo en formato PDF en el que se encuentra el manual del usuario, esto de muestra en la figura D-15.

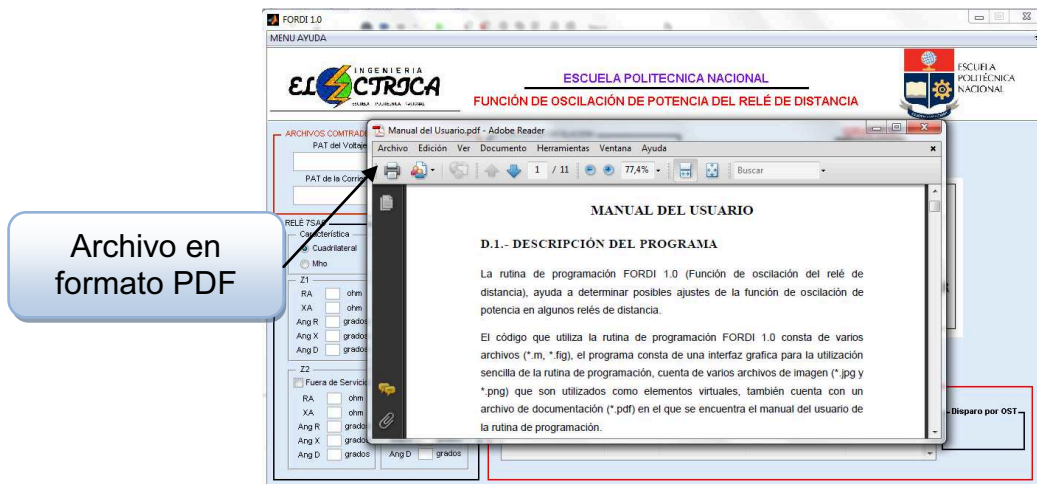


Figura D- 15. Archivo en formato PDF donde se encuentra el manual del usuario

Si en el MENU AYUDA se selecciona *Autor* aparece inmediatamente una ventana que se muestra en la figura D-15 en la que se observa información del autor y el director del proyecto de titulación.



Figura D- 16. Información del autor y director del proyecto

Finalmente para salir de la rutina de programación FORDI 1.0 se debe seleccionar el botón *SALIR* que se encuentra junto al botón *CALCULAR*.

Después de hacer clic el botón *SALIR* se presenta la ventana que se indica en la figura D-17 y según la opción seleccionada, permite salir de la rutina de programación o regresar a FORDI 1.0.



Figura D- 17. Mensaje al seleccionar el botón SALIR