

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

"EFECTO DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE CIRCUITOS PARALELOS EN LA OPERACIÓN DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS. APLICACIÓN A LA BARRA DE 138 kV DE LA S/E MACHALA"

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

EDWIN WLADIMIR QUISILEMA CARRERA
epn_jm_elec@hotmail.com

DIRECTOR: ING. CHRISTIAN ANTONIO FONSECA AMAYA, MSc.
afonseca@transelectric.com.ec

CODIRECTOR: ING. LUIS ELIAS TAPIA CALVOPÍÑA, MSc.
luis.tapia@epn.edu.ec

Quito, Diciembre 2013

DECLARACIÓN

Yo, Edwin Wladimir Quisilema Carrera, 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.

Edwin Wladimir Quisilema Carrera

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin Wladimir Quisilema Carrera, bajo nuestra supervisión.

Ing. Antonio Fonseca MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Luis Tapia MSc.
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a mis padres por su amor y sobre todo su comprensión en el transcurso de toda mi vida, por ser un ejemplo a seguir.

Gracias a mi tía FABIOLA, por su apoyo incondicional durante mi vida estudiantil.

De manera muy especial quisiera agradecer a mi director de proyecto, Ing. Antonio Fonseca MSc. por su tiempo, dedicación y apoyo brindados durante la ejecución de este proyecto. Es una persona a la cual respeto mucho.

Al Ing. Luis Tapia MSc. quien supo brindarme sus conocimientos y experiencia en el transcurso de mi vida estudiantil.

Quisiera agradecer a los ingenieros de la Subgerencia de Operación y Mantenimiento de CELEP EP – TRANSELECTRIC por su ayuda y apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Gracias a mis amig@s que han estado en las buenas y las malas a mi lado.

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermano

CONTENIDO

CONTENIDO	VI
RESUMEN	XIII
PRESENTACIÓN	XV
CAPÍTULO I	
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	3
CAPÍTULO II	
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN – RELÉS DE DISTANCIA.....	6
2.1.1 LAZOS DE IMPEDANCIA ^[1]	8
2.1.1.1 Unidades de Fase.....	8
2.1.1.2 Unidades de Tierra.....	10
2.1.1.2.1 Falla monofásica sin carga.....	10
2.1.1.2.2 Falla monofásica con carga.....	12
2.2 PROTECCIÓN DE BARRAS.....	13
2.2.1 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRAS ^[1]	14
2.2.1.1 Protección diferencial de barra de baja impedancia.....	17
2.2.1.2 Relés diferenciales de barra de baja impedancia existentes.....	20
2.2.1.2.1 Protección diferencial parcialmente numérica (7SS6XX).....	20
2.2.1.2.2 Protección de barra completamente numérica (7SS52).....	21
CAPÍTULO III	
3 ANÁLISIS DEL EFECTO DE ACOPLAMIENTO DE CIRCUITOS PARALELOS EN LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS	23
3.1 MODELACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	23
3.1.1 INDUCTANCIAS ^[3]	23
3.1.1.1 Inductancias propias y mutuas.....	23
3.1.1.2 Efecto de retorno por tierra de una L/T.....	25
3.1.1.3 Matriz de impedancias de fase Z_{ABC}	28
3.1.1.3.1 L/T con retorno por tierra.....	28
3.1.1.3.2 L/T con retorno por tierra y cable de guarda.....	30
3.1.1.4 Matriz de impedancias de secuencias Z_{012}	31
3.1.1.5 Determinación de las matrices Z_{ABC} , Z_{012} mediante DlgSILENT Power Factory.....	32
3.1.1.5.1 L/T típica de 138 kV.....	32
3.1.1.5.2 L/T San Idelfonso – Machala 138 kV.....	36
3.1.2 CAPACITANCIAS ^[3]	39

3.1.2.1	Determinación de la matriz P_{ABC} de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV mediante DIgSILENT Power Factory	43
3.1.3	<i>INDUCCIONES ELECTROMAGNÉTICAS Y ELECTROSTÁTICAS EXISTENTES EN L/T DE DOBLE CIRCUITO ANTE DIFERENTES MANIOBRAS</i>	44
3.1.3.1	Inducción electromagnética ^[4]	45
3.1.3.2	Inducción electrostática ^[4]	47
3.1.3.3	Aplicación de la inducción electromagnética y electrostática a la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV.....	49
3.1.3.3.1	<i>Cálculo de la corriente y voltaje inducidos electromagnéticamente</i>	50
3.1.3.3.2	<i>Calculo de la corriente y voltaje inducidos electrostáticamente</i>	58
3.1.3.3.3	<i>Resultados de voltajes y corrientes obtenidos teóricamente y mediante la simulación del flujo de potencia en ATP y DIgSILENT Power Factory</i>	65
3.2	ACOPLAMIENTO EXISTENTE EN CIRCUITOS PARALELOS – AFECTACIÓN A LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA – 21 ^[3]	68
3.2.1	<i>EFECTO DE ACOPLAMIENTO EN L/T – CIRCUITO SIMPLE</i>	68
3.2.1.1	Falla entre fases	68
3.2.1.2	Fallas fase – tierra	70
3.2.2	<i>EFECTO DE ACOPAMIENTO EN L/T – DOBLE CIRCUITO</i>	72
3.2.2.1	Análisis de fallas fase – fase	72
3.2.2.1.1	<i>Afectación en líneas sin trasposición</i>	72
3.2.2.1.2	<i>Afectación en líneas con trasposición</i>	73
3.2.2.2	Análisis de fallas fase - tierra	74
3.2.2.2.1	<i>Afectación en líneas sin trasposición</i>	74
3.2.2.2.2	<i>Afectación en líneas con trasposición</i>	75
3.2.2.3	Mecanismos de compensación del efecto mutuo	76
3.2.2.3.1	<i>Compensación ante fallas fase – fase</i>	77
3.2.2.3.2	<i>Compensación ante fallas fase – tierra</i>	77
3.2.2.4	Puesta a tierra de una L/T.....	78
3.3	ACOPLAMIENTO EXISTENTE EN LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV – AFECTACIÓN A LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA 87B DE LA S/E MACHALA 138 kV	83
3.3.1	<i>ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 KV</i>	83

CAPÍTULO IV

4	APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BAJA IMPEDANCIA EN LA BARRA DE 138 KV DE LA SUBESTACIÓN DE MACHALA	86
4.1	MODELACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL RELE DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA – APLICACIÓN A LA S/E MACHALA 138 kV	86
4.1.1	<i>DESCRIPCIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA A MODELARSE</i>	86
4.1.2	<i>CONSTRUCCIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA EN ATP</i>	89
4.1.2.1	Descripción General del SEP	89
4.1.2.2	Descripción de las bahías de 138 kV	90
4.1.2.3	Modelación de la protección diferencial de barra de baja impedancia	90
4.1.2.3.1	<i>Esquema de Barras</i>	90
4.1.2.3.2	<i>Generador</i>	91

4.1.2.3.3	<i>L/T San Idelfonso – Machala 138 kV</i>	91
4.1.2.3.4	<i>Transformadores de potencia</i> ^[6]	94
4.1.2.3.5	<i>Cargas</i>	96
4.1.2.3.6	<i>Transformadores de Corriente</i>	97
4.1.2.3.7	<i>Transformadores de interposición (4AM5120 -IDA/-2DA)</i> ^[9]	98
4.1.2.3.8	<i>Módulo de Restricción (7TM700)</i> ^[7]	103
4.1.2.4	Modelación de componentes adicionales	105
4.1.2.4.1	<i>Interruptores</i>	105
4.1.2.4.2	<i>Rama de conexión</i>	105
4.1.3	CONSTRUCCIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA EN MATLAB	106
4.1.3.1	Descripción del relé numérico a modelarse – 7SS601 ^[9]	106
4.1.3.2	Implementación del algoritmo del relé SIEMENS 7SS601	108
4.1.3.2.1	<i>Código de programación de APDB – 87B (2.0)</i>	111
4.1.4	PARÁMETROS 10 ID> Y 10KFAC DE LA S/E MACHALA 138 KV	114
4.1.5	SIMULACIONES REALIZADAS EN ATP Y APDB 87B (2.0)	115
4.1.5.1	Aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138kV	115
4.1.5.1.1	<i>Análisis de la operación del relé diferencial – L/T aterrizada</i>	117
4.1.5.2	Aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138kV mas falla externa – barra de Machala 69 kV	120
4.1.5.2.1	<i>Análisis de la operación del relé diferencial – L/T aterrizada – falla externa</i>	122
 CAPÍTULO V		
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
5.1	CONCLUSIONES	125
5.2	RECOMENDACIONES.....	127
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		129
 ANEXOS		
 ANEXO 1		
SIMULACIONES REALIZADAS DE LAS DIFERENTES MANIOBRAS EN LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 KV		131
 ANEXO 2		
MODELACIÓN COMPLETA DEL SEP Y DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL EN ATP		140
 ANEXO 3		
MANUAL DE USUARIO DE APDB – 87B (2.0)		141

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

FIGURA 2.1 CONEXIÓN DE UN RELÉ DE DISTANCIA.....	7
FIGURA 2.2 (A) ZONA DE PROTECCIÓN DE UN RELÉ DE DISTANCIA INSTALADO EN S/E: A (B) REPRESENTACIÓN DE LA L/T EN EL PLANO R – X	8
FIGURA 2.3 CÁLCULO DEL LAZO FASE – FASE	8
FIGURA 2.4 CÁLCULO DEL LAZO FASE – TIERRA – SIN CARGA	10
FIGURA 2.5 CÁLCULO DEL LAZO FASE – TIERRA – CON CARGA.....	12
FIGURA 2.6 ZONA DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA ^[1]	14
FIGURA 2.7 (A) FALLA EXTERNA O FLUJO DE CARGA (B) FALLA INTERNA	15
FIGURA 2.8 PROTECCIÓN DIFERENCIAL IDEAL (FALLA EXTERNA).....	16
FIGURA 2.9 PROTECCIÓN DIFERENCIAL IDEAL (FALLA INTERNA).....	16
FIGURA 2.10 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA.....	17
FIGURA 2.11 FORMAS DE ONDA PARA FALLAS EXTERNA E INTERNA RESPECTIVAMENTE ^[8]	19
FIGURA 2.12 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL.....	19
FIGURA 2.13 PROTECCIÓN NUMÉRICA 7SS601 ^[1]	20
FIGURA 2.14 CARACTERÍSTICA DE DISPARO DE 7SS6XX	21
FIGURA 2.15 ESTRUCTURA DE UNA PROTECCIÓN NUMÉRICA DE BARRA 7SS52 ^[1]	22

CAPÍTULO III

FIGURA 3.1 FLUJO INTERNO Y EXTERNO DE UN CONDUCTOR SÓLIDO	24
FIGURA 3.2 CONDUCTOR COMPUESTO POR TRES HILOS	24
FIGURA 3.3 MODELO DE RETORNO POR TIERRA DE CARSON	25
FIGURA 3.4 MODELO TRIFÁSICO CON RETORNO POR TIERRA	28
FIGURA 3.5 MODELO CON DOS CONDUCTORES DE GUARDA.....	30
FIGURA 3.6 ESTRUCTURA TÍPICA DE UNA L/T 138 kV – CIRCUITO SIMPLE.....	33
FIGURA 3.7 ESTRUCTURA TÍPICA DE UNA L/T 138 kV – DOBLE CIRCUITO.....	34
FIGURA 3.8 ESTRUCTURA DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV	37
FIGURA 3.9 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA CARGA PUNTUAL “Q”	39
FIGURA 3.10 CONDUCTORES CON SUS RESPECTIVAS IMÁGENES, REPRESENTADOS POR CARGAS	41
FIGURA 3.11 REPRESENTACIÓN DE CIRCUITOS ENERGIZADOS, DESENERGIZADOS Y ATERRIZADOS.....	45
FIGURA 3.12 VOLTAJE INDUCIDO EN EL CIRCUITO 2 DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA, EXTREMO DE LA S/E SAN IDELFONSO	50
FIGURA 3.13 VOLTAJE INDUCIDO EN EL CIRCUITO 2 DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA, EXTREMO DE LA S/E MACHALA.....	51
FIGURA 3.14 L/T SAN IDELFONSO – MACHALA, CIRCUITO 2 ATERRIZADO EN LOS DOS EXTREMOS	54
FIGURA 3.15 VOLTAJE INDUCIDO EN EL EXTREMO DE LA S/E SAN IDELFONSO – CIRCUITO 2 ATERRIZADO EN EL EXTREMO DE LA S/E MACHALA	56
FIGURA 3.16 VOLTAJE INDUCIDO EN EL EXTREMO DE LA S/E MACHALA – CIRCUITO 2 ATERRIZADO EN EL EXTREMO DE LA S/E SAN IDELFONSO.....	56
FIGURA 3.17 FALLA BIFÁSICA “BC”	68
FIGURA 3.18 RED DE SECUENCIA FALLA BIFÁSICA “BC”	69
FIGURA 3.19 FALLA MONOFÁSICA “A”	70

FIGURA 3.20 RED DE SECUENCIA FALLA MONOFÁSICA “A”	71
FIGURA 3.21 L/T ATERRIZADA EN LOS EXTREMOS. TC’S TIPO PEDESTAL	79
FIGURA 3.22 L/T ATERRIZADA EN LOS EXTREMOS. TC’S TIPO BUSHING	80
FIGURA 3.23 DIAGRAMA DE SECUENCIAS: FALLA MONOFÁSICA EN C1 Y C2 ATERRIZADA	81
FIGURA 3.24 L/T ATERRIZADA MEDIANTE TIERRAS LOCALES	82
FIGURA 3.25 ATERRIZAMIENTO DEL CIRCUITO 2 DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV	83

CAPÍTULO IV

FIGURA 4.1 MODELO DE 2 BAHÍAS DEL RELÉ DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA	88
FIGURA 4.2 DIAGRAMA UNIFILAR DEL SEP A MODELARSE	89
FIGURA 4.3 REPRESENTACIÓN DEL GENERADOR EQUIVALENTE EN ATP	91
FIGURA 4.4 MODELO DE L/T DE ATP	92
FIGURA 4.5 MODELO DE LA L/T EN ATP	92
FIGURA 4.6 PARÁMETROS DE LA L/T INGRESADOS EN ATP	92
FIGURA 4.7 GEOMETRÍA DE LA L/T EN ATP	93
FIGURA 4.8 IMPEDANCIAS DE LA L/T CALCULADAS POR ATP	93
FIGURA 4.9 MODELO “TRANSFORMADOR HÍBRIDO” (XFMR) DE ATP	94
FIGURA 4.10 DATOS DE LOS AUTOTRANSFORMADORES ATQ Y ATR	95
FIGURA 4.11 DATOS DEL TRANSFORMADOR TRK	96
FIGURA 4.12 MODELO DE IMPEDANCIA FIJA TRIFÁSICA EN ATP	97
FIGURA 4.13 SATURABLE 1 PHASE	98
FIGURA 4.14 MÓDULO 4AM5120 -1DA/-2DA	99
FIGURA 4.15 TRANSFORMADOR DE INTERPOSICIÓN 4AM5120 – 1DA00 – 0AN2 PARA CORRIENTES SECUNDARIAS DE 1A	100
FIGURA 4.16 TRANSFORMADOR DE INTERPOSICIÓN 4AM5120 – 2DA00 – 0AN2 PARA CORRIENTES SECUNDARIAS DE 5A	100
FIGURA 4.17 CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES DE INTERPOSICIÓN PARA LA S/E MACHALA 138 kV	102
FIGURA 4.18 MÓDULO 4AM5120 – 2DA00 EN ATP	102
FIGURA 4.19 MÓDULO DE RESTRICCIÓN (7TM70) ^[8]	104
FIGURA 4.20 MÓDULO DE RESTRICCIÓN EN ATP	104
FIGURA 4.21 MODELO DE ATP “SWIT_3XT”	105
FIGURA 4.22 MODELO DE ATP “SPLITER”	105
FIGURA 4.23 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL 7SS601 ^[9]	106
FIGURA 4.24 DIAGRAMA LÓGICO DEL RELÉ 7SS601	108
FIGURA 4.25 DIAGRAMA DE FLUJO DE APDB – 87B (2.0)	109
FIGURA 4.26 ANÁLISIS DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA (APDB – 87B (2.0))	110
FIGURA 4.27 PARÁMETROS 10kFAC Y 10Id> DE LA S/E MACHALA 138 kV INGRESADOS EN APDB – 87B (2.0)	114
FIGURA 4.28 CORRIENTES DIFERENCIAL Y DE RESTRICCIÓN DE LA FASE A POR EL ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO 2 EN 0.2 s	116
FIGURA 4.29 CORRIENTES DIFERENCIAL Y DE RESTRICCIÓN DE LA FASE B POR EL ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO 2 EN 0.2 s	116
FIGURA 4.30 CORRIENTES DIFERENCIAL Y DE RESTRICCIÓN DE LA FASE C POR EL ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO 2 EN 0.2 s	117

FIGURA 4.31 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL RELÉ DIFERENCIAL – FASE A – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T	118
FIGURA 4.32 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL RELÉ DIFERENCIAL – FASE B – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T	119
FIGURA 4.33 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL RELÉ DIFERENCIAL – FASE C – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T	119
FIGURA 4.34 CORRIENTES DIFERENCIAL Y DE RESTRICCIÓN DE LA FASE A POR EL ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO 2 – FALLA EXTERNA.....	120
FIGURA 4.35 CORRIENTES DIFERENCIAL Y DE RESTRICCIÓN DE LA FASE B POR EL ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO 2 – FALLA EXTERNA.....	121
FIGURA 4.36 CORRIENTES DIFERENCIAL Y DE RESTRICCIÓN DE LA FASE C POR EL ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO 2 – FALLA EXTERNA.....	121
FIGURA 4.37 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL RELÉ DIFERENCIAL – FASE A – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T – FALLA EXTERNA	123
FIGURA 4.38 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL RELÉ DIFERENCIAL – FASE B – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T – FALLA EXTERNA	123
FIGURA 4.39 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN DEL RELÉ DIFERENCIAL – FASE C – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T – FALLA EXTERNA	124

LISTA DE TABLAS

CAPITULO III

TABLA 3.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA L/T	33
TABLA 3.2 GEOMETRÍA DE LA L/T – CIRCUITO SIMPLE.....	33
TABLA 3.3 GEOMETRÍA DE LA L/T – DOBLE CIRCUITO.....	34
TABLA 3.4 MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z_{ABC} Y Z_{012} TRANSPUESTA – CIRCUITO SIMPLE.....	35
TABLA 3.5 MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z_{ABC} Y Z_{012} SIN TRANSPOSICIÓN – CIRCUITO SIMPLE.....	35
TABLA 3.6 MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z_{ABC} Y Z_{012} TRANSPUESTA – DOBLE CIRCUITO.....	35
TABLA 3.7 MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z_{ABC} Y Z_{012} SIN TRANSPOSICIÓN – DOBLE CIRCUITO.....	36
TABLA 3.8 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA.....	36
TABLA 3.9 GEOMETRÍA DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA	37
TABLA 3.10 MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z_{ABC} Y Z_{012} DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA TRANSPUESTA.....	38
TABLA 3.11 MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z_{ABC} Y Z_{012} DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA SIN TRANSPOSICIÓN	38
TABLA 3.12 MATRIZ DE ADMITANCIAS Y_{ABC} Y Y_{012} DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA SIN TRANSPOSICIÓN	43
TABLA 3.13 MATRIZ DE ADMITANCIAS Y_{ABC} Y Y_{012} DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA TRANSPUESTA	44
TABLA 3.14 CARGA QUE ABASTECE LA S/E MACHALA	51
TABLA 3.15 CORRIENTES INDUCIDAS EN LA L/T SAN IDELFONSO 2.....	66
TABLA 3.16 VOLTAJES INDUCIDOS EN LA L/T SAN IDELFONSO 2, ABIERTA EN EL EXTREMO DE LA S/E SAN IDELFONSO 138 kV O EN EL EXTREMO DE LA S/E MACHALA 138 kV	66
TABLA 3.17 VOLTAJES INDUCIDAS EN LA L/T SAN IDELFONSO 2 – EXTREMO S/E SAN IDELFONSO 138 kV	67
TABLA 3.18 VOLTAJES INDUCIDAS EN LA L/T SAN IDELFONSO 2 – EXTREMO S/E MACHALA 138 kV	67
TABLA 3.18 ERRORES POR EL CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS	76

CAPITULO IV

TABLA 4.1 PARÁMETROS PARA EL GENERADOR EQUIVALENTE	91
TABLA 4.2 DATOS DE PLACA DE LOS AUTOTRANSFORMADORES ATQ Y ATR	94
TABLA 4.3 DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR TRK.....	95
TABLA 4.4 IMPEDANCIAS PARA LA SIMULACIÓN DE CARGA EN ATP.....	97
TABLA 4.5 RELACIÓN DE ESPIRAS DEL MÓDULO 4AM5120 – 1AD.....	99
TABLA 4.6 RELACIÓN DE ESPIRAS DEL MÓDULO 4AM5120 – 2AD.....	100
TABLA 4.7 RELACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE INTERPOSICIÓN PARA LA S/E MACHALA 138 kV	101
TABLA 4.8 RELACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE INTERPOSICIÓN PARA EL MODELO EN ATP	103
TABLA 4.9 CONFIGURACIÓN RECOMENDADA PARA 10KFAC (1506) – PROTECCIÓN ZONA SELECTIVA ^[9]	107
TABLA 4.10 CONFIGURACIÓN RECOMENDADA PARA 10KFAC (1506) – ZONA DE VERIFICACIÓN ^[9]	107
TABLA 4.11 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETRO 10ID> Y 10KFAC ^[9]	107
TABLA 4.12 PARÁMETROS 10ID> Y 10KFAC DEL 87B DE LA S/E MACHALA 138 kV.....	114
TABLA 4.13 VALOR MÁXIMO DE LAS CORRIENTES DIFERENCIAL Y RESTRICCIÓN QUE REGISTRA EL MÓDULO 7SS601 – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138kV	117
TABLA 4.14 VALOR MÁXIMO DE LAS CORRIENTES DIFERENCIAL Y RESTRICCIÓN QUE REGISTRA EL MÓDULO 7SS601 – ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV – FALLA EXTERNA.....	122

**EFFECTO DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE CIRCUITOS
PARALELOS EN LA OPERACIÓN DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS.
APLICACIÓN A LA BARRA DE 138 kV DE LA S/E MACHALA**

Edwin Wladimir Quisilema Carrera

Bajo la supervisión del Ing. Antonio Fonseca MSc. y del Ing. Luis Tapia MSc.

RESUMEN

El presente proyecto presenta un análisis de la afectación que producen en los relés de protección los acoplamientos entre redes de secuencia de un mismo circuito y entre diferentes circuitos en líneas de transmisión paralelas.

En este contexto se presenta un estudio detallado de las inducciones electromagnéticas y electrostáticas existentes entre circuitos paralelos.

En base al estudio que se realiza para determinar los acoplamientos y la inducción de voltajes y corrientes entre los circuitos de una línea de transmisión paralela, se procede al análisis de la afectación a las protecciones eléctricas, específicamente a la protección de distancia (21)¹ y a la diferencial de barra (87B)².

Para esto se utiliza dos software de simulación, Alternative Transients Program (ATP) y DIgSILENT Power Factory, con la finalidad de realizar las simulaciones de los diferentes eventos en los dos programas, e ir comparando los resultados obtenidos.

¹ Nomenclatura ANSI de la protección de distancia

² Nomenclatura ANSI de la protección diferencial de barra

Para la protección de distancia se realiza el análisis de la afectación que producen los acoplamientos existentes en una L/T³ típica de 138 kV.

Los acoplamientos de la L/T modifican la impedancia medida por el relé al momento de una falla. Con la ayuda de DlgSILENT Power Factory se determina los diferentes acoplamientos de la L/T.

Con respecto a la protección diferencial de barra, el análisis se aplica específicamente a la Subestación Machala 138 kV.

Mediante los software ATP y DlgSILENT Power Factory se realiza la modelación del patio de 138 kV de la S/E⁴ Machala, con el objetivo de simular el aterrizamiento de uno de los dos circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV.

Al aterrizar uno de los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV, el circuito energizado genera una corriente inducida en el circuito que se encuentra aterrizado. La corriente inducida se encierra en una malla a tierra con el circuito aterrizado, afectando directamente en la operación de la protección diferencial de barra de baja impedancia de la S/E Machala.

Para el análisis de la operación del 87B de Machala 138 kV ante al aterrizamiento de la L/T mencionada, se desarrolla un algoritmo digital llamado Análisis de la Protección Diferencial de Barra (APDB – 87B (2.0)) en MATLAB.

Partiendo de la modelación de la S/E Machala en ATP y mediante el software TOP (The Output Procesor) se obtienen los archivos COMTRADE⁵. APDB – 87B (2.0) procesa este tipo de archivos definiendo si la protección 87B opera o no ante el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV.

³ Línea de Transmisión Eléctrica

⁴ Subestación eléctrica

⁵ Formato común estándar para el intercambio de datos transitorios (COMTRADE) para sistemas de potencia (IEEE Std C37.111 – 1999)

PRESENTACIÓN

El presente proyecto ha sido dividido en 5 capítulos, los cuales se detallan inmediatamente.

El capítulo 1 corresponde a la introducción, en este constan los antecedentes, los objetivos, el alcance y la justificación del proyecto.

El capítulo 2 es el marco teórico, en este se presenta la información necesaria para la comprensión de los relés de distancia y los diferenciales de barra.

En el capítulo 3 se realiza el análisis de la afectación que se produce en los relés de distancia por parte del acoplamiento mutuo existente en L/T paralelas.

Por otra parte en este mismo capítulo se realiza el estudio necesario para la determinación de los voltajes y corrientes inducidos electrostática y electromagnéticamente entre los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV. El análisis de la inducción se lo desarrolla para distintos escenarios, poniendo más énfasis al aterrizamiento de uno de los circuitos de la L/T.

En el capítulo 4 se modela la protección diferencial de barra de baja impedancia de la S/E Machala 138 kV en ATP y DIgSILENT Power Factory, además se realiza la implementación de un algoritmo digital llamado Análisis de la Protección Diferencial de Barra (APDB – 87B (2.0)) en MATLAB.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Para finalizar se presenta las referencias consultadas y los anexos.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia en condiciones normales es controlada por la acción y comando del hombre mediante la ayuda de aparatos automáticos que cumplen consignas bien determinadas.

Por otra parte cuando en el SEP⁶ existen perturbaciones por causas atmosféricas o por maniobras mal realizadas, el comando del sistema es ahora controlado por las protecciones, estas deben operar en fracciones de segundo y en forma coordinada.

El objetivo principal de las protecciones eléctricas es resguardar los equipos más valiosos. Los relés juegan un papel importante en el desempeño de esta tarea. Un relé detecta condiciones de fallo dentro de un área asignada, el cual al detectar una perturbación abre o cierra contactos, provocando así el funcionamiento de otros dispositivos bajo su control.

Para una correcta coordinación y parametrización de las protecciones existen programas computacionales capaces de simular las perturbaciones que se presentan en el SEP.

Con la ayuda de programas propios para análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, se analiza que afectación presenta en las protecciones de distancia los acoplamientos existentes entre redes de secuencia y entre diferentes circuitos de una L/T paralela.

⁶ Sistema Eléctrico de Potencia

Además mediante estos programas se puede analizar también maniobras en el SEP, como por ejemplo el aterrizamiento de una L/T, para el posterior análisis de cómo afecta esta maniobra en la protección diferencial de barra debido a las inducciones magnéticas y electrostáticas presentes en L/T paralelas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Análisis de la afectación de la inducción de circuitos paralelos en las protecciones eléctricas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentación y análisis de las expresiones de lazos de impedancia y su afectación debido a la inducción magnética existente en circuitos paralelos en las protecciones de distancia de líneas de transmisión (21).
- Análisis de la afectación del acoplamiento existente entre líneas de transmisión de doble circuito al esquema de protección diferencial de barras de baja impedancia (87B).
- Análisis, modelación y parametrización de la protección diferencial de baja impedancia en la barra de 138kV de la Subestación Machala 230/138/69 kV, para el caso del aterrizamiento de una línea de transmisión de doble circuito, considerando sus efectos de acoplamiento, mediante simulaciones.

1.3 ALCANCE

Se encontrará el efecto que produce el acoplamiento mutuo de líneas de transmisión de doble circuito en un SEP, mediante la simulación de un modelo eléctrico en varios escenarios, con la ayuda de dos software de simulación, DlgSILENT Power Factory y Alternative Transients Program (ATP) respectivamente, para posteriormente comparar los resultados obtenidos en ambos programas.

Se determinará el porcentaje de error que presentan los relés de distancia debido al cambio de sus expresiones de lazos de impedancia producidas por la inducción mutua existente en circuitos paralelos, esto se realizará mediante simulaciones en DlgSILENT Power Factory.

Se establecerá la parametrización de la protección diferencial 87B, para la barra de 138 KV de la Subestación Machala 230/138/69 KV, para el caso del aterrizamiento de circuitos paralelos, con la ayuda del software Alternative Transients Program (ATP), en el cual se realizará la modelación y simulación de los modelos eléctricos necesarios.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El efecto de acoplamiento que existe en líneas de transmisión de doble circuito, modifica las expresiones de los lazos de impedancia en los relés de distancia, por lo que la no consideración de este efecto cambia el alcance de la zona de protección de dichos relés.

Por lo tanto es necesario establecer y documentar los máximos errores que se producen por esta condición, lo cual ayudará a determinar un criterio de ajuste que permita un adecuado desempeño de las protecciones.

Por otra parte, al realizar el aterrizamiento de una línea de transmisión, el efecto de acoplamiento mutuo existente en circuitos paralelos y en función de la disposición de los transformadores de corriente es posible generar corrientes inducidas, las cuales pueden producir la operación innecesaria de la protección diferencial de barra 87B.

Por esta razón es necesario realizar un estudio adecuado para definir la calibración de la protección diferencial de barra de baja impedancia.

CAPITULO II

2 MARCO TEÓRICO

Las protecciones eléctricas tienen la finalidad de garantizar el funcionamiento óptimo del SEP ante las distintas perturbaciones que se pueden presentar. Para cumplir esto el sistema de protecciones debe cumplir requerimientos de confiabilidad:

- Cubrir la totalidad del SEP (zonas de protección y solapamiento).
- Cumplir requerimiento de $N - 1^7$ en los equipos de protección:
 - Protección primaria o principal: primera línea de defensa ante fallas
 - Protección Secundaria o respaldo: funciones de protección que pueden ser diferentes, con tiempos de actuación en algunos casos superiores, considerando inclusive diferentes puntos de medición y/u operación de interruptores diferentes.
 - Protección redundante: equipos de protección idénticos con diferentes puntos de medición que trabajan de manera independiente uno del otro, (esquema utilizado en los diseños de protección de L/T del SNT ecuatoriano).
- Cumplir niveles adecuados de:
 - Dependabilidad: grado de certeza que el sistema de protecciones operará correctamente ante fallas en su zona de protección.
 - Seguridad: grado de certeza que el sistema de protecciones no operara ante fallas fuera de su zona de protección.

⁷ Disposición de la mayor cantidad de equipos en servicio del sistema en caso de una falla

- Sensitividad: se relaciona con los mínimos valores de entrada que produce la operación de un relé (pick – up).
- Selectividad: capacidad para diferenciar para qué condiciones se requiere la operación de un relé, y aquellas para las que no debe operar u operar de manera temporizada.
- Velocidad: tiempo requerido para emitir la orden de disparo.

2.1 PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN – RELÉS DE DISTANCIA

Las protecciones de distancia satisfacen los requerimientos de confiabilidad y velocidad necesarios para proteger los circuitos, y por tal razón son extensamente utilizadas en redes de sistemas de potencia.

La principal ventaja de utilizar un relé de distancia es que su zona de protección depende de la impedancia de la línea protegida, la cual es en teoría independiente de las magnitudes de voltaje y corriente, razón por la cual no dependerá del cambio de configuración del SEP, manteniendo siempre un alcance fijo.

Un relé de distancia calcula la impedancia como el cociente entre la tensión y corriente, en su ubicación en el sistema de potencia, con lo cual se determina si existe una falla dentro o fuera de su zona de protección. Dado que la impedancia de una L/T es proporcional a su longitud, es apropiado utilizar relés de distancia para medir la impedancia de la misma desde el lugar en el que se encuentra instalado el relé hasta el punto en donde ocurre la falla. De allí que a los relés de distancia también se los llama relés de impedancia.

Como se observa en la figura 2.1, el relé de distancia está conectado a la L/T a través de los transformadores de medida. Si una falla ocurre a una distancia nZ_L [Ω] desde el relé, dado que la tensión en el lugar de la falla es:

$$V_F = 0 \text{ [V]}$$

La tensión en el relé es:

$$V_R = I_R n Z_L$$

Entonces la impedancia que mide el relé es:

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{I_R n Z_L}{I_R} = n Z_L$$

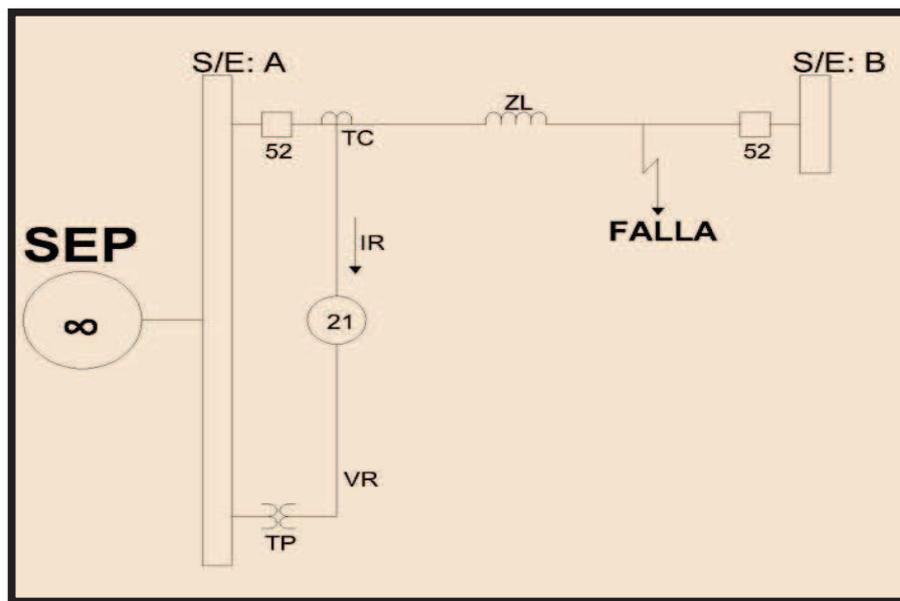


FIGURA 2.1 Conexión de un relé de distancia

La figura 2.2 (a), muestra la representación de la L/T protegida por un relé de distancia a instalar en S/E: A, la figura 2.2 (b), indica la representación de la L/T en el plano de impedancias.

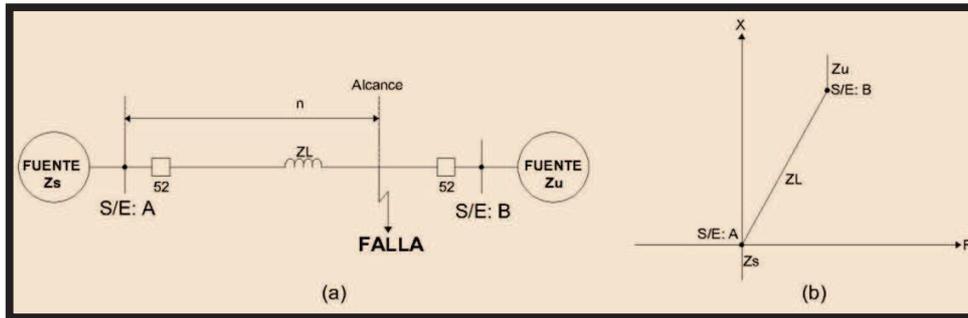


FIGURA 2.2 (a) Zona de protección de un relé de distancia instalado en S/E: A (b) Representación de la L/T en el plano R – X

2.1.1 LAZOS DE IMPEDANCIA ^[1]

Un lazo de impedancia es la relación entre el voltaje y la corriente de falla, mediante la cual el relé determinará la impedancia existente desde su ubicación en el SEP hasta el punto en el que ocurre la falla.

2.1.1.1 Unidades de Fase

Para el caso de fallas entre dos fases, los relés de distancia determinan la impedancia Z_R , mediante la relación entre el voltaje de línea y la corriente de línea:

$$Z_R = \frac{V_{LL}}{I_{LL}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

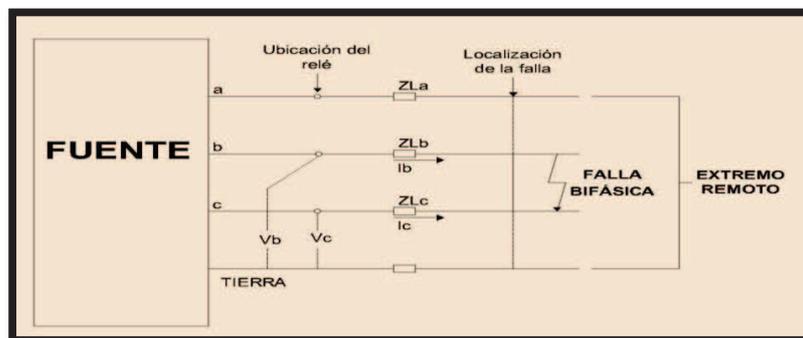


FIGURA 2.3 Cálculo del lazo fase – fase

Partiendo de la figura 2.3, para el caso de una falla bifásica entre las fases “bc” se tiene:

$$Z_R = \frac{V_{bc}}{I_{bc}}$$

De donde:

$$V_{bc} = I_b Z_{Lb} - I_c Z_{Lc}$$

$$I_b = -I_c$$

$$Z_{Lb} = Z_{Lc} = Z_1$$

Por lo tanto:

$$V_{bc} = Z_1(I_b - I_c)$$

$$V_{bc} = Z_1(I_{bc})$$

$$Z_R = \frac{V_{bc}}{I_{bc}} = Z_1$$

En base a la ecuación 2.1, se establecen los tres diferentes lazos de medición para una falla bifásica, considerando las tres fases existentes:

$$Z_{R-ab} = \frac{V_{ab}}{I_{ab}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$Z_{R-bc} = \frac{V_{bc}}{I_{bc}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$Z_{R-ac} = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

2.1.1.2 Unidades de Tierra

Para el caso de fallas fase – tierra, la impedancia Z_R se determina mediante la relación entre el voltaje y la corriente de fase, corregida generalmente mediante el factor de compensación k_0 , el cual considera el efecto del camino de retorno por tierra de la corriente de falla I_f .

2.1.1.2.1 Falla monofásica sin carga

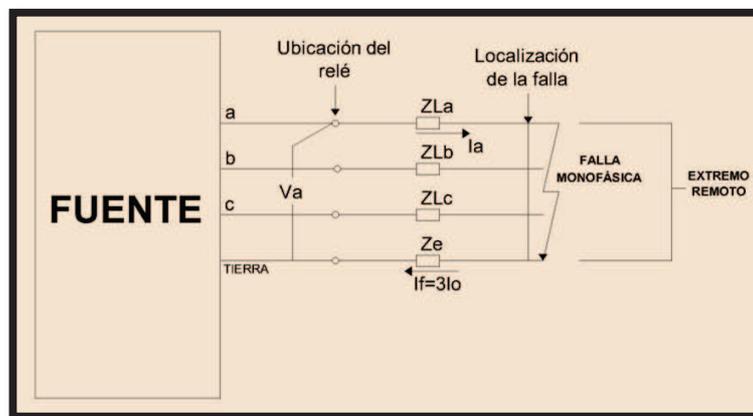


FIGURA 2.4 Cálculo del lazo fase – tierra – sin carga

Para una falla monofásica sin carga en la fase “a” (figura 2.4), se cumple:

$$V_a = v_{a1} + v_{a2} + v_{a0} = i_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

$$i_{a1} = i_{a2} = i_{a0}$$

$$Z_1 = Z_2$$

$$V_a = v_{a1} + v_{a2} + v_{a0} = i_{a0}(2Z_1 + Z_0)$$

$$I_a = I_f = 3i_{a0}$$

$$\frac{V_a}{I_a} = \frac{(2Z_1 + Z_0)}{3} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Se desea determinar Z_1 de una manera directa ya que esta es la impedancia desde el relé al punto de falla, por lo tanto realizando una manipulación al lado derecho de la ecuación 2.5, se tiene:

$$\frac{V_a}{I_a} = Z_1 \left(\frac{2}{3} + \frac{Z_0}{3Z_1} \right) = Z_1 \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{Z_0}{3Z_1} \right) = Z_1 \left(1 + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right)$$

En donde:

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$$

A esta constante se le denomina “Coeficiente de impedancia de tierra”.

Por lo tanto:

$$\frac{V_a}{I_a} = Z_1(1 + k_0)$$

Es decir en fallas monofásicas el voltaje medido por el relé se ve incrementado $I_a k_0$ veces. Por otra parte para que la impedancia de falla que detecta el relé se iguale a la impedancia de secuencia positiva Z_1 , se debe restar a la corriente de fase el valor $I_a k_0$:

$$Z_{R-a} = \frac{V_a}{I_a(1+k_0)} = Z_1 \quad \text{Ec. 2.6}$$

A partir de la ecuación 2.6 se presentan los tres lazos de impedancia para fallas monofásicas sin carga:

$$Z_{R-a} = \frac{V_a}{I_a(1+k_0)} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$Z_{R-b} = \frac{V_b}{I_b(1+k_0)} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$Z_{R-c} = \frac{V_c}{I_c(1+k_0)} \quad \text{Ec. 2.9}$$

2.1.1.2.2 Falla monofásica con carga

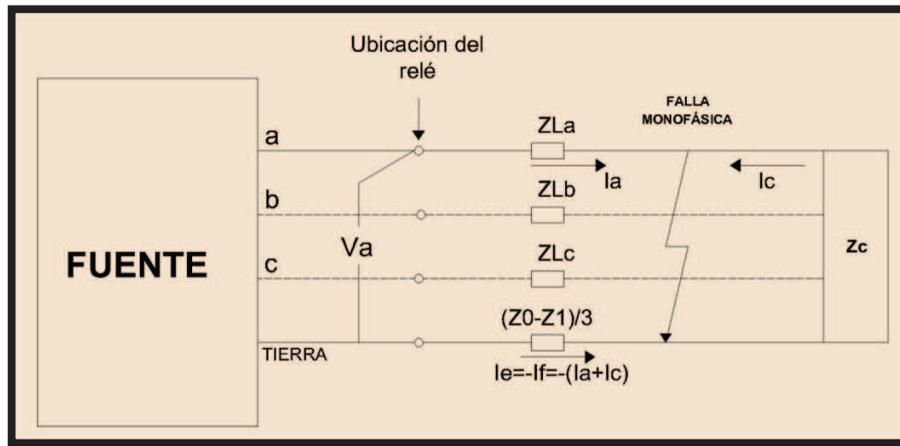


FIGURA 2.5 Cálculo del lazo fase – tierra – con carga

La ecuación 2.10 representa la medición de la impedancia que realiza el relé considerando la carga que la fase fallada puede aún abastecer:

$$Z_{R-a} = \frac{V_a}{I_a - I_f k_0} \quad \text{Ec. 2.10}^{[1]}$$

En base a la figura 2.5, se cumple lo siguiente:

$$V_a = I_a Z_1 - I_f \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3} \right)$$

$$V_a = Z_1 \left(I_a - I_f \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right) \right)$$

$$V_a = Z_1 (I_a - I_f k_0) \quad \text{Ec. 2.11}$$

Reemplazando la ecuación 2.11 en la ecuación 2.10 se tiene:

$$Z_R = \frac{Z_1(I_a - I_f k_0)}{I_a - I_f k_0}$$

$$Z_R = Z_1$$

En base a la ecuación 2.10 se presentan los tres lazos de impedancia existentes ante la presencia de una falla monofásica con carga:

$$Z_{R-a} = \frac{V_a}{I_a - I_f k_0} \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$Z_{R-b} = \frac{V_b}{I_b - I_f k_0} \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$Z_{R-c} = \frac{V_c}{I_c - I_f k_0} \quad \text{Ec. 2.14}$$

2.2 PROTECCIÓN DE BARRAS

Las barras de una S/E facilitan la interconexión de diferentes circuitos del mismo nivel de voltaje. Depende del esquema de barra que se utilice el grado de versatilidad, maniobrabilidad, mantenimiento, confiabilidad y continuidad de servicio de una S/E.

Al producirse una falla en la barra de una S/E, se presentan altas corrientes de cortocircuito, las cuales producen esfuerzos térmicos y mecánicos, que pueden ocasionar averías a los equipos conectados a la barra. Por esta razón, las barras deben protegerse, pues una falla no despejada puede ocasionar la destrucción total de los equipos y además puede darse una interrupción prolongada del suministro de energía eléctrica.

Para poder controlar una falla, es indispensable tener un sistema de protección con una alta velocidad de operación, para reducir el tiempo de apertura de los disyuntores y así evitar daños a los equipos conectados a la barra. El esquema diferencial cumple estos requerimientos.

Se considera que se produce una falla en barras cuando esta se produce en la zona delimitada por los transformadores de corriente de los diferentes circuitos que confluyen en las mismas (figura 2.6).

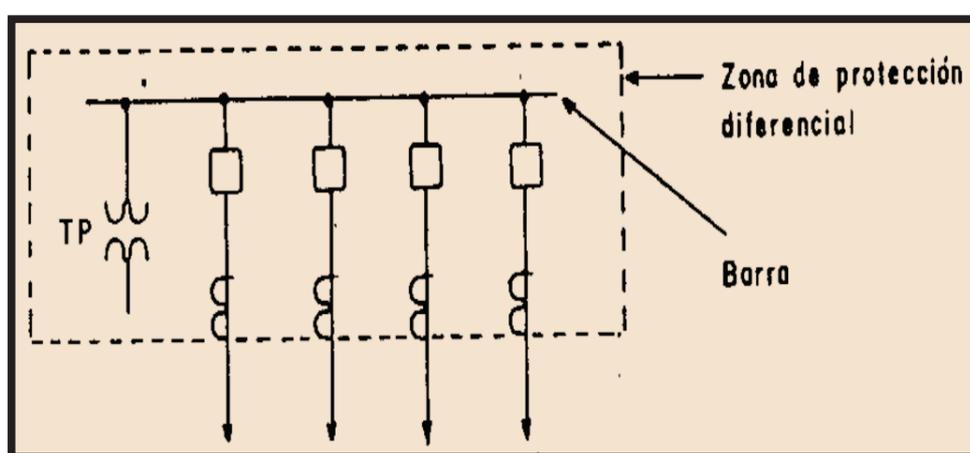


FIGURA 2.6 Zona de protección diferencial de barra ^[1]

2.2.1 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRAS ^[1]

Una variedad de métodos se ha usado para implementar los esquemas de protección diferencial de barras. La introducción de la tecnología digital ha permitido introducir considerables mejoras en las protecciones diferenciales de barras.

El crecimiento de las redes, especialmente en lo que a generación se refiere, está ocasionando que los transformadores de corriente estén cada vez más expuestos a la saturación por el incremento de los niveles de corriente de cortocircuito.

El principio básico de la protección diferencial es la ley de Kirchhoff, que establece que la suma de corrientes que ingresan a un nodo determinado es igual a la suma de corrientes que salen del mencionado nodo.

Consideremos dos condiciones para la barra simple, como se muestra en la figura 2.7.

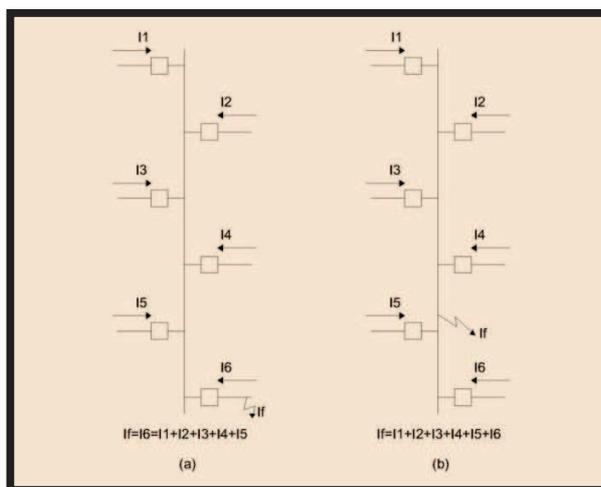


FIGURA 2.7 (a) Falla externa o flujo de carga (b) Falla interna

Una protección diferencial de barras ideal aprovecha el principio que la suma de las corrientes es cero tanto en el caso de fallas externas como en condiciones de flujos de potencia, mientras que la sumatoria de corrientes es igual a la corriente de falla total para fallas internas.

Desafortunadamente, en la práctica existen inconvenientes que no permiten conseguir una protección diferencial ideal, por lo que deben seguirse ciertos pasos para asegurar que la protección diferencial trabaje adecuadamente aún en condiciones no ideales.

Un sistema de protección diferencial básico se muestra en las figuras 2.8 y 2.9. Los transformadores de corriente (TC's) tienen la misma relación y están conectados con el mismo sentido de polaridad de ahí que las corrientes que circulan en el circuito ubicado entre los TC's sean cero ($I_d=0$) para las fallas externas y condiciones normales de flujos de potencia, mientras que circulará la corriente de falla total para fallas internas ($I_d=I_f$).

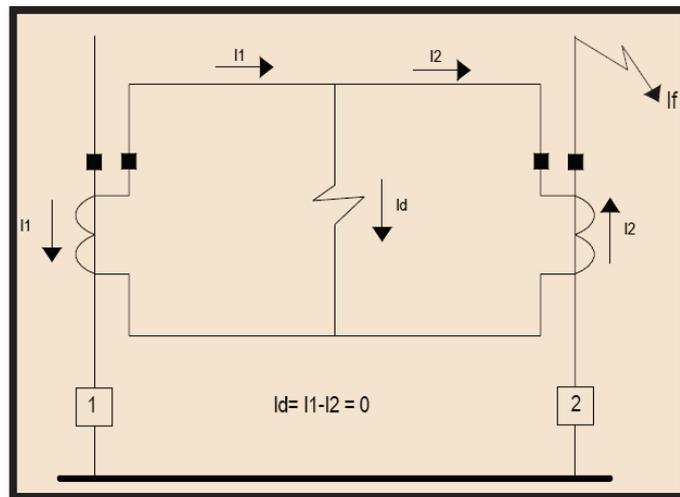


FIGURA 2.8 Protección diferencial ideal (falla externa)

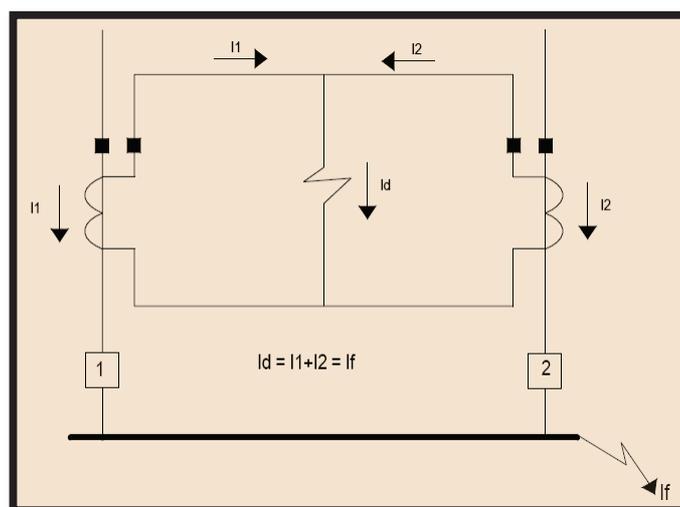


FIGURA 2.9 Protección diferencial ideal (falla interna)

En la protección diferencial de barras se usan varios esquemas:

- Protección diferencial mediante relé de sobrecorriente
- Protección diferencial de voltaje con “acopladores lineales”
- Protección diferencial porcentual
- Protección diferencial de baja impedancia
- Protección diferencial de alta impedancia

El alcance de este proyecto está dirigido principalmente a la protección diferencial de barra de baja impedancia, en la cual se analiza el efecto que produce en su operación la corriente que se induce en una L/T aterrizada por el efecto de acoplamiento mutuo existente en circuitos paralelos, como se detalla en los capítulos 3 y 4, razón por la cual los demás esquemas de protección solo se mencionan.

2.2.1.1 Protección diferencial de barra de baja impedancia

Para el esquema de protección diferencial de barra de baja impedancia, los errores de los TC's y los errores de medición son considerados.

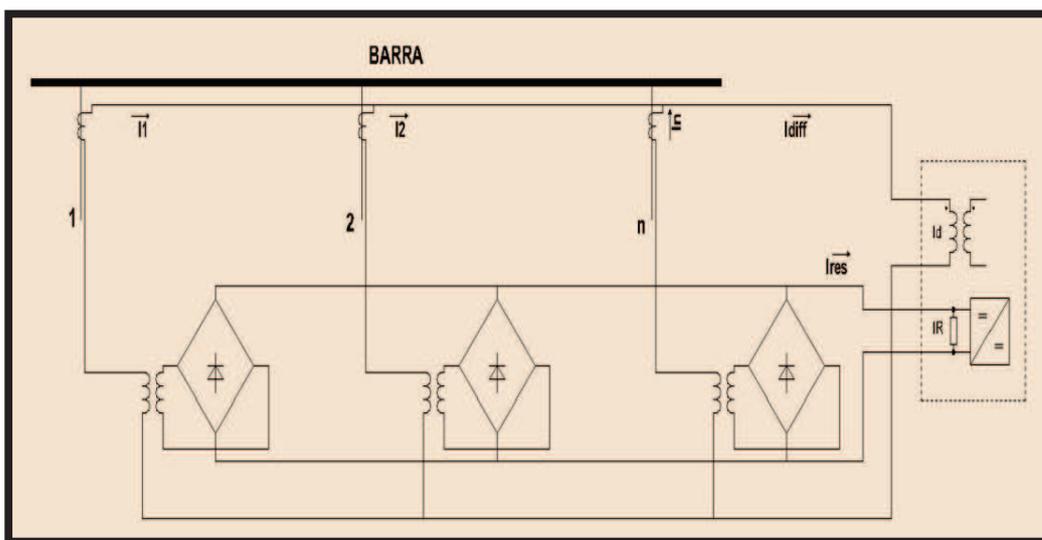


FIGURA 2.10 Protección diferencial de barra

El funcionamiento de un relé diferencial se basa en la obtención de las corrientes diferenciales y las corrientes de restricción como se indica en la figura 2.10.

La corriente de disparo I_{diff} o I_{Op} corresponde a la suma fasorial de las corrientes del alimentador de acuerdo a la ecuación 2.15.

La corriente de restricción I_{res} corresponde a la suma aritmética que es generada por la suma de las corrientes rectificadas de acuerdo a la ecuación 2.16.

$$I_{Op} = I_{diff} = |I_1 + I_2 + \dots + I_n| \quad \text{Ec. 2.15}$$

$$I_{res} = |I_1| + |I_2| + \dots + |I_n| \quad \text{Ec. 2.16}$$

En donde:

I_{Op} : Corriente diferencial

I_{res} : Corriente de restricción

I_1, I_2, I_n : Corrientes que circulan por los alimentadores

Partiendo de las ecuaciones 2.15 y 2.16 en la figura 2.11, se observa que la corriente diferencial tiene un valor cercano a cero debido al porcentaje de error que presentan los TC's, mientras que la corriente de restricción sube instantáneamente para falla externa, y para el caso de una falla interna la corriente diferencial y la de restricción suben al mismo tiempo.

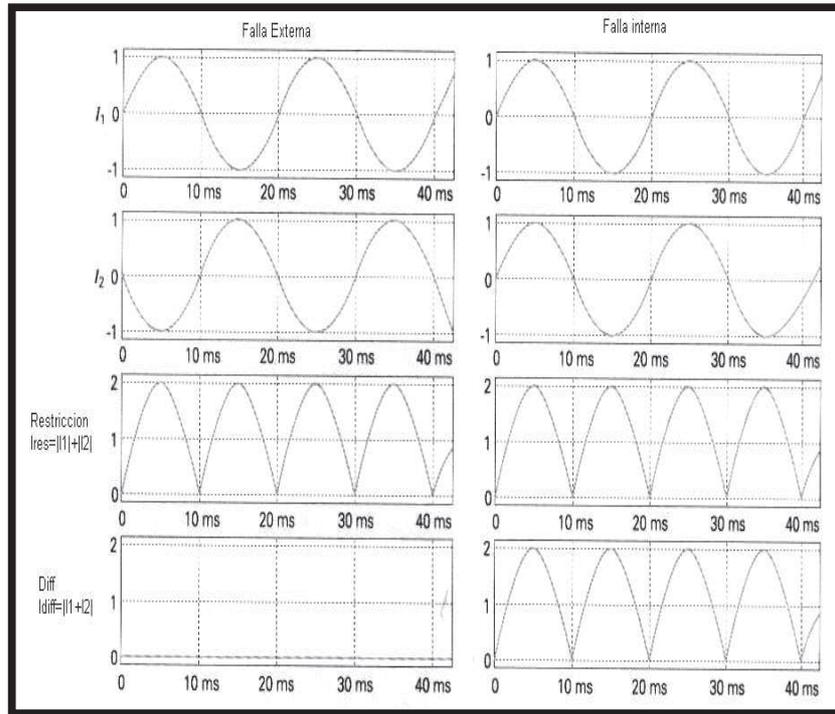


FIGURA 2.11 Formas de onda para fallas externa e interna respectivamente ^[8]

Para que la operación del relé se ejecute, los pares ordenados formados por la corriente diferencial y de restricción deben superar la característica de operación del relé la cual se muestra en la figura 2.12.

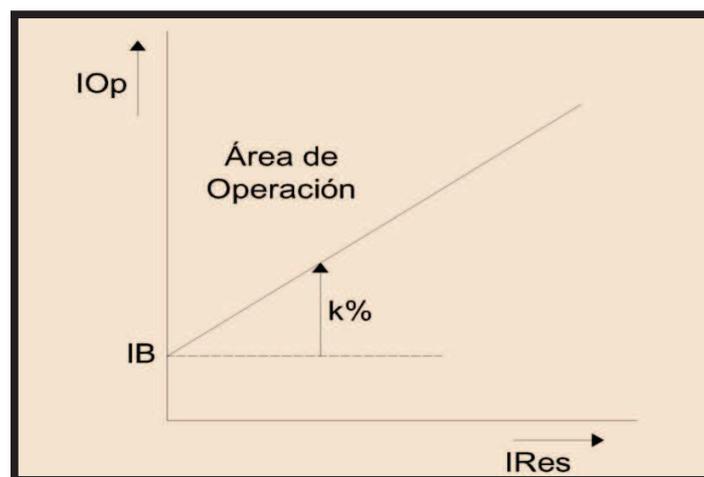


FIGURA 2.12 Característica de operación de la protección diferencial

2.2.1.2 Relés diferenciales de barra de baja impedancia existentes

2.2.1.2.1 Protección diferencial parcialmente numérica (7SS6XX)

Los sistemas de protecciones numéricas se caracterizan por cumplir funciones tales como:

- Auto monitoreo
- Grabado de oscilografías
- Indicación del valor medido

La figura 2.13, muestra la estructura de una protección diferencial parcialmente numérica, específicamente la 7SS601.

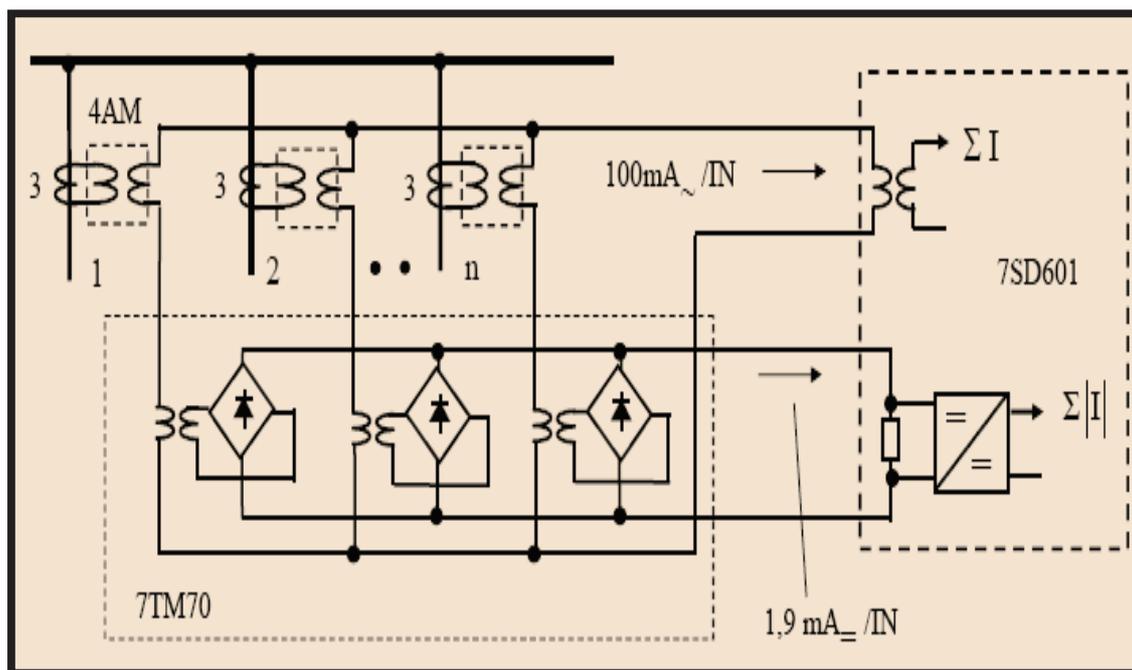


FIGURA 2.13 Protección numérica 7SS601 ^[1]

Los tres TC's son conectados a través de transformadores de interposición (módulo 4AM), para reducir el nivel de corriente; este flujo de corrientes se dirige hacia la entrada del relé para su medición, como una suma de fasores, formado la corriente de operación o corriente diferencial.

La corriente de estabilización o restricción es generada mediante el módulo de rectificación 7TM70, el cual alimenta al relé con la rectificación de onda completa de las corrientes que circulan por él. El valor de k depende del sobre dimensionamiento de los TC's. En general se establece un $k=0,6$.

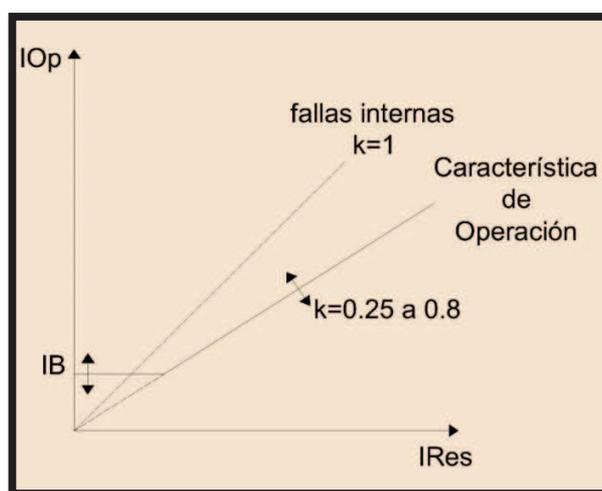


FIGURA 2.14 Característica de disparo de 7SS6XX

2.2.1.2.2 Protección de barra completamente numérica (7SS52)

Esta unidad consiste en una unidad central y una unidad descentralizada para las unidades de las bahías como se muestra en la figura 2.15.

La comunicación es a través de fibra óptica. Los valores medios y el estado de cambio del seccionador se obtiene en las unidades de bahía que son transformados por la unidad central y son procesados allí acorde al principio de la protección diferencial.

En la dirección opuesta, los comandos de disparo son transmitidos en serie a las unidades de bahía con la emisión del comando de disparo para el disyuntor en el nivel de bahía.

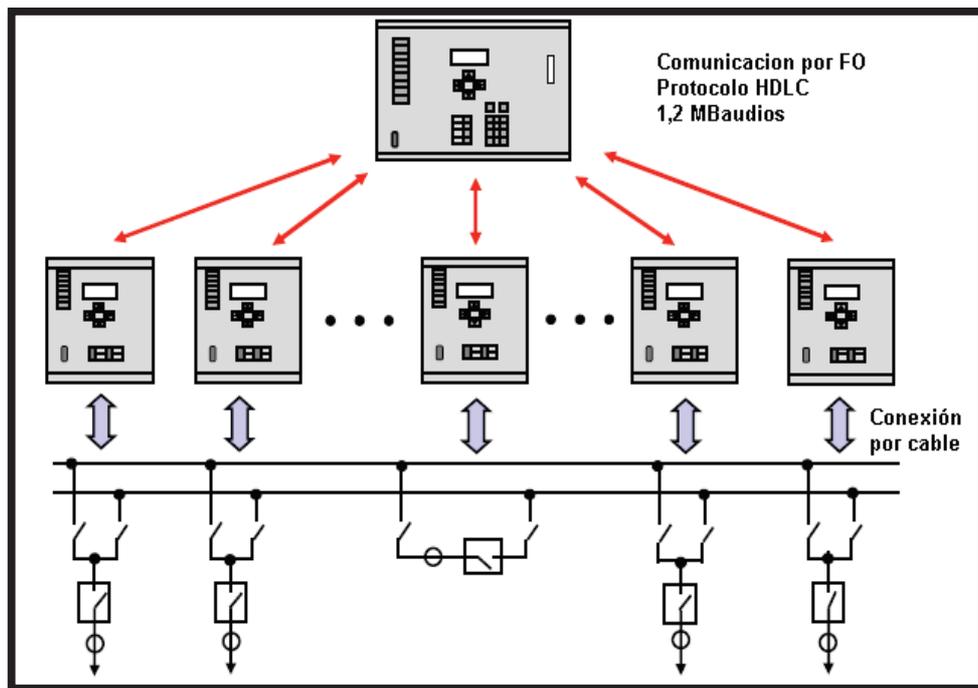


FIGURA 2.15 Estructura de una protección numérica de barra 7SS52 ^[1]

CAPÍTULO III

3 ANÁLISIS DEL EFECTO DE ACOPLAMIENTO DE CIRCUITOS PARALELOS EN LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS

Se analiza el efecto del acoplamiento inductivo y/o capacitivo en las protecciones eléctricas 21 y 87B.

Para la protección 21 se analiza el efecto que producen los acoplamientos existentes entre redes de secuencia y entre diferentes circuitos en los lazos de impedancia de una L/T típica de 138 kV.

Por otra parte para la protección 87B se analiza el efecto que produce el aterrizamiento de uno de los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV, en el relé diferencial de barra de la S/E Machala 138 kV, debido a la presencia de las inducciones electromagnéticas y electrostáticas.

3.1 MODELACIÓN DE UNA LINEA DE TRANSMISIÓN

3.1.1 INDUCTANCIAS ^[3]

3.1.1.1 Inductancias propias y mutuas

El cálculo de las inductancias generalmente es dividido en dos componentes:

$$L = L_i + L_e [H] \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde L_i y L_e son las autoinductancias del conductor debido a las concatenaciones de flujo interno y externo, respectivamente.

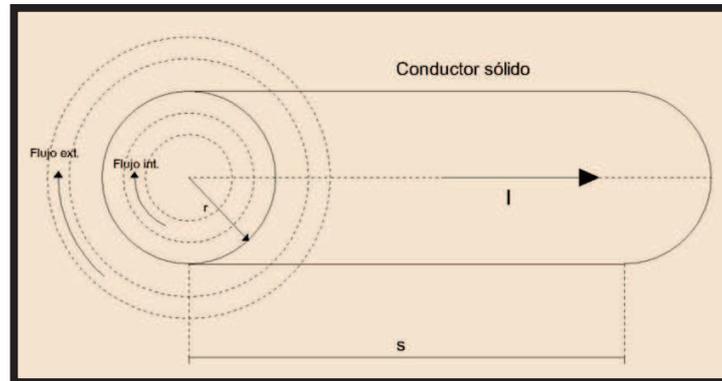


FIGURA 3.1 Flujo interno y externo de un conductor sólido

Considerando que $D_s = 0,779r$ (radio equivalente), donde r es el radio del conductor, se establece la ecuación básica de la inductancia propia por unidad de longitud de un conductor:

$$l = 2 * 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{2s}{D_s} \right) - 1 \right) \left[\frac{H}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.2}$$

Para los conductores compuestos el término D_s es conocido como el radio medio geométrico (RMG) del conductor.

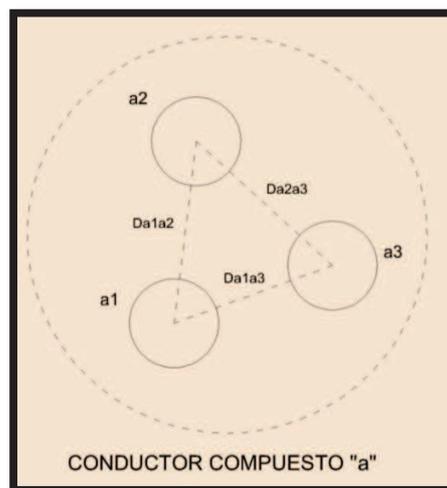


FIGURA 3.2 Conductor compuesto por tres hilos

De manera similar se establece la inductancia mutua por unidad de longitud entre conductores como:

$$l_m = 2 * 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{2s}{D_m} \right) - 1 \right) \left[\frac{H}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde D_m es la distancia media geométrica entre conductores. Como se observa, la inductancia por unidad de longitud de un conductor es función de la longitud total del conductor "s".

3.1.1.2 Efecto de retorno por tierra de una L/T

El modelo de retorno por tierra, desarrollado por Carson, considera un conductor aéreo "a" paralelo a tierra, el mismo que conduce la corriente I_a con un retorno a través de un conductor ficticio "d" debajo de la superficie de la tierra (figura 3.3). El conductor de retorno "d", se encuentra localizado a una distancia " D_{ad} " bajo la línea aérea.

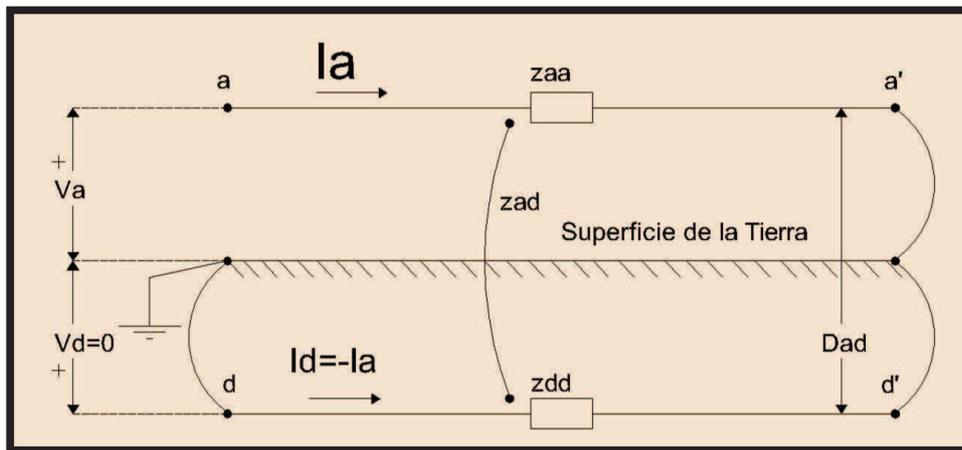


FIGURA 3.3 Modelo de retorno por tierra de Carson

A partir del circuito indicado en la figura 3.3, es posible establecer la ecuación de voltajes de la siguiente manera:

$$V_a = (Z_{aa} + Z_{dd} - 2Z_{ad})I_a = Z_{AA}I_a [V] \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde Z_{AA} representa la impedancia total del circuito, cuyas componentes son impedancias primitivas, las cuales a su vez, están definidas por las siguientes expresiones:

$$Z_{aa} = r_a + j\omega l_a \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{dd} = r_b + j\omega l_d \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{ad} = j\omega l_{ad} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

Dónde:

r_a = Resistencia del conductor de la línea.

r_d = Resistencia del supuesto conductor que representa el efecto de retorno por tierra.

ω = Frecuencia en rad/s.

L_a = Inductancia propia de la línea.

L_d = Inductancia propia del conductor que representa el efecto de retorno por tierra.

L_{ad} = Inductancia mutua entre conductores.

En base a las relaciones anteriores, sustituyendo las mismas en la ecuación 3.4, se tiene:

$$Z_{AA} = (r_a + r_d) + j\omega(l_a + l_d - 2l_{ad}) \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.5}$$

Aplicando las ecuaciones 3.2 y 3.3 en la ecuación 3.5, se obtiene:

$$l_a = 2 * 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{2s}{D_a} \right) - 1 \right) \left[\frac{H}{m} \right]$$

$$l_d = 2 * 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{2s}{D_b} \right) - 1 \right) \left[\frac{H}{m} \right]$$

$$l_{ad} = 2 * 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{2s}{D_{ab}} \right) - 1 \right) \left[\frac{H}{m} \right]$$

Si se suma estas relaciones se tiene:

$$l_a + l_d - 2l_{ad} = 2 * 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{D_{ab}^2}{D_a D_b} \right) \right) \left[\frac{H}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.6}$$

Reemplazado la ecuación 3.6 en la ecuación 3.5, la impedancia total del circuito Z_{AA} , queda de la siguiente manera:

$$Z_{AA} = (r_a + r_d) + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_{ad}^2}{D_a D_d} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.7}$$

Carson plantea que este fenómeno puede ser modelado por medio de un conductor de retorno con un RMG unitario, es decir $D_d=1$, e implícitamente establece la relación $D_e=D_{ad}^2/D_d$, con lo cual se puede escribir la ecuación 3.8.

$$Z_{AA} = (r_a + r_d) + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_a} \right) \left[\frac{H}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.8}$$

Carson encontró que la resistencia de la tierra r_d , es función de la frecuencia f y estableció la siguiente formula empírica:

$$r_d = \pi^2 * f * 10^{-7} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.9}$$

Adicionalmente, Carson establece que la distancia “ D_e ” es una función de la resistividad de la tierra ρ y de la frecuencia f , definida por la siguiente relación:

$$D_e = 658,68 \sqrt{\frac{\rho}{f}} [m] \quad \text{Ec. 3.10}$$

El valor de resistividad de tierra debe ser determinada mediante pruebas, si no existen datos, es práctica común utilizar un valor de $100 \Omega\text{-m}$ (valor de resistividad de tierra húmeda promedio).

3.1.1.3 Matriz de impedancias de fase Z_{ABC}

3.1.1.3.1 L/T con retorno por tierra

La definición de la matriz de impedancias de fase Z_{ABC} de una L/T trifásica se desarrolla utilizando los conceptos básicos de cálculo de las inductancias de un conductor integrado con la teoría de solución de circuitos eléctricos. En la figura 3.4, se indica una L/T trifásica con retorno por tierra.

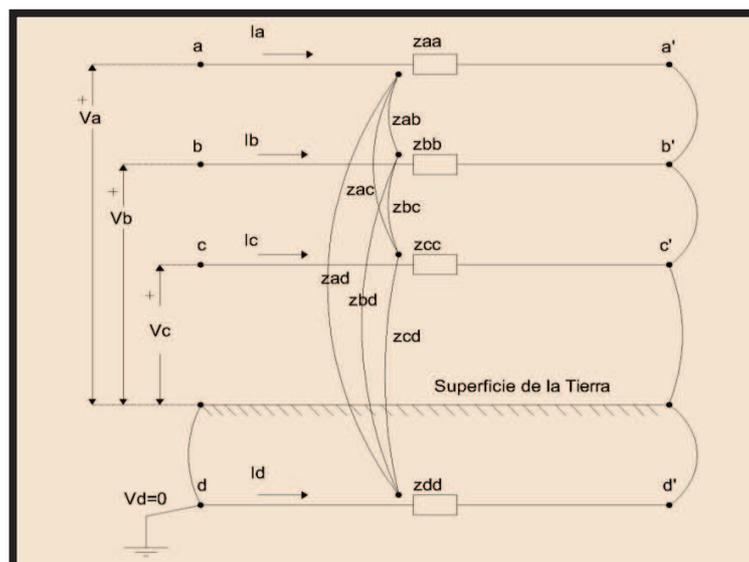


FIGURA 3.4 Modelo trifásico con retorno por tierra

Debido al efecto de retorno por tierra, en este circuito es posible establecer la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{AB} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{AC} & Z_{BC} & Z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Partiendo de la ecuación 3.4, se tienen los siguientes grupos de impedancias:

Impedancias propias:

$$\begin{aligned} Z_{AA} &= z_{aa} - 2z_{ad} + z_{dd} \\ Z_{BB} &= z_{bb} - 2z_{bd} + z_{dd} \\ Z_{CC} &= z_{cc} - 2z_{cd} + z_{dd} \end{aligned}$$

Impedancias mutuas:

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= z_{ab} - z_{ad} - z_{bd} + z_{dd} \\ Z_{BC} &= z_{bc} - z_{bd} - z_{cd} + z_{dd} \\ Z_{AC} &= z_{ac} - z_{ad} - z_{cd} + z_{dd} \end{aligned}$$

Que finalmente, en base a la ecuación 3.8, puede reducirse a:

$$Z_{AA} = (r_a + r_d) + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_a} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{BB} = (r_b + r_d) + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_b} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{CC} = (r_c + r_d) + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_c} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{AB} = r_d + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_{ab}} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{BC} = r_d + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_{bc}} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$Z_{AC} = r_d + j\omega 2 * 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{D_{ac}} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

Se observa que las impedancias mutuas presentan un componente resistivo (r_d), debido al camino de retorno.

De acuerdo a la ecuación 3.8, para n conductores y n cables de guarda se aplica las siguientes expresiones:

$$Z_{ii} = (r_i + r_d) + j\omega 2 * 10^{-7} \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right) \left[\frac{\Omega}{m}\right] \quad \text{Ec. 3.12}$$

$$Z_{ij} = r_d + j\omega 2 * 10^{-7} \ln\left(\frac{D_e}{D_{ij}}\right) \left[\frac{\Omega}{m}\right] \quad \text{Ec. 3.13}$$

3.1.1.3.2 L/T con retorno por tierra y cable de guarda

Los cables de guarda implican una matriz de impedancias de orden superior que de igual manera que para el caso de líneas sin cable de guarda, se pueden reducir a una matriz 3x3 que corresponde a la matriz de impedancias de fase Z_{ABC} . En la figura 3.5, se considera una L/T con dos conductores de guarda.

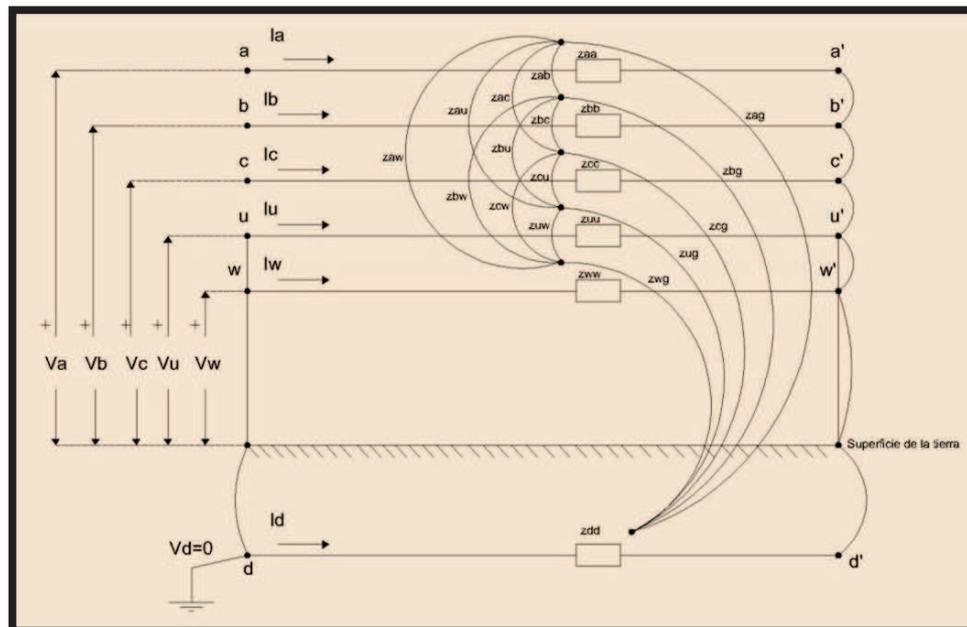


FIGURA 3.5 Modelo con dos conductores de guarda

En este circuito, como $V_u=V_w=0$, es posible establecer la siguiente ecuación matricial de voltajes:

$$\begin{bmatrix} V_{a,b,c} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z'_{ABC} & Z_{ABC,UW} \\ Z_{UW,ABC} & Z_{UW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a,b,c} \\ I_{u,w} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Aplicando la reducción de Kron, se obtiene la matriz de impedancias de fase Z_{ABC} :

$$Z_{ABC} = Z'_{ABC} - Z_{ABC,UW}(Z_{UW})^{-1}Z_{UW,ABC} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Con lo cual se establece la relación de voltajes y corrientes en una L/T:

$$V_{ABC} = Z_{ABC} * I_{ABC} \quad \text{Ec. 3.16}$$

3.1.1.4 Matriz de impedancias de secuencias Z_{012}

Para determinar la matriz de impedancias de secuencia Z_{012} , se aplica a la ecuación 3.16 la matriz de transformación de componentes de fase a componentes simétricas $T_{ABC-012} = A$, definida de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}; a = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad [3]$$

Los voltajes y las corrientes de fase pueden escribirse mediante la aplicación de la matriz A a los voltajes y corrientes de secuencia:

$$V_{ABC} = AV_{012} \quad I_{ABC} = AI_{012}$$

Reemplazando en la ecuación 3.16 y despejando V_{012} :

$$V_{012} = A^{-1} * Z_{ABC} * A * I_{012} = Z_{012} I_{012}$$

Donde se establece la matriz de impedancias de secuencia sobre la base de la matriz de impedancias de fase:

$$Z_{012} = A^{-1} * Z_{ABC} * A \quad \text{Ec. 3.17}$$

Este cálculo matricial puede realizarse mediante programas computacionales.

Se debe mencionar que esta matriz no es simétrica, y que dependiendo de la disposición geométrica de los conductores, se presentaran acoplamientos entre las redes de secuencia. Para el caso ideal, es decir, L/T totalmente traspuesta, los acoplamientos entre secuencias serán cero, definiendo de esta manera una matriz diagonal.

3.1.1.5 Determinación de las matrices Z_{ABC} , Z_{012} mediante DigSILENT Power Factory

3.1.1.5.1 L/T típica de 138 kV

Los datos necesarios para la modelación de una L/T a nivel de 138 kV en DigSILENT Power Factory se presentan en las tablas 3.1 (parámetros eléctricos de la L/T), 3.2 (geometría de la L/T de circuito simple) y 3.3 (geometría de la L/T de doble circuito).

PARÁMETRO	CONDUCTOR DE FASE (1113 ASCR Bluejay)	CONDUCTOR DE GUARDA (OPGW)
Resistencia DC [Ω/km]	0,0510	1,030
Diámetro externo [mm]	31,9786	12,4
Radio Equivalente RMG [mm]	12,6492	4,8285
Capacidad nominal [kA]	1,0810	1

TABLA 3.1 Parámetros eléctricos de la L/T

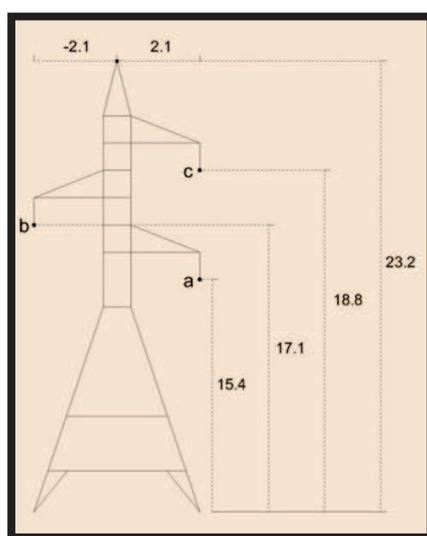


FIGURA 3.6 Estructura típica de una L/T 138 kV – circuito simple

GEOMETRÍA DE TORRE		
CONDUCTOR DE FASE		
CIRCUITO 1		
	x	y
	[m]	[m]
A	2,1	15,4
B	-2,1	17,1
C	2,1	18,8
CONDUCTOR DE GUARDA		
	x	y
	[m]	[m]
	0	23,2

TABLA 3.2 Geometría de la L/T – circuito simple

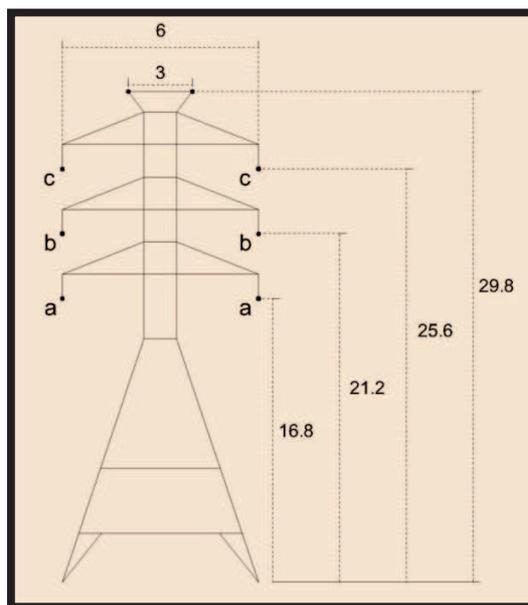


FIGURA 3.7 Estructura típica de una L/T 138 kV – doble circuito

GEOMETRÍA DE TORRE					
CONDUCTOR DE FASE					
CIRCUITO 1			CIRCUITO 2		
	x	y		X	y
	[m]	[m]		[m]	[m]
A	-3	16,8	A	3	16,8
B	-3	21,2	B	3	21,2
C	-3	25,6	C	3	25,6
CONDUCTOR DE GUARDA 1			CONDUCTOR DE GUARDA 2		
	x	y		X	y
	[m]	[m]		[m]	[m]
	-1,5	29,8		1,5	29,8

TABLA 3.3 Geometría de la L/T – doble circuito

Las tablas 3.4 y 3.5 muestran las matrices Z_{ABC} y Z_{012} de una L/T de circuito simple transpuesta y sin transposición respectivamente.

DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{abc} (R+jX) [ohm/km]						
	A		B		C	
A	0,164	0,756	0,111	0,320	0,111	0,320
B	0,111	0,320	0,164	0,756	0,111	0,320
C	0,111	0,320	0,111	0,320	0,164	0,756
DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{012} (R+jX) [ohm/km]						
	0		1		2	
0	0,385	1,397	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,053	0,436	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,436

TABLA 3.4 Matriz de impedancias Z_{ABC} y Z_{012} transpuesta – circuito simple

DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{abc} (R+jX) [ohm/km]						
	A		B		C	
A	0,158	0,763	0,107	0,317	0,111	0,335
B	0,107	0,317	0,163	0,757	0,114	0,310
C	0,111	0,335	0,114	0,310	0,171	0,748
DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{012} (R+jX) [ohm/km]						
	0		1		2	
0	0,385	1,397	-0,007	0,012	-0,002	0,006
1	-0,002	0,006	0,053	0,436	0,013	-0,007
2	-0,007	0,012	-0,013	-0,007	0,053	0,436

TABLA 3.5 Matriz de impedancias Z_{ABC} y Z_{012} sin transposición – circuito simple

Por otra parte, las tablas 3.6 y 3.7 muestran las matrices Z_{ABC} y Z_{012} de una L/T de doble circuito transpuesta y sin transposición respectivamente.

DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{abc} (R+jX) [ohm/km]							
	A - C1	B - C1	C - C1	A - C2	B - C2	C - C2	
A - C1	0,164	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	
	0,708	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	
B - C1	0,110	0,164	0,110	0,110	0,110	0,110	
	0,237	0,708	0,237	0,237	0,237	0,237	
C - C1	0,110	0,110	0,164	0,110	0,110	0,110	
	0,237	0,237	0,708	0,237	0,237	0,237	
A - C2	0,110	0,110	0,110	0,164	0,110	0,110	
	0,237	0,237	0,237	0,708	0,237	0,237	
B - C2	0,110	0,110	0,110	0,110	0,164	0,110	
	0,237	0,237	0,237	0,237	0,708	0,237	
C - C2	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,164	
	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	0,708	
DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{012} (R+jX) [ohm/km]							
	0 - C1	1 - C1	2 - C1	0 - C2	1 - C2	2 - C2	
0 - C1	0,383	0,000	0,000	0,330	0,000	0,000	
	1,183	0,000	0,000	0,712	0,000	0,000	
1 - C1	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	
	0,000	0,471	0,000	0,000	0,000	0,000	
2 - C1	0,000	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	
	0,000	0,000	0,471	0,000	0,000	0,000	
0 - C2	0,330	0,000	0,000	0,383	0,000	0,000	
	0,712	0,000	0,000	1,183	0,000	0,000	
1 - C2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,054	0,000	
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,471	0,000	
2 - C2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,054	
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,471	

TABLA 3.6 Matriz de impedancias Z_{ABC} y Z_{012} transpuesta – doble circuito

DlgSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{abc} (R+jX) [ohm/km]						
	A - C1	B - C1	C - C1	A - C2	B - C2	C - C2
A - C1	0,150 0,731	0,102 0,281	0,100 0,216	0,097 0,266	0,102 0,241	0,110 0,201
B - C1	0,102 0,281	0,161 0,712	0,117 0,257	0,102 0,241	0,108 0,248	0,117 0,218
C - C1	0,100 0,216	0,117 0,257	0,180 0,683	0,110 0,201	0,117 0,218	0,126 0,218
A - C2	0,097 0,266	0,102 0,241	0,110 0,201	0,150 0,731	0,102 0,281	0,100 0,216
B - C2	0,102 0,241	0,108 0,248	0,117 0,218	0,102 0,281	0,161 0,712	0,117 0,257
C - C2	0,110 0,201	0,117 0,218	0,126 0,218	0,100 0,216	0,117 0,257	0,180 0,683
DlgSI/info - Matriz reducida de impedancias Z_{012} (R+jX) [ohm/km]						
	0 - C1	1 - C1	2 - C1	0 - C2	1 - C2	2 - C2
0 - C1	0,383 1,211	0,017 0,016	-0,038 0,000	0,330 0,685	0,010 0,020	-0,030 0,005
1 - C1	-0,038 0,000	0,054 0,457	-0,029 0,018	-0,030 0,005	0,001 0,024	-0,014 0,010
2 - C1	0,017 0,016	0,029 0,016	0,054 0,457	0,010 0,020	0,015 0,008	0,001 0,024
0 - C2	0,330 0,685	0,010 0,020	-0,030 0,005	0,383 1,211	0,017 0,016	-0,038 0,000
1 - C2	-0,030 0,005	0,001 0,024	-0,014 0,010	-0,038 0,000	0,054 0,457	-0,029 0,018
2 - C2	0,010 0,020	0,015 0,008	0,001 0,024	0,017 0,016	0,029 0,016	0,054 0,457

TABLA 3.7 Matriz de impedancias Z_{ABC} y Z_{012} sin transposición – doble circuito

3.1.1.5.2 L/T San Idelfonso – Machala 138 kV

La modelación de la L/T San Idelfonso – Machala en DlgSILENT Power Factory se la realiza en base a los datos que se presentan en las tablas 3.8 y 3.9

PARÁMETRO	CONDUCTOR DE FASE	CONDUCTOR DE GUARDA (OPGW)
Resistencia DC [Ω /km]	0,1373	1,030
Diámetro externo [mm]	19,6088	12,4
Radio Equivalente RMG [mm]	7,6357	4,8285
Capacidad nominal [kA]	0,58	1
Tensión [kV]	138	138
# Subconductores	1	1

TABLA 3.8 Parámetros eléctricos de la L/T San Idelfonso – Machala

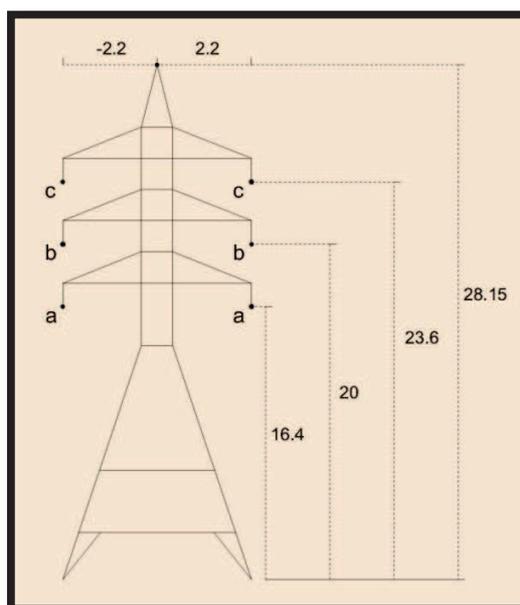


FIGURA 3.8 Estructura de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV

CONDUCTOR DE FASE					
CIRCUITO 1			CIRCUITO 2		
	x	y		x	y
	[m]	[m]		[m]	[m]
A	-2,2	16,4	A	2,2	16,4
B	-2,2	20	B	2,2	20
C	-2,2	23,6	C	2,2	23,6
CONDUCTOR DE GUARDIA					
x			y		
[m]			[m]		
0			28,15		

TABLA 3.9 Geometría de la L/T San Idelfonso – Machala

Como se indica en la tabla 3.9 esta L/T es de doble circuito. Las tablas 3.10 y 3.11 muestran las matrices Z_{ABC} y Z_{012} de la L/T San Idelfonso – Machala transpuesta y sin transposición respectivamente.

DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z _{abc} (R+jX) [ohm/km]						
	A - C1	B - C1	C - C1	A - C2	B - C2	C - C2
A - C1	0,243 0,801	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310
B - C1	0,105 0,310	0,243 0,801	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310
C - C1	0,105 0,310	0,105 0,310	0,243 0,801	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310
A - C2	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,243 0,801	0,105 0,310	0,105 0,310
B - C2	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,243 0,801	0,105 0,310
C - C2	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,105 0,310	0,243 0,801
DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z ₀₁₂ (R+jX) [ohm/km]						
	0 - C1	1 - C1	2 - C1	0 - C2	1 - C2	2 - C2
0 - C1	0,453 1,422	0,000 0,000	0,000 0,000	0,314 0,930	0,000 0,000	0,000 0,000
1 - C1	0,000 0,000	0,139 0,491	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000
2 - C1	0,000 0,000	0,000 0,000	0,139 0,491	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000
0 - C2	0,314 0,930	0,000 0,000	0,000 0,000	0,453 1,422	0,014 0,005	0,000 0,000
1 - C2	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,139 0,491	0,000 0,000
2 - C2	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,139 0,491

TABLA 3.10 Matriz de impedancias Z_{ABC} y Z₀₁₂ de la L/T San Idelfonso – Machala transpuesta

DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z _{abc} (R+jX) [ohm/km]						
	A - C1	B - C1	C - C1	A - C2	B - C2	C - C2
A - C1	0,234 0,812	0,099 0,344	0,105 0,285	0,095 0,333	0,099 0,310	0,105 0,273
B - C1	0,099 0,344	0,242 0,803	0,110 0,332	0,099 0,310	0,103 0,324	0,110 0,298
C - C1	0,105 0,285	0,110 0,332	0,255 0,789	0,105 0,273	0,110 0,298	0,117 0,309
A - C2	0,095 0,333	0,099 0,310	0,105 0,273	0,234 0,812	0,099 0,344	0,105 0,285
B - C2	0,099 0,310	0,103 0,324	0,110 0,298	0,099 0,344	0,242 0,803	0,110 0,332
C - C2	0,105 0,273	0,110 0,298	0,117 0,309	0,105 0,285	0,110 0,332	0,255 0,789
DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z ₀₁₂ (R+jX) [ohm/km]						
	0 - C1	1 - C1	2 - C1	0 - C2	1 - C2	2 - C2
0 - C1	0,452 1,442	0,014 0,005	-0,029 -0,006	0,314 0,909	0,007 0,009	-0,022 -0,002
1 - C1	-0,029 -0,006	0,139 0,481	-0,030 0,018	-0,022 -0,002	0,001 0,029	-0,017 0,010
2 - C1	0,014 0,005	0,030 0,017	0,139 0,481	0,007 0,009	0,017 0,009	0,001 0,029
0 - C2	0,314 0,909	0,007 0,009	-0,022 -0,002	0,452 1,442	0,014 0,005	-0,029 -0,006
1 - C2	-0,022 -0,002	0,001 0,029	-0,017 0,010	-0,029 -0,006	0,139 0,481	-0,030 0,018
2 - C2	0,007 0,009	0,017 0,009	0,001 0,029	0,014 0,005	0,030 0,017	0,139 0,481

TABLA 3.11 Matriz de impedancias Z_{ABC} y Z₀₁₂ de la L/T San Idelfonso – Machala sin transposición

3.1.2 CAPACITANCIAS ^[3]

Para la definición de capacitancias en una L/T, se parte de la ley de Coulomb:

$$F = 9 * 10^9 * \frac{qq_1}{r^2} \quad [N] \quad \text{Ec. 3.18}$$

En donde:

q = Carga puntual en culombios

q_1 = Carga puntual de prueba en culombios

F = Fuerza que ejerce la carga puntual q sobre la carga puntual de prueba q_1 en Newtons.

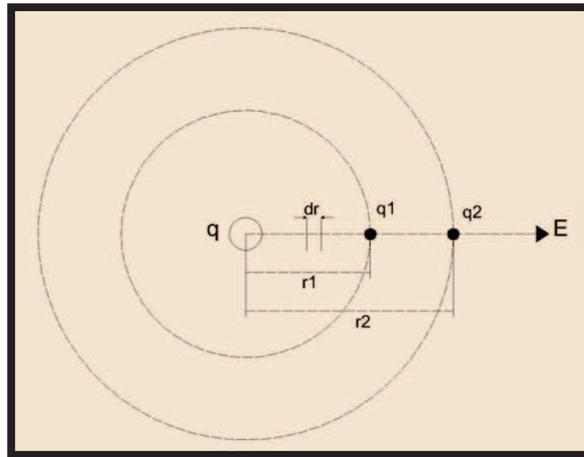


FIGURA 3.9 Campo eléctrico generado por una carga puntual “q”

Partiendo de la ley de Coulomb, se define el campo eléctrico E , de la siguiente manera:

$$E = \frac{F}{q_1}$$

$$E = 9 * 10^9 * \frac{q}{r^2} \quad \left[\frac{N}{c} \right] \quad \text{Ec. 3.19}$$

Ahora el trabajo que tiene que hacer el campo eléctrico generado por la carga q , para llevar a q_1 desde una distancia r_1 (figura 3.9) hasta el infinito se conoce como energía potencial, la cual está definida por la siguiente expresión:

$$E_p = 9 * 10^9 * \frac{qq_1}{r} \quad [Nm] \quad \text{Ec. 3.20}$$

A partir de la energía potencial se define el potencial eléctrico:

$$V = \frac{E_p}{q_1}$$

$$V = 9 * 10^9 * \frac{q}{r} \quad [V] \quad \text{Ec. 3.21}$$

Partiendo de la figura 3.9, la diferencia de potencial eléctrico de la carga q , entre las posiciones 1 y 2 (r_1 y r_2 respectivamente), viene dada por:

$$V_{12} = 9 * 10^9 * q * \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr$$

$$V_{12} = 9 * 10^9 * q * \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [V] \quad \text{Ec. 3.22}$$

La Figura 3.10 muestra el esquema de cargas e imágenes, para considerar el efecto de tierra en el cálculo de capacitancias. Con este método, para un sistema de cargas puntuales (figura 3.10), partiendo de la ecuación 3.22, el voltaje de una carga en el sistema es:

$$V_i = 9 * 10^9 \sum_{j=1}^n \left(q_j * \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \right) \quad \text{Ec. 3.23}$$

Dónde:

D_{ij} = distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j . Si $i = j$, $D_{ii} = 2h_i$ (Distancia del conductor a su propia imagen).

d_{ij} = distancia entre los conductores i y j . Si $i = j$, d_{ii} es el radio del conductor i .

q_j = carga del conductor j en culombios.

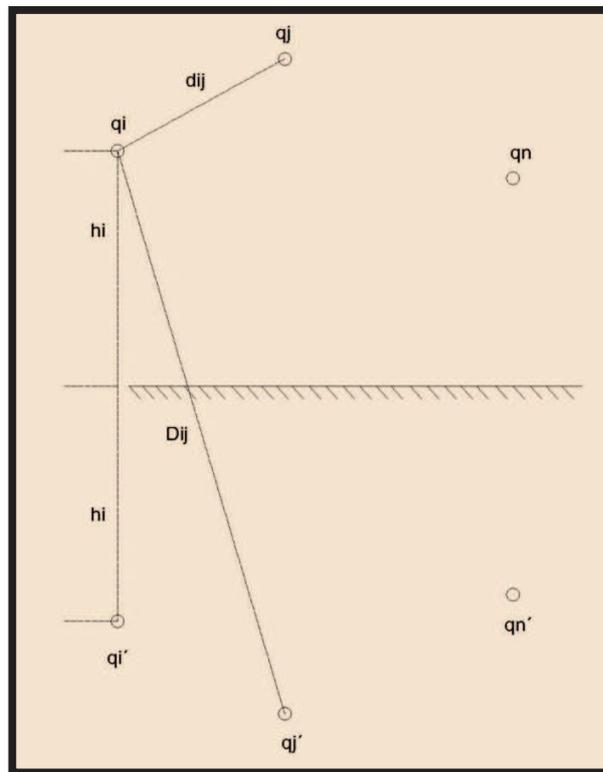


FIGURA 3.10 Conductores con sus respectivas imágenes, representados por cargas

La ecuación 3.23 puede compactarse para obtener:

$$\mathbf{V} = \mathbf{P}\mathbf{q} \quad \text{Ec. 3.24}$$

Donde \mathbf{V} es el vector de voltajes, \mathbf{P} corresponde a la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell y \mathbf{q} es el vector que contiene a las cargas.

Partiendo de la figura 3.10 y en base a la ecuación 3.23, la matriz de coeficientes de potencial se define como:

$$P_{ii} = 18 * 10^9 * \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) \left[\frac{m}{F} \right] \quad \text{Ec. 3.25}$$

$$P_{ij} = 18 * 10^9 * \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \left[\frac{m}{F} \right] \quad \text{Ec. 3.26}$$

Donde r es el radio del conductor i.

Modificando la ecuación 3.24 se tiene:

$$q = P^{-1}V \left[\frac{c}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.27}$$

Partiendo de la ecuación anterior se define:

$$C = P^{-1} \left[\frac{F}{m} \right] \quad \text{Ec. 3.28}$$

Por lo tanto:

$$P = C^{-1} \left[\frac{m}{F} \right] \quad \text{Ec. 3.29}$$

En términos fasoriales para la densidad de carga Q y el voltaje V, la ecuación 3.27 se escribe como:

$$Q = CV \quad \text{Ec. 3.30}$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación anterior por $j\omega$:

$$I = j\omega Q = j\omega CV \quad \text{Ec. 3.31}$$

Sabiendo que $I = YV$:

$$Y = j\omega C \quad \text{Ec. 3.32}$$

3.1.2.1 Determinación de la matriz P_{ABC} de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV mediante DigSILENT Power Factory

La modelación de la L/T en DigSILENT Power Factory se la realiza en base a los datos que se presentan en las tablas 3.8 y 3.9

DigSI/info - Matriz reducida de admitancias Y_{abc} (G+jB) [uS/km]						
	A - C1	B - C1	C - C1	A - C2	B - C2	C - C2
A - C1	0,000 3,009	0,000 -0,531	0,000 -0,226	0,000 -0,451	0,000 -0,281	0,000 -0,158
B - C1	0,000 -0,531	0,000 3,102	0,000 -0,531	0,000 -0,281	0,000 -0,373	0,000 -0,280
C - C1	0,000 -0,226	0,000 -0,531	0,000 3,018	0,000 -0,158	0,000 -0,280	0,000 -0,439
A - C2	0,000 -0,451	0,000 -0,281	0,000 -0,158	0,000 3,009	0,000 -0,531	0,000 -0,226
B - C2	0,000 -0,281	0,000 -0,373	0,000 -0,280	0,000 -0,531	0,000 3,102	0,000 -0,531
C - C2	0,000 -0,158	0,000 -0,280	0,000 -0,439	0,000 -0,226	0,000 -0,531	0,000 3,018
DigSI/info - Matriz reducida de admitancias Y_{012} (G+jB) [uS/km]						
	0 - C1	1 - C1	2 - C1	0 - C2	1 - C2	2 - C2
0 - C1	0,000 2,185	-0,064 0,034	0,064 0,034	0,000 -0,900	-0,016 0,005	0,016 0,005
1 - C1	0,064 0,034	0,000 3,472	0,201 -0,119	0,016 0,005	0,000 -0,182	0,090 -0,055
2 - C1	-0,064 0,034	-0,201 -0,119	0,000 3,472	-0,016 0,005	-0,090 -0,055	0,000 -0,182
0 - C2	0,000 -0,900	-0,016 0,005	0,016 0,005	0,000 2,185	-0,064 0,034	0,064 0,034
1 - C2	0,016 0,005	0,000 -0,182	0,090 -0,055	0,064 0,034	0,000 3,472	0,201 -0,119
2 - C2	-0,016 0,005	-0,090 -0,055	0,000 -0,182	-0,064 0,034	-0,201 -0,119	0,000 3,472

TABLA 3.12 Matriz de admitancias Y_{ABC} y Y_{012} de la L/T San Idelfonso – Machala sin transposición

$$P_{ABC-SIN\ TRANSPOSICIÓN} = \begin{bmatrix} 142,504 & 37,109 & 24,829 & 32,910 & 29,027 & 22,086 \\ 37,109 & 143,486 & 36,864 & 29,027 & 33,832 & 28,743 \\ 24,829 & 36,864 & 141,744 & 22,086 & 28,743 & 32,049 \\ 32,910 & 29,027 & 22,086 & 142,504 & 37,109 & 24,829 \\ 29,027 & 33,832 & 28,743 & 37,109 & 143,486 & 36,864 \\ 22,086 & 28,743 & 32,049 & 24,829 & 36,864 & 141,744 \end{bmatrix} \left[\frac{km}{\mu S} \right] \quad \text{Ec. 3.33}$$

DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Zabc (R+jX) [ohm/km]						
	A - C1	B - C1	C - C1	A - C2	B - C2	C - C2
A - C1	0,000 3,043	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352
B - C1	0,000 -0,352	0,000 3,043	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352
C - C1	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 3,043	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352
A - C2	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 3,043	0,000 -0,352	0,000 -0,352
B - C2	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 3,043	0,000 -0,352
C - C2	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 -0,352	0,000 3,043
DlqSI/info - Matriz reducida de impedancias Z012 (R+jX) [ohm/km]						
	0 - C1	1 - C1	2 - C1	0 - C2	1 - C2	2 - C2
0 - C1	0,000 2,340	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 -1,055	0,000 0,000	0,000 0,000
1 - C1	0,000 0,000	0,000 3,395	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000
2 - C1	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 3,395	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000
0 - C2	0,000 -1,055	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 2,340	0,000 0,000	0,000 0,000
1 - C2	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 3,395	0,000 0,000
2 - C2	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 3,395

TABLA 3.13 Matriz de admitancias Y_{ABC} y Y_{012} de la L/T San Idelfonso – Machala transpuesta

$$P_{ABC-CON TRANSPOSICIÓN} = \begin{bmatrix} 141,508 & 30,465 & 30,465 & 30,465 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 141,508 & 30,465 & 30,465 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 141,508 & 30,465 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 30,465 & 141,508 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 30,465 & 30,465 & 141,508 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 30,465 & 30,465 & 30,465 & 141,508 \end{bmatrix} \left[\frac{km}{\mu S} \right] \quad \text{Ec. 3.34}$$

3.1.3 INDUCCIONES ELECTROMAGNÉTICAS Y ELECTROSTÁTICAS EXISTENTES EN L/T DE DOBLE CIRCUITO ANTE DIFERENTES MANIOBRAS

En este ítem se analiza las inducciones electromagnéticas y electrostáticas que existen entre los circuitos de una L/T paralela. Las diferentes maniobras se las realiza solo en un circuito de la L/T, mientras el otro permanece en estado normal.

3.1.3.1 Inducción electromagnética ^[4]

Los voltajes y corrientes inducidos electromagnéticamente se producen exclusivamente por la presencia de la matriz de impedancias (Z_{ABC}) y por la corriente que circula por sus circuitos (I_e).

El sistema de conductores generalmente incluye conductores energizados transportadores de corriente “e”, conductores de corriente a tierra “g” y conductores con circuito abierto o desenergizados “d”.

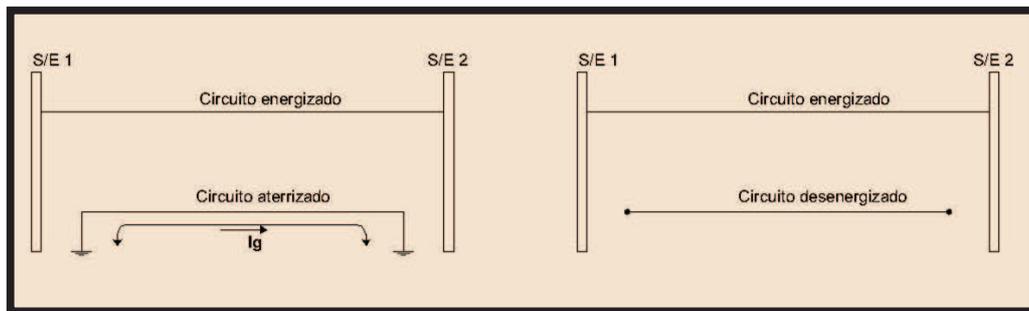


FIGURA 3.11 Representación de circuitos energizados, desenergizados y aterrizados

La corriente que fluye a tierra cuando la L/T esta aterrizada es calculada de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [V_e] \\ [V_g] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_e] & [Z_{eg}] \\ [Z_{ge}] & [Z_g] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_e] \\ [I_g] \end{bmatrix}$$

Como:

$$[V_g] = [0]$$

Entonces:

$$[V_e] = [Z_e][I_e] + [Z_{eg}][I_g] \quad \text{Ec. 3.35}$$

$$[0] = [Z_{ge}][I_e] + [Z_g][I_g] \quad \text{Ec. 3.36}$$

De la ecuación 3.36 se tiene:

$$[I_g] = -[Z_g]^{-1}[Z_{ge}][I_e] \quad \text{Ec. 3.37}$$

En donde:

I_g = Corriente a tierra cuando el circuito de la L/T esta aterrizado

Z_g = Matriz de impedancias propia del circuito aterrizado

Z_{ge} = Matriz de impedancias mutuas entre el circuito aterrizado y el energizado

I_e = Corriente que fluye por el circuito energizado

Para determinar el voltaje por unidad de longitud inducido en una L/T con circuito abierto, se aplica:

$$\begin{bmatrix} [V_e] \\ [V_d] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_e] & [Z_{ed}] \\ [Z_{de}] & [Z_d] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_e] \\ [I_d] \end{bmatrix}$$

Como:

$$[I_d] = [0]$$

Entonces:

$$[V_e] = [Z_e][I_e] \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$[V_d] = [Z_{de}][I_e] \quad \text{Ec. 3.39}$$

En donde:

V_e = Voltaje en el circuito energizado

V_d = Voltaje inducido en el circuito de desenergizado

Z_e = Matriz de impedancias propia del circuito energizado

Z_{de} = Matriz de impedancias mutuas entre el circuito desenergizado y el energizado

Reemplazando la ecuación 3.38 en la ecuación 3.39 se obtiene:

$$[E_d] = [Z_e]^{-1}[Z_{de}][V_e] \quad \text{Ec. 3.40}$$

En donde E_d representa el voltaje inducido total.

Partiendo de la ecuación 3.39, el voltaje inducido total está dado también por:

$$[E_d] = L[V_d] \quad \text{Ec. 3.41}$$

En donde L representa longitud total de la L/T.

Se puede concluir que el voltaje total inducido electromagnéticamente (E_d) puede obtenerse a partir de las ecuaciones 3.40 o 3.41.

3.1.3.2 Inducción electrostática ^[4]

Los voltajes y corrientes que se inducen por electrostática se generan básicamente por la presencia de la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell (P_{ABC}) y por el voltaje presente en la L/T cuando esta esta energizada (V_e).

El voltaje electrostático inducido en el circuito desenergizado, abierto en sus extremos está dado por:

$$[I] = [Y][V]$$

Como:

$$[Y] = j\omega[C]$$

$$[P] = [C]^{-1}$$

Entonces:

$$[V] = \frac{1}{j\omega} [P][I]$$

$$\begin{bmatrix} [V_e] \\ [V_d] \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega} \begin{bmatrix} [P_e] & [P_{ed}] \\ [P_{de}] & [P_d] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_e] \\ [I_d] \end{bmatrix}$$

Como:

$$[I_d] = [0]$$

Entonces:

$$[V_e] = \frac{1}{j\omega} [P_e][I_e] \quad \text{Ec. 3.42}$$

$$[V_d] = \frac{1}{j\omega} [P_{de}][I_e] \quad \text{Ec. 3.43}$$

Reemplazando la ecuación 3.42 en la ecuación 3.43 se tiene:

$$[V_d] = [P_e]^{-1}[P_{de}][V_e] \quad \text{Ec. 3.44}$$

En donde:

P_e = Matriz de coeficientes de potencial de maxwell propia del circuito energizado

P_{de} = Matriz de coeficientes de potencial de Maxwell mutua entre el circuito desenergizado y el energizado

Para determinar la corriente inducida electrostáticamente cuando la L/T esta aterrizada en sus dos extremos, se estable considerando solo los conductores energizados, de la siguiente manera:

$$[Q_e] = [P_e]^{-1}[V_e] \quad \text{Ec. 3.45}$$

$$[I_g] = j2\pi fL[Q_e] \quad \text{Ec. 3.46}$$

Dónde:

L = longitud total de la L/T

f = frecuencia del voltaje en Hz

Q_e = Carga eléctrica presente en el circuito energizado

3.1.3.3 Aplicación de la inducción electromagnética y electrostática a la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV

En este ítem simplemente se detalla la información requerida para el cálculo de los voltajes y corrientes que se inducen por efecto del acoplamiento existente en una L/T paralela, puesto que la línea de transmisión San Idelfonso – Machala cumple estas características.

Es necesario mencionar que la L/T San Idelfonso – Machala no es transpuesta, por lo tanto el acoplamiento existente entre sus dos circuitos siempre estará presente (sus circuitos no son independientes).

Todas las maniobras necesarias para este estudio se las realiza en el circuito 2 de la L/T.

3.1.3.3.1 Cálculo de la corriente y voltaje inducidos electromagnéticamente

Partiendo de la matriz de impedancias Z_{ABC} (tablas 3.10 y 3.11) de la L/T, se analizan los siguientes eventos:

- Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T abierto en sus extremos (V_d) – inducción electromagnética
- Corriente inducida en el circuito 2 de la L/T aterrizado en sus extremos (I_g) – inducción electromagnética
- Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T aterrizado uno de sus extremos (V_d') – inducción electromagnética

a) Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T abierto en sus extremos (V_d) – inducción electromagnética

El cálculo del voltaje inducido electromagnéticamente se lo realiza en base a la matriz Z_{ABC} con transposición y sin transposición (tablas 3.10 y 3.11 respectivamente).

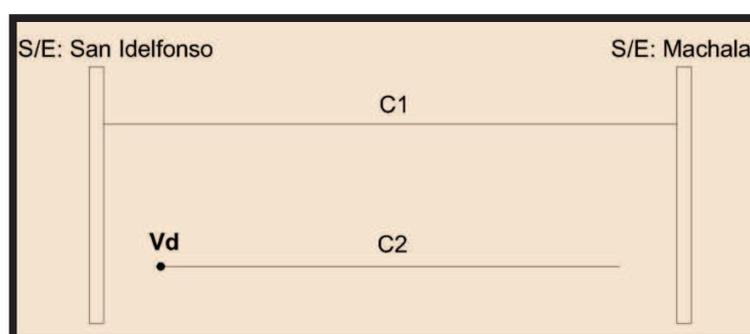


FIGURA 3.12 Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T San Idelfonso – Machala, extremo de la S/E San Idelfonso

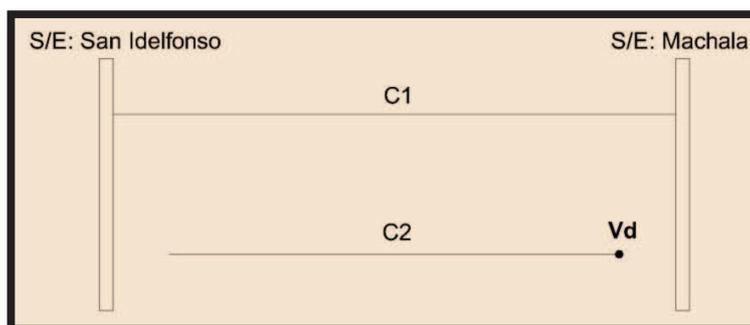


FIGURA 3.13 Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T San Idelfonso – Machala, extremo de la S/E Machala

- **L/T sin transposición**

Como se puede observar en la ecuación 3.39 antes de calcular el voltaje en el circuito desenergizado es necesario encontrar el parámetro Z_{de} :

$$Z_{de} = Z_{ABC-C2C1} = \begin{bmatrix} 0,095 + j0,333 & 0,099 + j0,310 & 0,105 + j0,273 \\ 0,099 + j0,310 & 0,103 + j0,324 & 0,110 + j0,298 \\ 0,105 + j0,273 & 0,110 + j0,298 & 0,117 + j0,309 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

El dato de los valores de corrientes que circulan por las fases del circuito energizado se obtiene del flujo de potencia en ATP y en DigSILENT Power Factory, para la condición de demanda máxima, como se indica en la tabla 3.14:

	P [MW]	Q [Mvar]
EMELORO 1	27,29	7,96
EMELORO 2	81,82	23,87

TABLA 3.14 Carga que abastece la S/E Machala

Por lo tanto los valores de corriente por fase tomados del flujo de potencia son:

$$\begin{bmatrix} I_{ae} \\ I_{be} \\ I_{ce} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 510 \angle -22,7^\circ \\ 510 \angle -142,82^\circ \\ 510 \angle 97,14^\circ \end{bmatrix} [A] \quad \text{Ec. 3.47}$$

Entonces la ecuación 3.39 se modifica para calcular el voltaje inducido:

$$[V_d] = [Z_{ABC-C2C1}][I_e]$$

Resolviendo la ecuación anterior mediante software se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{ad} \\ V_{bd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27,031 \angle 39,875^\circ \\ 7,826 \angle -1,866^\circ \\ 15,493 \angle -150,659^\circ \end{bmatrix} \left[\frac{V}{km} \right]$$

En base a la ecuación 3.41, como la longitud de la L/T en análisis es de 21 [km] el voltaje total inducido electromagnéticamente es:

$$\begin{bmatrix} E_{ad} \\ E_{bd} \\ E_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 567,649 \angle 124,656^\circ \\ 164,339 \angle -106,924^\circ \\ 325,351 \angle 7,879^\circ \end{bmatrix} [V] \quad \text{Ec. 3.48}$$

Partiendo de la ecuación 3.48, los voltajes que se inducen en los extremos de San Idelfonso y Machala (figuras 3.12 y 3.13 respectivamente) son los mismos, ya que el voltaje en este caso depende de la corriente que circula por el circuito energizado y de la matriz de impedancias mutuas entre los circuitos de la L/T.

- **L/T con transposición**

En base a la ecuación 3.40 establecemos los parámetros Z_e y Z_{de} traspuestos (tabla 3.10).

$$Z_e = Z_{ABC-C1} = \begin{bmatrix} 0,243 + j0,801 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,243 + j0,801 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,243 + j0,801 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_{de} = Z_{ABC-C2C1} = \begin{bmatrix} 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

De la ecuación 3.40, es necesario determinar también el voltaje en el circuito energizado. Al depender el voltaje inducido electromagnéticamente exclusivamente de la corriente que circula por el circuito energizado, se toma un valor de voltaje referencial que posee este circuito, considerando que no existe pérdidas a lo largo de la L/T:

$$[V_e] = \begin{bmatrix} 138\angle 30^\circ \\ 138\angle -90^\circ \\ 138\angle 150^\circ \end{bmatrix} [kV] \quad \text{Ec. 3.49}$$

Reemplazando los parámetros Z_e , Z_{de} y V_e en la ecuación 3.40 se tiene:

$$[E_d] = [Z_{ABC-C1}]^{-1} [Z_{ABC-C2C1}] [V_e]$$

Resolviendo la ecuación anterior mediante software:

$$\begin{bmatrix} E_{ad} \\ E_{bd} \\ E_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,414 * 10^{-10} \angle 45^\circ \\ 1,414 * 10^{-10} \angle -45^\circ \\ 1,414 * 10^{-10} \angle -135^\circ \end{bmatrix} [V] \quad \text{Ec. 3.50}$$

De la ecuación 3,50 se establece que la inducción electromagnética de voltaje en una L/T paralela con transposición es prácticamente cero, por lo tanto se puede establecer que los circuitos de la línea son independientes.

b) Corriente inducida (I_g) en el circuito 2 de la L/T aterrizado en sus extremos – inducción electromagnética

La corriente que se induce por efecto electromagnético ante el aterrizamiento del circuito 2 de la L/T depende exclusivamente de la matriz de impedancias Z_{ABC} y de la corriente que circula por el circuito energizado.

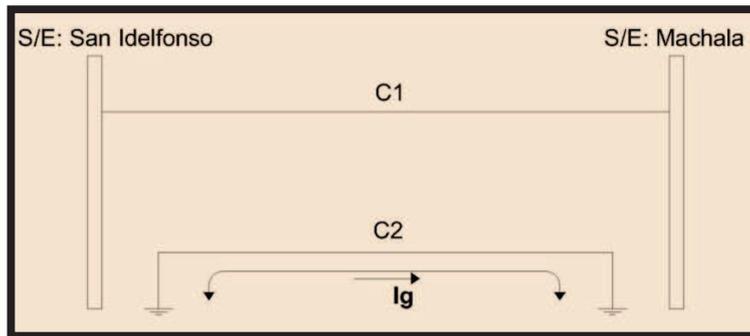


FIGURA 3.14 L/T San Idelfonso – Machala, circuito 2 aterrizado en los dos extremos

- **L/T sin transposición**

Como se puede observar en la ecuación 3.37, antes de proceder a calcular la corriente hacia tierra, debemos encontrar los parámetros Z_g y Z_{ge} (tabla 3.11):

$$Z_g = Z_{ABC-C2} = \begin{bmatrix} 0,234 + j0,812 & 0,099 + j0,344 & 0,105 + j0,285 \\ 0,099 + j0,344 & 0,242 + j0,803 & 0,110 + j0,332 \\ 0,105 + j0,285 & 0,110 + j0,332 & 0,255 + j0,789 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_{ge} = Z_{ABC-C2C1} = \begin{bmatrix} 0,095 + j0,333 & 0,099 + j0,310 & 0,105 + j0,273 \\ 0,099 + j0,310 & 0,103 + j0,324 & 0,110 + j0,298 \\ 0,105 + j0,273 & 0,110 + j0,298 & 0,117 + j0,309 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Los valores de corrientes del circuito energizado (I_e) se encuentran establecidos en la ecuación 3.47.

Por lo tanto la corriente que fluye a tierra por inducción electromagnética, partiendo de la ecuación 3.37 es:

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = -[Z_{ABC-C2}]^{-1} [Z_{ABC-C2C1}] \begin{bmatrix} I_{ae} \\ I_{be} \\ I_{ce} \end{bmatrix}$$

Resolviendo la ecuación anterior mediante software se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 43,104 \angle 146,367^\circ \\ 11,28 \angle 73,711^\circ \\ 36,919 \angle -48,517^\circ \end{bmatrix} [A] \quad \text{Ec. 3.51}$$

La ecuación 3.51 muestra los fasores de corriente que se inducen en el circuito 2 de la L/T cuando este se encuentra aterrizado en sus dos extremos. La suma de la corriente de las tres fases más la suma de la corriente inducida electrostáticamente (suma de las tres fases) representa la corriente total a tierra.

- **L/T con transposición**

Partiendo de la ecuación 3.37, antes de proceder a calcular la corriente hacia tierra se debe encontrar los parámetros Z_g y Z_{ge} de la L/T transpuesta (tabla 3.10):

$$Z_g = Z_{ABC-C2} = \begin{bmatrix} 0,243 + j0,801 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,243 + j0,801 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,243 + j0,801 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_{ge} = Z_{ABC-C2C1} = \begin{bmatrix} 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Los valores de corriente del circuito energizado están establecidos en la ecuación 3.47. Aplicando los parámetros Z_g , Z_{ge} y los valores de corriente del circuito energizado (I_e) en la ecuación 3.37 se resuelve el problema de las corrientes inducidas, dando como resultado:

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,282 \angle -127,703^\circ \\ 0,282 \angle -127,703^\circ \\ 0,282 \angle -127,703^\circ \end{bmatrix} [A] \quad \text{Ec. 3.52}$$

Con los valores de corriente que muestra la ecuación 3.52, los cuales son prácticamente cero, se puede determinar que los circuitos paralelos de una L/T transpuesta son considerados independientes, ya que el acoplamiento existente entre ellos es mínimo.

c) Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T aterrizado uno de sus extremos (V_d') – inducción electromagnética

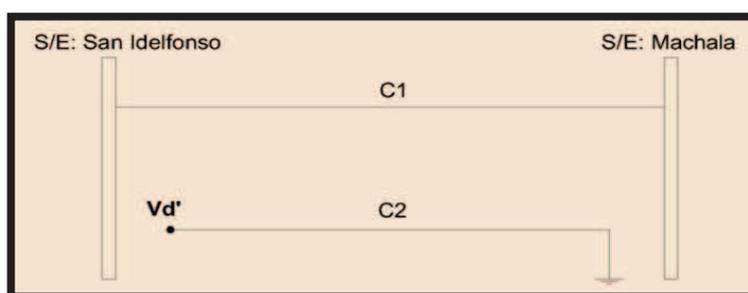


FIGURA 3.15 Voltaje inducido en el extremo de la S/E San Idelfonso – circuito 2 aterrizado en el extremo de la S/E Machala

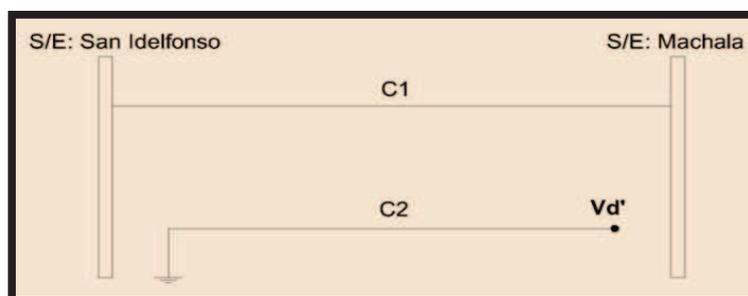


FIGURA 3.16 Voltaje inducido en el extremo de la S/E Machala – circuito 2 aterrizado en el extremo de la S/E San Idelfonso

- **L/T sin transposición**

El cálculo del voltaje punta que se produce al aterrizar solo uno de los extremos de la L/T por inducción electromagnética (V_d'), depende exclusivamente de la corriente que se encuentra circulando por el circuito energizado (I_e) y de la impedancia mutua entre el circuito energizado y el aterrizado solo en un extremo ($Z_{ABC-C2C1}$).

En base a este análisis se establece el voltaje en cada extremo de la L/T (figuras 3.15 y 3.16) mediante las ecuaciones 3.39 y 3.41, dando como resultado los valores de la ecuación 3.48 tanto en el extremo de San Idelfonso como en el de Machala:

$$\begin{bmatrix} V'_{ad} \\ V'_{bd} \\ V'_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 567,649 \angle 39,875^\circ \\ 164,339 \angle -1,866^\circ \\ 325,351 \angle -150,659^\circ \end{bmatrix} [V] \quad \text{Ec. 3.53}$$

- **L/T con transposición**

El cálculo del voltaje punta inducido para el caso de una L/T transpuesta se lo realiza en base a la ecuación 3.40.

Partiendo de esto es necesario determinar los parámetros Z_e , Z_{de} y V_e de la L/T:

$$Z_e = Z_{ABC-C1} = \begin{bmatrix} 0,243 + j0,801 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,243 + j0,801 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,243 + j0,801 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_{de} = Z_{ABC-C2C1} = \begin{bmatrix} 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \\ 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 & 0,105 + j0,310 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

El valor de voltaje del circuito energizado se presenta en la ecuación 3.49.

Reemplazando los parámetros Z_e , Z_{de} y V_e en la ecuación 3.40 se tiene:

$$\begin{bmatrix} V'_{ad} \\ V'_{bd} \\ V'_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,414 * 10^{-10} \angle 45^\circ \\ 1,414 * 10^{-10} \angle -45^\circ \\ 1,414 * 10^{-10} \angle -135^\circ \end{bmatrix} [V] \quad \text{Ec. 3.54}$$

En base a la ecuación 3.54, los valores de voltaje punta en los extremos de San Idelfonso y Machala para esta maniobra son prácticamente cero, con lo que se puede concluir que los circuitos de la L/T son independientes.

3.1.3.3.2 *Calculo de la corriente y voltaje inducidos electrostáticamente*

El cálculo de los voltajes y corrientes inducidos electrostáticamente dependen exclusivamente de la matriz de coeficientes de potencial de maxwell P_{ABC} .

A partir de esto, se analizan los siguientes eventos:

- a) Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T abierto en los extremos (V_d) – inducción electrostática
- b) Corriente inducida en el circuito 2 de la L/T aterrizado en sus extremos (I_g) – inducción electrostática
- c) Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T aterrizado uno de sus extremos (V_d') – inducción electrostática

- a) Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T abierto en los extremos (V_d) – inducción electrostática**

El cálculo de los voltajes inducidos por electrostática se los realiza para el extremo de San Idelfonso y Machala (figuras 3.12 y 3.13 respectivamente).

- **L/T sin transposición**

Partiendo de la ecuación 3.44 se observa que antes de proceder a calcular el voltaje inducido en el circuito desenergizado se deben encontrar primero los parámetros P_{de} y P_e no transpuestos, estos parámetros se presentan en la ecuación 3.33.

$$[P_{de}] = [P_{ABC-C2C1}] = \begin{bmatrix} 32,910 & 29,027 & 22,086 \\ 29,027 & 33,832 & 28,743 \\ 22,086 & 28,743 & 32,049 \end{bmatrix}$$

$$[P_e] = [P_{ABC-C1}] = \begin{bmatrix} 142,504 & 37,109 & 24,829 \\ 37,109 & 143,486 & 36,864 \\ 24,829 & 36,864 & 141,744 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.55}$$

Los datos del voltaje del circuito energizado se toman de la corrida de flujo en DlgSILENT Power Factory y ATP.

Los valores de voltaje del circuito energizado en los extremos de San Idelfonso y Machala se presentan en las ecuaciones 3.56 y 3.57 respectivamente.

$$[V_{e-SAN IDELFONSO}] = \begin{bmatrix} 138\angle 30^\circ \\ 138\angle -90^\circ \\ 138\angle 150^\circ \end{bmatrix} [kV] \quad \text{Ec. 3.56}$$

$$[V_{e-MACHALA}] = \begin{bmatrix} 130.666\angle 26,836^\circ \\ 130.666\angle -93,410^\circ \\ 130.66\angle 146,269^\circ \end{bmatrix} [kV] \quad \text{Ec. 3.57}$$

Con los parámetros P_{de} y P_e , y el valor de los voltajes de la línea energizada la ecuación 3.44 queda de la siguiente forma:

$$[V_d] = [P_{ABC-C1}]^{-1} [P_{ABC-C2C1}] [V_e]$$

Basándonos en la ecuación anterior, los voltajes inducidos en el extremo de San Idelfonso y Machala son:

$$[V_{d-SAN IDELFONSO}] = \begin{bmatrix} 10,897\angle 2^\circ \\ 4,024\angle -87,971^\circ \\ 10,289\angle 179,071^\circ \end{bmatrix} [kV] \quad \text{Ec. 3.58}$$

$$[V_{d-MACHALA}] = \begin{bmatrix} 10,306\angle -0,605^\circ \\ 3,658\angle -91,119^\circ \\ 9,706\angle 174,741^\circ \end{bmatrix} [kV] \quad \text{Ec. 3.59}$$

Los valores de voltaje inducidos que resultan en el extremo de la S/E San Idelfonso (ecuación 3.58) son mayores a los voltajes obtenidos en el extremo de la S/E Machala (ecuación 3.59), esto se debe a la caída de voltaje que produce la L/T San Idelfonso – Machala.

- **L/T con transposición**

En base a la ecuación 3.44 se observa que antes de proceder a calcular el voltaje inducido en el circuito desenergizado se deben encontrar primero los parámetros P_{de} y P_e de la L/T transpuesta, estos parámetros se presentan en la ecuación 3.34.

$$[P_{de}] = [P_{ABC-C2C1}] = \begin{bmatrix} 30,465 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 30,465 \end{bmatrix}$$

$$[P_e] = [P_{ABC-C1}] = \begin{bmatrix} 141,508 & 30,465 & 30,465 \\ 30,465 & 141,508 & 30,465 \\ 30,465 & 30,465 & 141,508 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.60}$$

El valor de los voltajes en el circuito energizado está establecido en las ecuaciones 3.56 y 3.57, las cuales corresponden a los extremos de San Idelfonso y Machala respectivamente.

Aplicando los parámetros P_{de} , P_e , y el valor de los voltajes de la línea energizada en la ecuación 3.44 se tiene que:

$$[V_{d-SAN IDELFONSO}] = \begin{bmatrix} 1 * 10^{-10} \angle -90^\circ \\ 1 * 10^{-10} \angle -90^\circ \\ 1 * 10^{-10} \angle -90^\circ \end{bmatrix} [V] \quad \text{Ec. 3.61}$$

$$[V_{d-MACHALA}] = \begin{bmatrix} 168,779 \angle 82,179^\circ \\ 168,779 \angle 82,179^\circ \\ 168,779 \angle 82,179^\circ \end{bmatrix} [V] \quad \text{Ec. 3.62}$$

Partiendo de las ecuaciones 3.61 y 3.62 se puede concluir que para fines prácticos el voltaje inducido electrostáticamente en una L/T transpuesta es cero, por lo que los circuitos de la línea son independientes.

b) Corriente inducida en el circuito 2 de la L/T aterrizada en sus extremos (I_g) – inducción electrostática

• **L/T sin transposición**

Partiendo de la ecuación 3.45 se establece la carga del circuito energizado por unidad de longitud. El valor del parámetro P_e para la L/T sin transposición se establece en la ecuación 3.55. El valor de voltaje del circuito energizado se presenta en la ecuación 3.49. Entonces la ecuación 3.45 se modifica:

$$[Q_e] = [P_{ABC-C1}]^{-1}[V_e]$$

Resolviendo la ecuación anterior mediante software se tiene:

$$[Q_e] = \begin{bmatrix} 1,238 * 10^{-3} \angle 34,783^\circ \\ 1,326 * 10^{-3} \angle -90,027^\circ \\ 1,243 * 10^{-3} \angle 145,262^\circ \end{bmatrix} \left[\frac{C}{km} \right] \quad \text{Ec. 3.63}$$

Con el valor de la carga del circuito energizado encontrada, y en base a la ecuación 3.46, se establece la corriente que fluye a tierra cuando los dos extremos del circuito están aterrizados (figura 3.14):

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = j * 2\pi * 60 * 21 * \begin{bmatrix} 1,238 * 10^{-3} \angle 34,783^\circ \\ 1,326 * 10^{-3} \angle -90,027^\circ \\ 1,243 * 10^{-3} \angle 145,262^\circ \end{bmatrix} [A]$$

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,8 \angle -77,03^\circ \\ 10,5 \angle -28,141^\circ \\ 9,837 \angle 132,92^\circ \end{bmatrix} [A] \quad \text{Ec. 3.64}$$

Los resultados de corriente obtenidos en la ecuación 3.64, pueden no ser considerados en la determinación de la corriente total hacia tierra cuando la L/T esta aterrizada, puesto que el aporte de corriente por inducción electrostática es bajo en comparación con el aporte de corriente por inducción electromagnética. ^[5]

- **L/T con transposición**

Al igual que en una L/T sin transposición, partiendo de la ecuación 3.45 se establece la carga del circuito energizado por unidad de longitud. El valor del parámetro P_e para la L/T con transposición se establece en la ecuación 3.60. El valor de voltaje del circuito energizado es el que se presenta en la ecuación 3.49. Por lo tanto la ecuación 3.45 se modifica:

$$[Q_e] = [P_{ABC-C1}]^{-1} [V_e]$$

Resolviendo la ecuación anterior mediante software se tiene:

$$[Q_e] = \begin{bmatrix} 1,243 * 10^{-3} \angle 30^\circ \\ 1,243 * 10^{-3} \angle -90^\circ \\ 1,243 * 10^{-3} \angle 150^\circ \end{bmatrix} \left[\frac{C}{km} \right] \quad \text{Ec. 3.65}$$

Con el valor de la carga del circuito energizado encontrada, y en base a la ecuación 3.46, se establece la corriente que fluye a tierra cuando los dos extremos del circuito están aterrizados (figura 3.14):

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = j * 2\pi * 60 * 21 * \begin{bmatrix} 1,243 * 10^{-3} \angle 30^\circ \\ 1,243 * 10^{-3} \angle -90^\circ \\ 1,243 * 10^{-3} \angle 150^\circ \end{bmatrix} [A]$$

$$\begin{bmatrix} I_{ag} \\ I_{bg} \\ I_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,839 \angle 8,873^\circ \\ 9,839 \angle -26,62^\circ \\ 9,839 \angle 44,367^\circ \end{bmatrix} [A] \quad \text{Ec. 3.66}$$

A partir de la ecuación 3.66, la inducción electrostática de corriente en la L/T considerándola transpuesta es baja, razón por la cual para fines prácticos se puede concluir que los circuitos de la línea son independientes.

c) Voltaje inducido en el circuito 2 de la L/T aterrizado uno de sus extremos – inducción electrostática

Para el cálculo del voltaje inducido en el circuito aterrizado en él un extremo por electrostática (figuras 3.15 y 3.16), es necesario analizar cómo afecta esta maniobra a la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell.

La matriz de coeficientes de potencial de Maxwell es una matriz cuadrada compuesta por cuatro submatrices de orden $n \times n$, tal y como se indica en la ecuación 3.67:

$$[P_{ABC}] = \begin{bmatrix} [P_{ABC-C1}] & [P_{ABC-C1C2}] \\ [P_{ABC-C2C1}] & [P_{ABC-C2}] \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.67}$$

Al realizar el aterrizamiento de la L/T en cualquiera de sus dos extremos, la ecuación 3.67 sufre los siguientes cambios:

- La matriz de coeficientes propia de la línea aterrizada es cero:

$$[P_{ABC-C2}] = [0]$$

- La matriz de coeficientes mutua entre C1 y C2 es cero:

$$[P_{ABC-C1C2}] = [0]$$

- La matriz de coeficientes mutua entre C2 y C1 es cero:

$$[P_{ABC-C2C1}] = [0]$$

Por lo que la ecuación 3.67 cambia:

$$[P_{ABC}] = \begin{bmatrix} [P_{ABC-C1}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.68}$$

Una vez encontrados los cambios que sufre la matriz de coeficientes por el aterrizamiento del circuito 2 en un extremo cualquiera, partiendo de la ecuación 3.44, antes de proceder al cálculo del voltaje inducido es necesario encontrar los parámetros P_{de} y P_e :

$$[P_{de}] = [P_{ABC-C2C1}] = [0]$$

El parámetro P_e es el mismo que indican las ecuaciones 3.55 y 3.60 que corresponden a la L/T sin transposición y con transposición respectivamente, ya que en el circuito energizado no se realizó ninguna maniobra. Los valores del voltaje de la L/T energizada se indican en las ecuaciones 3.56 (San Idelfonso) y 3.57 (Machala).

Una vez encontrados P_{de} , P_e y V_e , se aplican en la ecuación 3.44, obteniendo:

$$[V'_d] = [0][V] \quad \text{Ec. 3.69}$$

En base a los resultados obtenidos, y en vista que para esta maniobra el parámetro P_{de} es cero la consideración de si la L/T es transpuesta o no transpuesta es arbitraria.

Entonces para una L/T sin transposición o con trasposición la inducción de voltaje por efecto electrostático, cuando la línea esta aterrizada solo en un extremo es cero.

Por lo tanto el voltaje punta que se induce al realizar esta maniobra depende exclusivamente de la inducción electromagnética, tomando los valores de la ecuación 3.53:

$$\begin{bmatrix} V'_{ad} \\ V'_{bd} \\ V'_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 567,649 \angle 39,875^\circ \\ 164,339 \angle -1,866^\circ \\ 325,351 \angle -150,659^\circ \end{bmatrix} [V]$$

Las simulaciones de las diferentes maniobras analizadas se presentan en el ANEXO 1, tanto para la L/T traspuesta como para la L/T no traspuesta.

3.1.3.3.3 Resultados de voltajes y corrientes obtenidos teóricamente y mediante la simulación del flujo de potencia en ATP y DIGSILENT Power Factory

Se presenta los principales resultados de los voltajes y corrientes inducidos electromagnética y electrostáticamente, ante las diferentes maniobras realizadas.

Los resultados se presentan considerando a la L/T San Idelfonso - Machala como real, es decir sin transposición.

Para el caso de la corriente total inducida cuando la L/T esta aterrizada es sus extremos, el aporte de corriente por efecto electrostático no es considerado, puesto que este se lo puede omitir como se indicó en puntos anteriores.

Con respecto al voltaje total inducido cuando la L/T esta desenergizada (abierta en sus extremos), el aporte de voltaje por efecto electromagnético no se incluye en los resultados, ya que en comparación con el aporte de voltaje por efecto electrostático este es insignificante.

- Resultados de voltajes y corrientes – inducción electromagnética

Corrientes que circulan por el circuito energizado (L/T San Idelfonso 1)				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	
		[A]	[A]	
FASE S	A	$510\angle - 22,7^\circ$	$513\angle - 35,5^\circ$	
	B	$510\angle - 142,82^\circ$	$514,3\angle - 155,423^\circ$	
	C	$510\angle 97,14$	$516,1\angle 84,26^\circ$	
Corrientes inducidas en el circuito aterrizado (L/T San Idelfonso 2)				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	CÁLCULOS TEÓRICOS
		[A]	[A]	[A]
FASE S	A	$40\angle 146,98^\circ$	$42,59\angle 134^\circ$	$43,104\angle 146,367$
	B	$10\angle 69,29^\circ$	$11,89\angle 50,39^\circ$	$10,28\angle 73,711^\circ$
	C	$40\angle - 48,17^\circ$	$38,83\angle - 56,8^\circ$	$36,919\angle - 48,517^\circ$

TABLA 3.15 Corrientes inducidas en la L/T San Idelfonso 2

Corrientes que circulan por el circuito energizado (L/T San Idelfonso 1)				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	
		[A]	[A]	
FASE S	A	$510\angle - 22,7^\circ$	$513\angle - 35,5^\circ$	
	B	$510\angle - 142,82^\circ$	$514,3\angle - 155,423^\circ$	
	C	$510\angle 97,14$	$516,1\angle 84,26^\circ$	
Voltajes inducidos en el circuito 2 de la L/T aterrizado uno de sus extremos				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	CÁLCULOS TEÓRICOS
		[V]	[V]	[V]
FASE S	A	$414\angle 54,55^\circ$	$562,84\angle 53,066^\circ$	$567,649\angle 39,875^\circ$
	B	$414\angle 16,735^\circ$	$172,72\angle 8,802^\circ$	$164,339\angle - 1,866^\circ$
	C	$828\angle - 144,388^\circ$	$404,53\angle - 127,796^\circ$	$325,351\angle - 150,659^\circ$

TABLA 3.16 Voltajes inducidos en la L/T San Idelfonso 2, abierta en el extremo de la S/E San Idelfonso 138 kV o en el extremo de la S/E Machala 138 kV

- Resultados de voltajes y corrientes – inducción electrostática

Voltajes en el circuito energizado (L/T San Idelfonso 1) – extremo de la S/E San Idelfonso 138 kV				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	
		[kV]	[kV]	
FASE S	A	138∠30°	138∠30°	
	B	138∠ – 90°	138∠ – 90°	
	C	138∠150°	138∠150°	
Voltajes inducidos en el circuito desenergizado (L/T San Idelfonso 2) – extremo de la S/E San Idelfonso 138 kV				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	CÁLCULOS TEÓRICOS
		[kV]	[kV]	[kV]
FASE S	A	6,624∠ – 7,539°	8,97∠ – 9,88°	10,897∠2°
	B	6,486∠ – 51,569°	4,29∠ – 122,62°	4,024∠ – 87,971°
	C	12,144∠150,801°	12,293∠167,101°	10,289∠174,741°

TABLA 3.17 Voltajes inducidas en la L/T San Idelfonso 2 – extremo S/E San Idelfonso 138 kV

Voltajes en el circuito energizado (L/T San Idelfonso 1) – extremo de la S/E Machala 138 kV				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	
		[kV]	[kV]	
FASE S	A	131,929∠27,120°	133,982∠28°	
	B	132,894∠ – 93,054°	132,554∠ – 92°	
	C	132,066∠146,65°	132,429∠148°	
Voltajes inducidos en el circuito desenergizado (L/T San Idelfonso 2) – extremo de la S/E Machala 138 kV				
		DlgSILENT Power Factory	ATP	CÁLCULOS TEÓRICOS
		[kV]	[kV]	[kV]
FASE S	A	6,486∠ – 11,202°	8,754∠ – 12,47°	10,306∠ – 0,605°
	B	6,348∠ – 55,528°	4,34∠ – 124,35°	3,658∠ – 91,119°
	C	11,868∠146,65°	12,188∠165,377°	9,767∠174,741°

TABLA 3.18 Voltajes inducidas en la L/T San Idelfonso 2 – extremo S/E Machala 138 kV

3.2 ACOPLAMIENTO EXISTENTE EN CIRCUITOS PARALELOS – AFECTACIÓN A LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA – 21^[3]

3.2.1 EFECTO DE ACOPLAMIENTO EN L/T – CIRCUITO SIMPLE

3.2.1.1 Falla entre fases

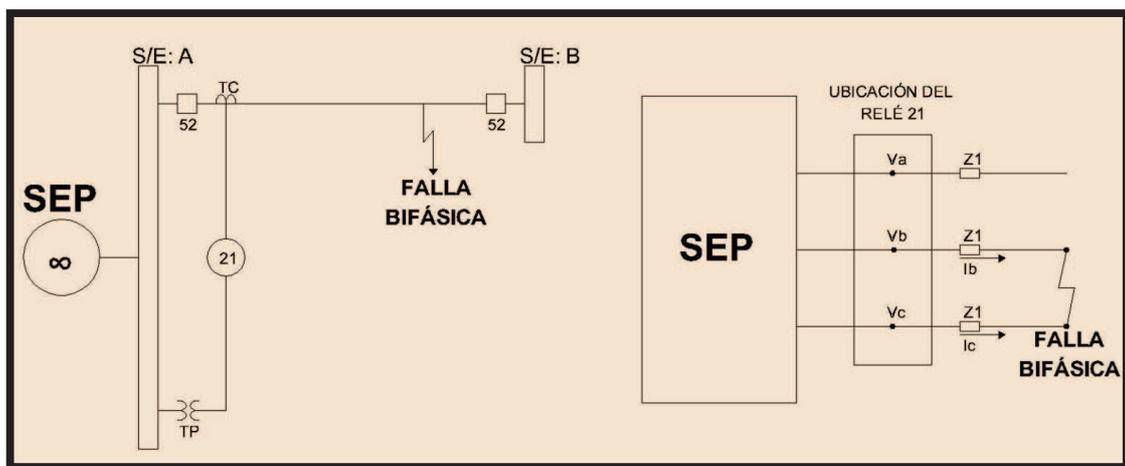


FIGURA 3.17 Falla bifásica “bc”

La impedancia vista por el relé sin considerar los efectos de acoplamiento entre redes de secuencia es Z_1 . Sin embargo, partiendo del diagrama de secuencias de la figura 3.18, para una condición de falla bifásica “b - c”, se tiene lo siguiente:

$$V_{bc} = -j\sqrt{3}V_a = -j\sqrt{3}i_{a1}(Z_1 + Z_2 - Z_{12} - Z_{21})$$

$$I_{bc} = -j2\sqrt{3}i_{a1}$$

Por lo tanto:

$$Z_{R-bc} = \frac{Z_1 + Z_2 - Z_{12} - Z_{21}}{2}$$

Para una L/T $Z_1 = Z_2$, entonces:

$$Z_{R-bc} = Z_1 - \frac{Z_{12} + Z_{21}}{2} \quad \text{Ec. 3.70}$$

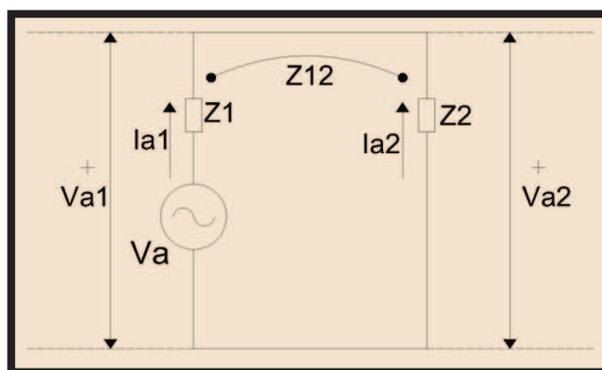


FIGURA 3.18 Red de secuencia falla bifásica "bc"

Se determina entonces que existirá un error en el cálculo de la impedancia desde el relé hacia el punto de falla, error que depende del acoplamiento entre las redes de secuencia.

De la tabla 3.4, si la L/T es totalmente transpuesta $Z_{12} = Z_{21} = 0$, por lo que efectivamente la impedancia vista por el relé es $Z_{R-bc} = Z_1$. Sin embargo y de la tabla 3.5 se observa que para la L/T sin transposición este acoplamiento existe y genera un error de aproximadamente:

$$\frac{\left| \frac{Z_{12} + Z_{21}}{2} \right|}{|Z_1|} = \frac{|Z_{12}|}{|Z_1|} = \frac{|0,013 - j0,007|}{|0,053 + j0,436|} * 100 = 3,4\%$$

Este error es muy pequeño y puede no ser considerado en la determinación de los ajustes de protecciones de distancia de las L/T.

Para el caso de fallas trifásicas, el error que presenta Z_R es cero, ya que interviene únicamente la red de secuencia positiva.

3.2.1.2 Fallas fase – tierra

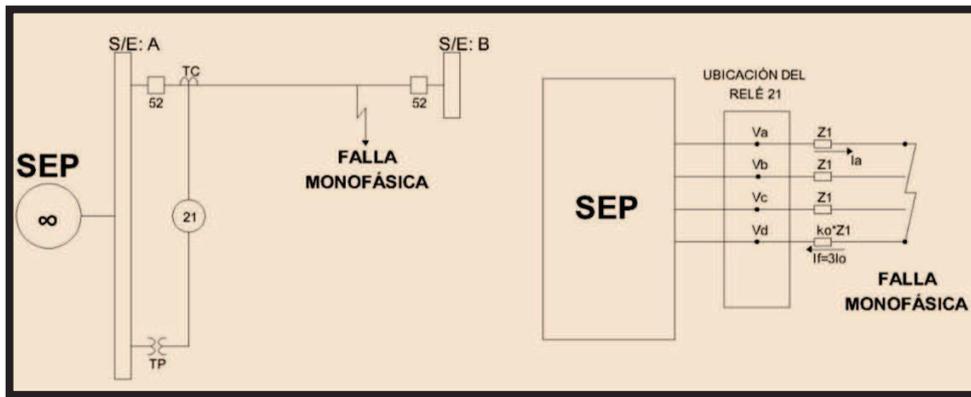


FIGURA 3.19 Falla monofásica “a”

La ecuación 2.6 determinaría que la impedancia vista por el relé es Z_1 , sin considerar los efectos de acoplamiento entre redes de secuencia. Sin embargo partiendo del diagrama de secuencias para una condición de falla monofásica “a”, figura 3.20, se tiene:

$$v_{a1} + v_{a2} + v_{a0} = 0; i_{a1} = i_{a2} = i_{a0}$$

$$i_{a1} + i_{a2} + i_{a0} = 3i_{a0} = I_a \rightarrow V_a = \frac{I_a}{3} (Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_{M012})$$

$$Z_{M012} = Z_{01} + Z_{10} + Z_{02} + Z_{20} + Z_{12} + Z_{21}$$

Para una L/T $Z_1 = Z_2$, con lo cual:

$$Z_\phi = \frac{V_a}{I_a} = \frac{2Z_1 + Z_0}{3} + \frac{Z_{M012}}{3} = Z_1(1 + k_0) + \frac{Z_{M012}}{3}$$

Entonces, para determinar Z_1 se requiere realizar la compensación del factor adicional que acompaña a este término, con lo cual el lazo de impedancia ante fallas monofásicas sería:

$$Z_1 = \frac{V_a}{I_a(1 + k_0)} - \frac{Z_{M012}}{3(1 + k_0)}$$

Los relés realizan el cálculo del primer término, por lo que el error dependerá exclusivamente del acoplamiento existente entre las redes de secuencia:

$$Z_R = Z_1 + \frac{Z_{M012}}{3(1+k_0)} \quad \text{Ec. 3.71}$$

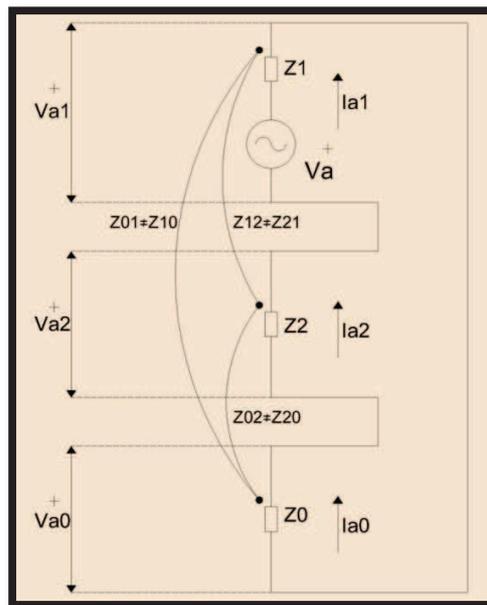


FIGURA 3.20 Red de secuencia falla monofásica "a"

Si la L/T es totalmente transpuesta $Z_{M012} = 0$, por lo que $Z_R = Z_1$. Sin embargo, y de la tabla 3.5, se observa que para el caso de una L/T no transpuesta este acoplamiento existe y produce un error de aproximadamente:

$$Z_{M012} = Z_{01} + Z_{10} + Z_{02} + Z_{20} + Z_{12} + Z_{21} = -0,019 + j0,021$$

$$k_0 = 0,755 - j0,162$$

$$\frac{\left| \frac{Z_{M012}}{3(1+k_0)} \right|}{|Z_1|} * 100 = 1,21\%$$

Como se puede observar el error depende directamente de las impedancias de acoplamiento entre las secuencias 0, 1 y 2, las cuales dependiendo de la disposición de los conductores y de las características de los conductores de fase y de guarda se contrarrestarán o no entre sí, lo cual producirá un aumento o disminución del error.

Este error es muy pequeño y puede no ser considerado en la determinación de los ajustes de protecciones de distancia de las L/T.

3.2.2 EFECTO DE ACOPAMIENTO EN L/T – DOBLE CIRCUITO

3.2.2.1 Análisis de fallas fase – fase

Para el caso de fallas fase – fase intervienen únicamente las redes de secuencia positiva y negativa por lo que se analizan únicamente los términos relacionados a estas redes.

3.2.2.1.1 Afectación en líneas sin trasposición

Un análisis similar al planteado en 3.2.1.1, permite establecer que para una falla bifásica “bc” en el circuito 1, la impedancia detectada por un relé sería:

$$Z_{R-bc} = Z_1 - \frac{Z_{12-c1} + Z_{21-c1}}{2} \pm \frac{I_{bc-c2}}{I_{bc-c1}} \left(Z_{11-c2c1} \pm \frac{Z_{12-c2c1} + Z_{21-c2c1}}{2} \right) \quad \text{Ec. 3.72}^{[3]}$$

Donde I_{bc-c1} e I_{bc-c2} representan las corrientes hacia la falla, para el caso corriente de línea b-c del circuito 1 y del circuito 2 respectivamente.

El signo \pm de esta ecuación, depende del sentido relativo entre las corrientes I_{bc-c1} e I_{bc-c2} , en consecuencia depende de la configuración del sistema. De manera general se aplica lo siguiente:

- El término es positivo cuando los aportes de corriente fluyen en la misma dirección.
- El término es negativo cuando los aportes de corriente fluyen en direcciones opuestas.

En base a lo indicado en la tabla 3.7, para el caso de una falla al 100% en el C1 de la L/T, sin fuente en el otro extremo I_{bc-c1} e I_{bc-c2} , tendrán la misma dirección y además aportan a la falla de forma equitativa, considerando esto se determina el error eZ en el lazo de medición:

$$Z_R = Z_1 - \frac{Z_{12-c1} + Z_{21-c1} - Z_{12-c2c1} - Z_{21-c2c1}}{2} + Z_{11-c2c1}$$

$$eZ = -\frac{Z_{12-c1} + Z_{21-c1} - Z_{12-c2c1} - Z_{21-c2c1}}{2} + Z_{11-c2c1}$$

$$\frac{|eZ|}{|Z_{1-c1}|} = \frac{|0,001 + j0,0157|}{|0,054 + j0,457|} * 100 = 3,5\%$$

3.2.2.1.2 Afectación en líneas con trasposición

De la tabla 3.6, para una L/T transpuesta se observa que no existe ningún acoplamiento entre redes de secuencia, por lo que la impedancia que mide el relé es:

$$Z_R = \frac{V_{bc-c1}}{I_{bc-c1}} = Z_1$$

Por lo tanto el error que se presenta en el relé es cero independientemente de los aportes de corriente hacia la falla I_{bc-c1} e I_{bc-c2} .

3.2.2.2 Análisis de fallas fase - tierra

En las fallas fase – tierra intervienen las redes de secuencia positiva, negativa y cero.

3.2.2.2.1 Afectación en líneas sin transposición

Un análisis similar al planteado en 3.2.1.2, permite establecer para el caso de una falla fase – tierra “a”, en el circuito 1, la impedancia detectada por el relé sería:

$$Z_{R-a} = \frac{V_{a-c1}}{I_{a-c1}(1+k_0)} = Z_1 + \frac{Z_{M012-c1}}{3(1+k_0)} \pm \frac{I_{n-c2}}{I_{a-c1}} \left(\frac{Z_{M012-c2c1} + Z_{012-c2c1}}{3(1+k_0)} \right) \quad \text{Ec. 3.73}^{[3]}$$

Dónde:

$$\begin{aligned} Z_{M012-c1} &= Z_{01-c1} + Z_{10-c1} + Z_{02-c1} + Z_{20-c1} + Z_{12-c1} + Z_{21-c1} \\ Z_{M012-c2c1} &= Z_{01-c2c1} + Z_{10-c2c1} + Z_{02-c2c1} + Z_{20-c2c1} + Z_{12-c2c1} + Z_{21-c2c1} \\ Z_{012-c2c1} &= Z_{00-c2c1} + Z_{11-c2c1} + Z_{22-c2c1} \end{aligned}$$

I_{a-c1} e I_{n-c2} representan las corrientes hacia la falla, corriente de fase a del circuito 1 y de neutro del circuito 2 respectivamente. El signo \pm de esta ecuación, depende del sentido relativo de las corrientes I_{a-c1} e I_{n-c2} , aplicando lo indicado en 3.2.2.1.1.

Partiendo de la tabla 3.7, para el caso de una falla al 100% en el C1 de la L/T, sin fuente en el otro extremo $I_{a-c1} = I_{n-c2}$, con lo cual se puede determinar la impedancia detectada Z_R y el error e_Z en el lazo de medición ante fallas fase – tierra:

$$Z_{R-a} = Z_1 + \frac{Z_{M012-c1} + Z_{M012-c2c1} + Z_{012-c2c1}}{3(1 + k_0)}$$

$$eZ = \frac{Z_{M012-c1} + Z_{M012-c2c1} + Z_{012-c2c1}}{3(1 + k_0)}$$

$$Z_{M012-c1} = -0,040 + j0,066$$

$$Z_{M012-c2c1} = -0,040 + j0,066$$

$$Z_{012-c2c1} = 0,332 + j0,733$$

$$\frac{|eZ|}{|Z_{1-c1}|} = \frac{\left| \frac{0,251 + j0,865}{4,710 - j0,518} \right|}{|0,054 + j0,457|} * 100 = 41,3\%$$

3.2.2.2.2 Afectación en líneas con transposición

De la tabla 3.6, se observa que únicamente existe el acoplamiento entre la red secuencia cero correspondiente $Z_{00-c2c1}$, por lo tanto el lazo de impedancia para el caso de una falla fase – tierra será:

$$Z_{R-a} = Z_1 \pm \frac{I_{n-c2}}{I_{a-c1}} \left(\frac{Z_{00-c2c1}}{3(1 + k_0)} \right)$$

Para el caso de una falla al 100% en el C1 de la L/T, sin fuente en el otro extremo $I_{a-c1} = I_{n-c2}$, y en base a la tabla 3.6, se puede determinar la impedancia detectada Z_R y el error eZ en el lazo de medición ante fallas fase – tierra:

$$Z_{R-a} = Z_1 + \left(\frac{Z_{00-c2c1}}{3(1 + k_0)} \right)$$

$$eZ = \left(\frac{Z_{00-c2c1}}{3(1 + k_0)} \right)$$

$$\frac{|eZ|}{|Z_{1-c1}|} = \frac{|0,330 + j0,712|}{|4,710 - j0,518|} = 35\%$$

Para el casos de una falla monofásicas en L/T de doble circuito transpuestas y no transpuestas, se puede apreciar que el error que produce el acoplamiento existente no es despreciable, razón por la cual es necesaria la compensación ante este efecto.

3.2.2.3 Mecanismos de compensación del efecto mutuo

De los análisis realizados en 3.2.1 y 3.2.2, se puede establecer la siguiente tabla comparativa ante cortocircuitos al final de una L/T, en consecuencia se establece el máximo error que puede presentarse debido a los acoplamientos existentes.

El error que se presenta corresponde a la diferencia entre la impedancia detectada por el relé mediante los algoritmos convencionales y la impedancia real existente entre el relé y el punto de falla.

ESTRUCTURA		ERROR [%]	
		FALLA FASE – FASE	FALLA FASE – TIERRA
CIRCUITO SIMPLE	CON TRANPOSICIÓN	0	0
	SIN TRANPOSICIÓN	3,3	1,21
CIRCUITO DOBLE	CON TRANPOSICIÓN	0	35
	SIN TRANPOSICIÓN	3,5	41,3

TABLA 3.19 Errores por el cálculo de cortocircuitos

3.2.2.3.1 Compensación ante fallas fase – fase

Como se puede observar en la tabla 3.19, el máximo error se produce para una L/T doble circuito sin transposición es del orden del 4% para una falla bifásica, este error es relativamente bajo para efectos de ajuste de protecciones. Por esta razón los relés que existen en el mercado no realizan la corrección para este tipo de fallas. En el caso de requerirse compensación fase – fase, el relé debería realizar la siguiente relación:

$$Z_{R-bc} = \frac{V_{bc-c1}}{I_{bc-c1}(1-k_{M12-c1}) \pm I_{bc-c2}(k_{12-c2c1} \pm k_{M12-c2c1})} \quad \text{Ec. 3.74}^{[3]}$$

$$k_{M12-c1} = \frac{Z_{12-c1} + Z_{21-c1}}{2Z_1}$$

$$k_{12-c2c1} = \frac{Z_{11-c2c1}}{Z_1}; \quad k_{M12-c21c} = \frac{Z_{12-c2c1} + Z_{21-c2c1}}{2Z_1}$$

Según la tabla 3.6, si se considera una L/T transpuesta no es necesaria la compensación, ya que las impedancias mutuas entre circuitos se anulan:

$$Z_{R-bc} = \frac{V_{bc-c1}}{I_{bc-c1}}$$

3.2.2.3.2 Compensación ante fallas fase – tierra

De la tabla 3.19, se observa que el error en el caso de una L/T circuito simple, con o sin transposición puede ser omitido para efectos de ajuste de protecciones. Sin embargo para una L/T doble circuito si se requiere corregir este error (subalcance⁸ del 41%). Esto se realiza mediante compensación fase – tierra utilizando la siguiente relación:

⁸ La configuración de la zona más corta de la protección 21, genera un alcance menor que el de la sección protegida

$$Z_{R-a} = \frac{V_{a-c1}}{I_{a-c1}(1+k_0+k_{M012-c1}) \pm I_{n-c2}(k_{M012-c2c1}+k_{012-c2c1})} \quad \text{Ec. 3.75}^{[3]}$$

$$k_{M012-c1} = \frac{Z_{M012-c1}}{3Z_1}; \quad k_{M012-c2c1} = \frac{Z_{M012-c2c1}}{3Z_1}; \quad k_{012-c2c1} = \frac{Z_{012-c2c1}}{3Z_1}$$

Considerando que el error depende en su totalidad de los acoplamientos entre circuitos de redes de secuencia correspondientes la compensación es:

$$Z_{R-a} = \frac{V_{a-c1}}{I_{a-c1}(1+k_0) \pm I_{n-c2} * k_{012-c2c1}}$$

Al término $k_{012-c2c1}$ se lo conoce como constante de acoplamiento mutuo k_m y la mayoría de relés existentes en el mercado realizan esta corrección para este tipo de fallas. Se debe mencionar que k_0 y k_m resultan ser cantidades complejas, es decir magnitud y ángulo.

3.2.2.4 Puesta a tierra de una L/T

Cuando una L/T sale de servicio por mantenimiento, generalmente y por seguridad del personal se aterriza en ambos extremos (figura 3.21), en este escenario y ante fallas con contacto a tierra, los acoplamientos mutuos generan una corriente inducida que circula por la L/T aterrizada.

Esta corriente produce un subalcanse o sobrealcanse⁹, que depende de las condiciones del sistema, del diseño de la subestación y del sistema de protecciones.

Un relé con compensación del efecto mutuo determina la siguiente relación:

$$Z_{R-a} = \frac{V_{a-c1}}{I_{a-c1}(1+k_0) \pm I_{n-c2} * k_m}$$

⁹ La configuración de la zona más corta de la protección 21, tiene un alcance mayor al de la zona protegida

Para el caso de relés alimentados por transformadores de corriente, ubicados después de la puesta a tierra (TC's tipo pedestal) figura 3.21, estos continuarán detectando la corriente inducida en el circuito aterrizado, con lo que la compensación paralela ante fallas monofásicas km efectivamente corrige el error de medición de impedancia producido por el acoplamiento.

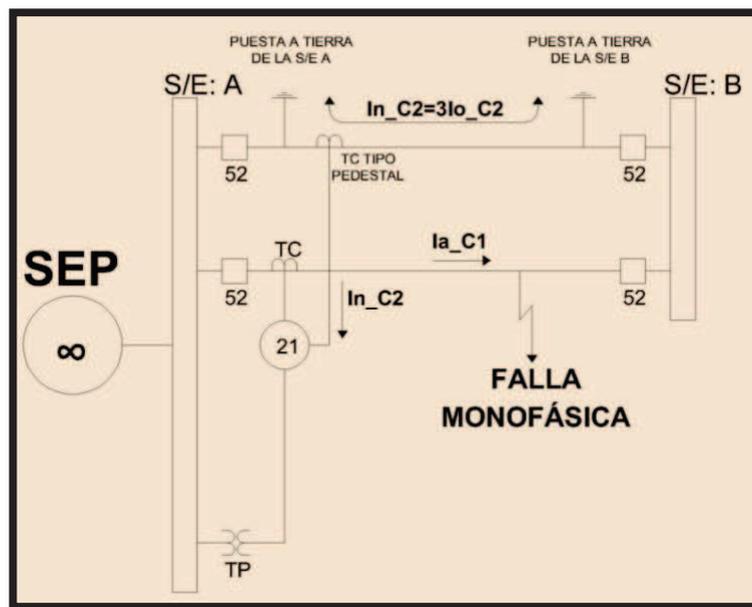


FIGURA 3.21 L/T aterrizada en los extremos. TC's tipo pedestal

Esta situación no sucede para el caso de los TC's que se encuentran antes de la puesta a tierra (TC's tipo bushing) figura 3.22, con lo cual la corriente de línea hacia el relé es cero, consecuentemente la compensación mutua no se realiza.

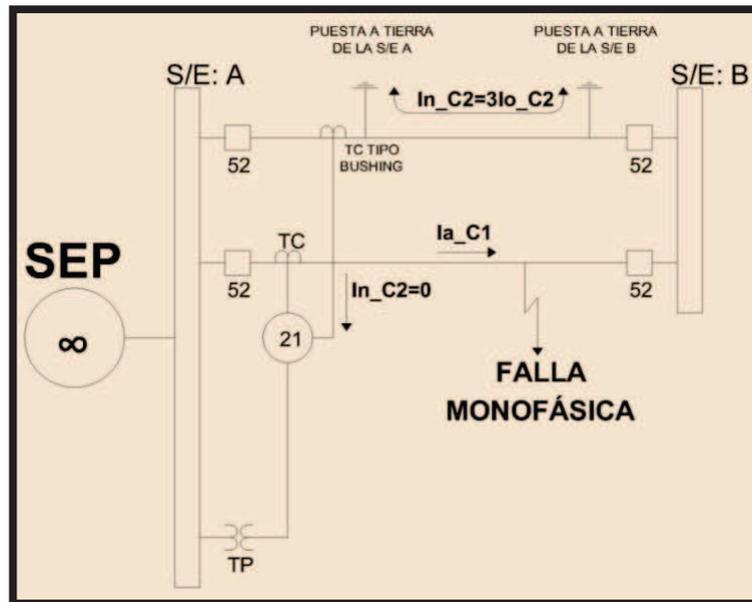


FIGURA 3.22 L/T aterrizada en los extremos. TC's tipo bushing

Esta corriente generada por el acoplamiento entre L/T, produce un error en el lazo de medición de impedancia que ya se determinó en 3.2.2.2.1. Considerando una L/T transpuesta y si se asume que el efecto de los acoplamientos $Z_{012-C2C1}$ corresponde en su totalidad al acoplamiento en secuencia cero $Z_{00-C2C1}$, se tiene:

$$Z_{R-a} = Z_1 \left(1 \pm \frac{I_{n-C2}}{I_{a-C1}} \left(\frac{k_m}{1+k_0} \right) \right) \quad \text{Ec. 3.76}$$

Del diagrama de secuencias mostrado en la figura 3.23, se determina la corriente de neutro en la línea aterrizada I_{n-C2} por efecto de la circulación de la corriente de falla monofásica en el circuito paralelo I_{a-C1} , la cual es:

$$I_{n-C2} = I_{a-C1} * \frac{Z_{00-C2C1}}{Z_{0-C2}} * \frac{d}{L} \quad \text{Ec. 3.77}$$

Se observa que la corriente de neutro en la línea aterrizada I_{n-C2} depende de la impedancia de secuencia cero correspondiente entre circuitos $Z_{00-C2C1}$ y de la impedancia de secuencia cero de la línea aterrizada Z_{0-C2} . La primera afectada por el

término “d” que representa la distancia en que se produce la falla, y consecuentemente determina el voltaje inducido en el tramo de la L/T acoplada, mientras que la segunda es afectada por el término “L”, y es la longitud total de la L/T y representa el camino efectivo independiente del punto de falla, por el que circula la corriente inducida.

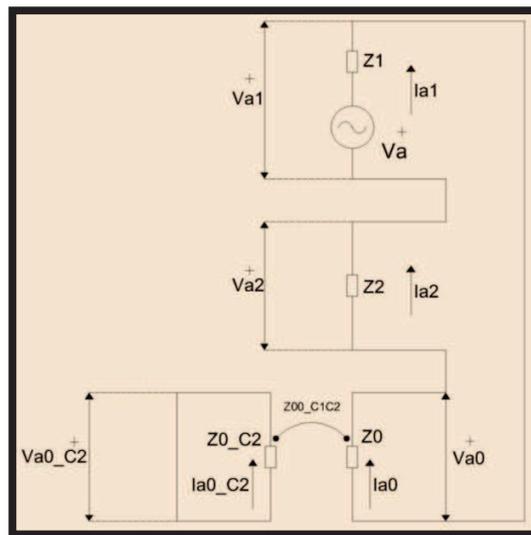


FIGURA 3.23 Diagrama de secuencias: falla monofásica en C1 y C2 aterrizada

Para el caso de un sistema con fuente débil en el otro extremo de la L/T, la impedancia medida es:

$$Z_{R-a} = Z_1 \left(1 - \frac{Z_{00-c2c1}}{Z_{0-c2}} * \frac{d}{L} \left(\frac{k_m}{1+k_0} \right) \right) = Z_1 \left(1 - \frac{Z_{00-c2c1}^2}{Z_{0-c2}(2Z_1+Z_0)} * \frac{d}{L} \right) \quad \text{Ec. 3.78}$$

Se observa que el relé se mantiene en un sobrealcance durante una falla monofásica en cualquier punto del circuito. De la tabla 3.6, el sobrealcance al final de la L/T es de:

$$eZ = - \frac{Z_{00-c2c1}^2}{Z_{0-c2}(2Z_1 + Z_0)}$$

$$eZ = - \left| \frac{(0,330 + j0,712)^2}{(0,383 + j1,183)(2(0,054 + j0,471) + (0,383 + j1,183))} \right| \approx 0,23Z_1$$

Es decir, se genera un 23% de sobrealcance, con lo que se puede producir descoordinación de protecciones.

El fenómeno de afectación de los alcances por L/T aterrizadas ocurrirá de manera similar si se utilizan tierras locales para la realización del mantenimiento de la L/T (figura 3.24).

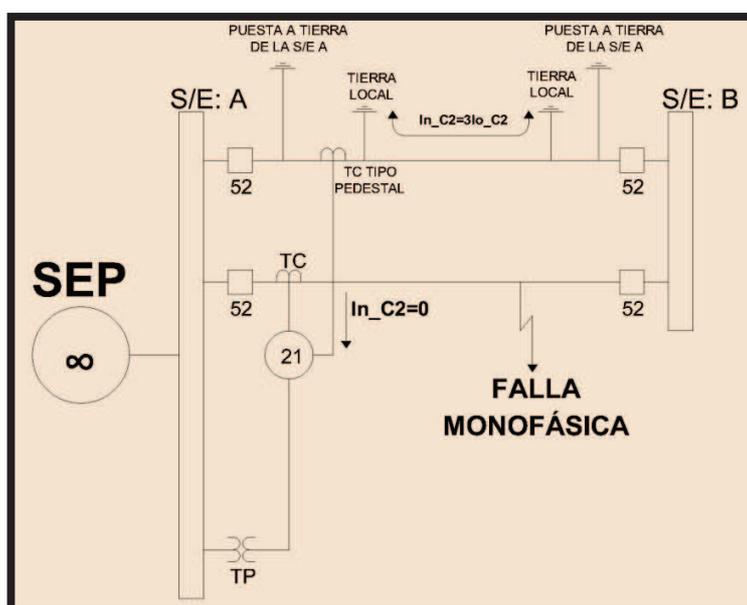


FIGURA 3.24 L/T aterrizada mediante tierras locales

Sin embargo, los tiempos en los cuales se realiza un mantenimiento son generalmente cortos por lo que el reajuste de los relés puede no ser realizado debido a la probabilidad de falla durante este tiempo. En el caso de periodos de mantenimiento más grandes se debe analizar la necesidad de reajustar las protecciones.

3.3 ACOPLAMIENTO EXISTENTE EN LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV – AFECTACIÓN A LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDNACIA 87B DE LA S/E MACHALA 138 kV

3.3.1 ATERRIZAMIENTO DE LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV

Partiendo del principio de la protección diferencial de barra y aplicando a la S/E Machala 138 kV (figura 3.25) tenemos:

$$I_{diff} = |I_{S/I1} + I_{S/I2} + I_{ATR} + I_{ATQ}| \quad \text{Ec. 3.79}$$

$$I_{res} = |I_{S/I1}| + |I_{S/I2}| + |I_{ATR}| + |I_{ATQ}| \quad \text{Ec. 3.80}$$

En donde:

$I_{S/I1}$ = Muestra de corriente de la Bahía San Idelfonso 1

$I_{S/I2}$ = Muestra de corriente de la Bahía San Idelfonso 2

I_{ATR} = Muestra de corriente de la Bahía ATR 138 kV

I_{ATQ} = Muestra de corriente de la Bahía ATQ 138 kV

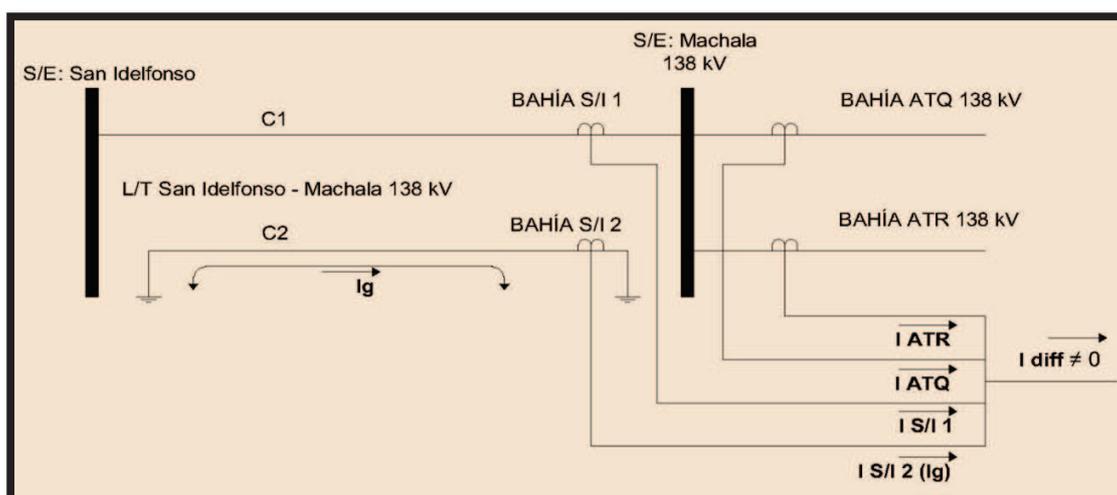


FIGURA 3.25 Aterrizamiento del circuito 2 de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV

El detalle de la S/E Machala 138 kV se lo realiza en el siguiente capítulo, en esta parte del proyecto simplemente se explica cómo afecta el aterrizamiento de la L/T en estudio a la protección 87B.

Como de observa en la figura 3.25, la S/E Machala está constituida por 4 bahías:

- San Idelfonso 1
- San Idelfonso 2
- ATQ 138 kV
- ATR 138 kV

Cuando el SEP está en estado normal todas las bahías de una S/E deben estar conectadas a su barra, en este caso las 4 bahías deben estar conectadas a la barra de la S/E Machala. Con esto se está cumpliendo el principio de la protección diferencial:

$$I_{diff} = |I_{S/I1} + I_{S/I2} + I_{ATR} + I_{ATQ}| = 0 \quad \text{Ec. 3.81}$$

Por otra parte, al aterrizar uno de los circuitos la L/T (figura 3.25), se está desconectando una bahía de la barra de la S/E Machala, esto hace que el flujo de potencia que se encontraba circulando por los dos circuitos de la L/T, ahora debe ser abastecido solo por uno, en condiciones ideales se debería cumplir lo siguiente:

$$I_{S/I2} = 0$$

$$I_{diff} = |I_{S/I1} + I_{ATR} + I_{ATQ}| = 0 \quad \text{Ec. 3.82}$$

Pero con el estudio realizado en 3.1.3.3, al aterrizar el circuito 2 de la L/T en este se genera una corriente inducida magnéticamente, la cual forma una malla cerrada con tierra, tomando los valores de la ecuación 3.51.

Esta corriente influye directamente en la protección 87B debido a la ubicación de los TC's. Con esta explicación, el principio de la protección diferencial es afectado de la siguiente manera:

$$I_{S/I 2} = I_g$$

$$I_{diff} = |I_{S/I 1} + I_g + I_{ATR} + I_{ATQ}| = I_g \quad \text{Ec. 3.83}$$

Dónde:

I_g = Corriente inducida en la L/T aterrizada

Como se puede observar en la ecuación 3.83, la corriente de operación o diferencial (I_{diff}) toma el valor de la corriente inducida en el circuito aterrizado (I_g), afectando directamente en la operación de la protección 87B. Esto puede ocasionar que el relé opere de manera incorrecta, interpretando a esta maniobra como una falla.

Con respecto a la corriente de restricción (I_{res}), el aterrizamiento de la L/T no influye, ya que la suma de la corriente inducida simplemente se interpreta como un aumento de carga.

CAPÍTULO IV

4 APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BAJA IMPEDANCIA EN LA BARRA DE 138 kV DE LA SUBESTACIÓN DE MACHALA

4.1 MODELACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL RELE DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA – APLICACIÓN A LA S/E MACHALA 138 kV

La modelación del SEP y de la protección diferencial de barra se la realiza en el software ATP.

Por otra parte la implementación del algoritmo digital que utiliza el módulo 7SS601 de Siemens se lo realiza en MATLAB.

4.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA A MODELARSE

El principal objetivo de realizar la modelación en ATP es obtener las señales de corriente diferencial y restricción. La figura 4.1 indica el modelo del relé diferencial de baja impedancia con dos bahías, en la cual se muestran sus diferentes componentes:

- Los transformadores de corriente (TC's)
- El módulo 4AM5120 -1DA/-2DA
- El módulo 7TM70
- El módulo 7SS601

Para este modelo de relé, la corriente diferencial y la corriente de restricción son compradas por fase, es decir se tendrá tres señales de cada corriente, como se indica en la figura 4.1.

Una vez modelada la protección diferencial en ATP, se obtiene el archivo *.pl4 mediante simulación, este archivo contiene las señales de corrientes diferencial y de restricción.

Con la ayuda del software The Output Procesor (TOP), se procesa el archivo *.pl4 al estándar COMTRADE.

La finalidad de tener los archivos en formato COMTRADE, es porque las oscilografías que capturan los IED's en las diferentes subestaciones son de este tipo, además de la facilidad que presentan estos archivos para interactuar con diferentes software.

El módulo 7SS601 es representado por la rutina de programación Análisis de la Protección Diferencial de Barras (APDB – 87B (2.0)) la cual se detalla en 4.1.3.

Una vez procesadas las señales de corriente diferencial y de restricción al estándar COMTRADE, APDB – 87B (2.0) lee este tipo de archivos para el posterior análisis de la operación del relé.

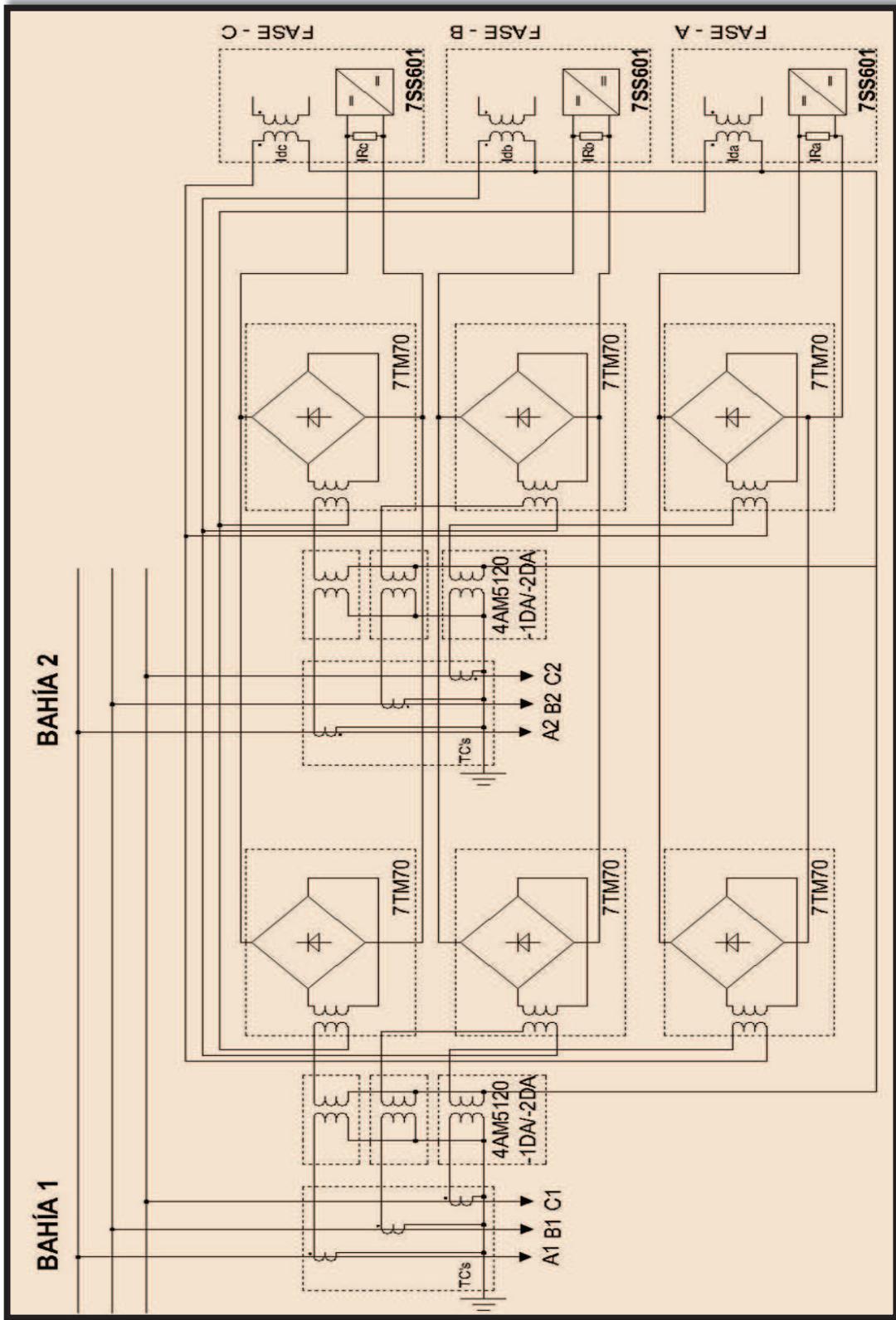


FIGURA 4.1 Modelo de 2 bahías del relé diferencial de barra de baja impedancia

4.1.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA EN ATP

4.1.2.1 Descripción General del SEP

El SEP correspondiente a la zona de Molino – Milagro, se muestra en el siguiente diagrama unifilar:

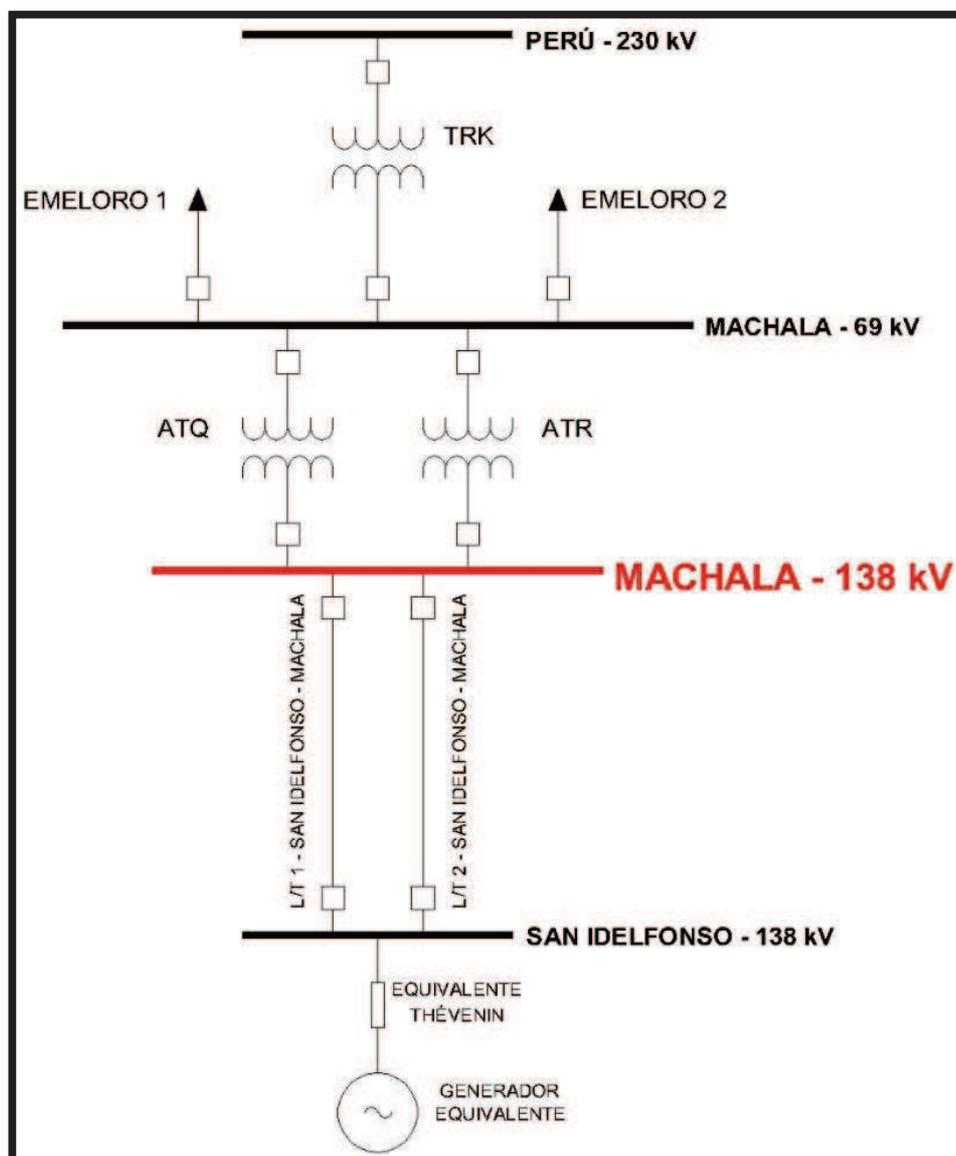


FIGURA 4.2 Diagrama unifilar del SEP a modelarse

Como se indica en la figura 4.2, los componentes del SEP son:

- Las barras de San Idelfonso y Machala a 138 kV, la barra de Machala a 69 kV y la barra que se conecta con Perú a 230 kV.
- El equivalente del SNI hasta San Idelfonso – 138 kV
- La L/T doble circuito San Idelfonso – Machala 138 kV
- Los transformadores ATQ, ATR y TRK que se localizan en las barras de la S/E Machala 13.8/69/230 kV
- Las cargas Emeloro 1 y 2

4.1.2.2 Descripción de las bahías de 138 kV

El patio de 138 kV de la S/E Machala consta de un esquema de barras principal y de transferencia, el cual para efectos de simulación y análisis puede ser representado como un esquema de barra simple. La capacidad de la barra es de 200 MVA.

Las bahías que se encuentran conectadas a la barra de 138 kV de la S/E Machala, son las siguientes:

- Bahía L/T San Idelfonso 1
- Bahía L/T San Idelfonso 2
- Bahía banco de autotransformador ATQ 138 kV
- Bahía banco de autotransformador ATR 138 kV

4.1.2.3 Modelación de la protección diferencial de barra de baja impedancia

4.1.2.3.1 Esquema de Barras

En ATP una barra se la puede dibujar como una línea simple, la cual representa las tres fases.

4.1.2.3.2 Generador

Los datos del generador y el equivalente Thévenin del sistema visto desde Ecuador para la barra de San Idelfonso 138 kV, se muestran en la tabla 4.1.

GENERADOR EQUIVALENTE	SAN IDELFONSO	UNIDAD
Voltaje Pico	$\frac{138}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 112,677$	kV
Frecuencia	60	Hz
Número de Fases	3	
Impedancia de Secuencia Positiva (Z1)	$2,22 + j * 22,39$	Ω
Impedancia de Secuencia Cero (Z0)	$4,73 + j * 26,74$	Ω

TABLA 4.1 Parámetros para el generador equivalente

En ATP, el generador y el equivalente Thévenin se representan colocando una fuente en serie con una impedancia (figura 4.3).

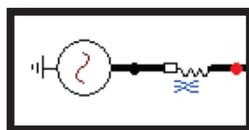


FIGURA 4.3 Representación del generador equivalente en ATP

4.1.2.3.3 L/T San Idelfonso – Machala 138 kV

Los datos de las especificaciones eléctricas y la geometría de la L/T se presentan en las tablas 3.8 y 3.9 respectivamente. La modelación de la L/T en ATP se la realiza con la rutina LCC, la cual presenta una gran variedad de propiedades para el fácil manejo e interpretación de una L/T.

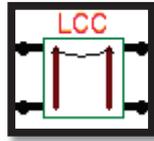


FIGURA 4.4 Modelo de L/T de ATP

Una vez escogido el modelo LCC, es necesario ingresar los parámetros de la L/T. El modelo se lo realiza para la longitud real de la línea que es de 21 km.

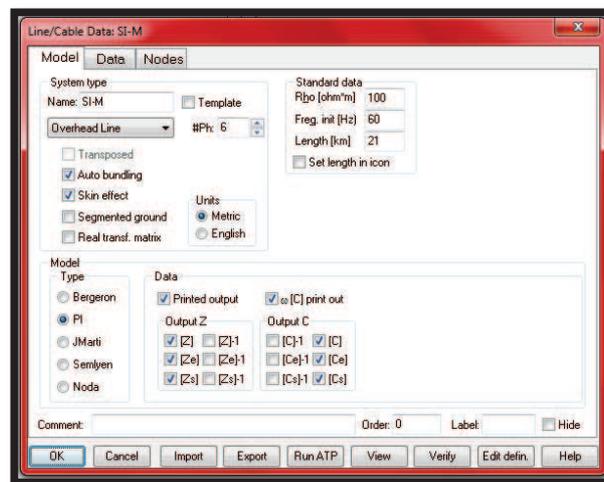


FIGURA 4.5 Modelo de la L/T en ATP

#	Ph.no.	Rin	Rout	Rsis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0	0.9805	0.1373	-2.2	16.4	7.5	0	0	1
2	2	0	0.9805	0.1373	-2.2	20	11.1	0	0	1
3	3	0	0.9805	0.1373	-2.2	23.6	14.7	0	0	1
4	4	0	0.9805	0.1373	2.2	16.4	7.5	0	0	1
5	5	0	0.9805	0.1373	2.2	20	11.1	0	0	1
6	6	0	0.9805	0.1373	2.2	23.6	14.7	0	0	1
7	0	0	0.62	1.03	0	28.15	26	0	0	1

FIGURA 4.6 Parámetros de la L/T ingresados en ATP

La rutina LCC de ATP, también permite ver de manera gráfica la geometría que posee la L/T según los datos ingresados, como se indica en la figura 4.7.

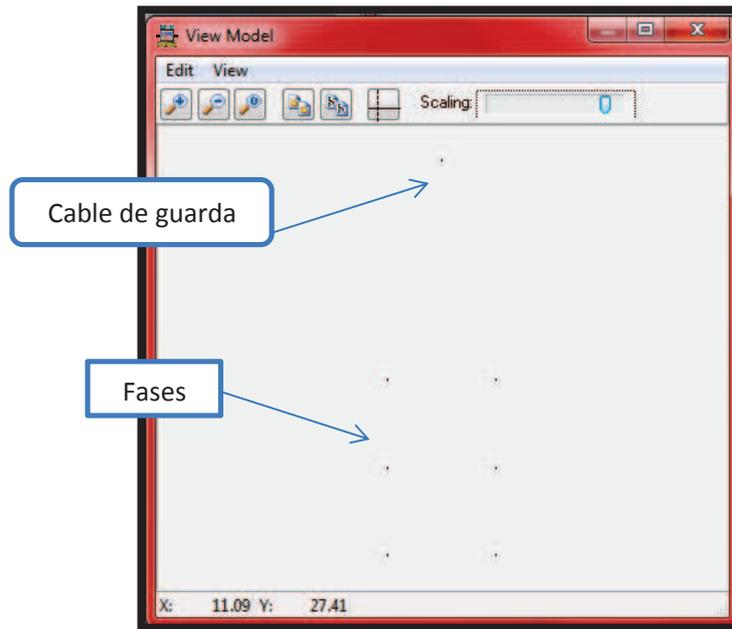


FIGURA 4.7 Geometría de la L/T en ATP

El modelo LCC, permite además realizar el cálculo de las impedancias de la L/T:

Short circuit impedances and open circuit line charging						
Circuit	R0 [ohm]	X0 [ohm]	R+ [ohm]	X+ [ohm]	Q0 [MVA]	Q+ [MVA]
1	8.889	31.01	2.925	10.06	0.7566	1.383
2	8.889	31.01	2.925	10.06	0.7566	1.383

Zero sequence transfer impedance		
Circuit	R00 [ohm]	X00 [ohm]
1-2	5.992	19.81

Calculated at frequency [Hz]: 60
Reference line voltage [kV]: 138

FIGURA 4.8 Impedancias de la L/T calculadas por ATP

4.1.2.3.4 Transformadores de potencia ^[6]

Para la modelación de los transformadores de potencia, ATP ofrece una variedad de modelos, tales como Saturable, BCTRAN y XFMR. En este estudio se utilizó el modelo “transformador híbrido” (XFMR).

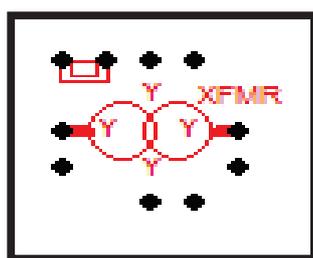


FIGURA 4.9 Modelo “transformador híbrido” (XFMR) de ATP

- **Autotransformadores ATQ 138/69/13.8 kV – ATR 138/69/13.8 kV**

Los Autotransformadores ATQ y ATR presentan las mismas características de operación. Los autotransformadores en la subestación constan de un banco de autotransformadores monofásicos, conectados en YYD de las mismas características.

A continuación se presenta los datos de placa de los autotransformadores ATQ y ATR:

MITSUBISHI	AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO	
Potencia nominal 20/26,7/33,3 MVA	Voltaje nominal 138/69/13.8 kV	Norma ANSI – C57.12.00
Frecuencia: 60 Hz	Enfriamiento: ONAN/ONAF1/ONAF2	Numero de fases: monofásico

TABLA 4.2 Datos de placa de los autotransformadores ATQ y ATR

La figura 4.10 muestra la ventana principal del modelo XFMR, en la cual se encuentran los datos de las pruebas de cortocircuito y vacío de los transformadores ATQ y ATR una vez que han sido ingresados.

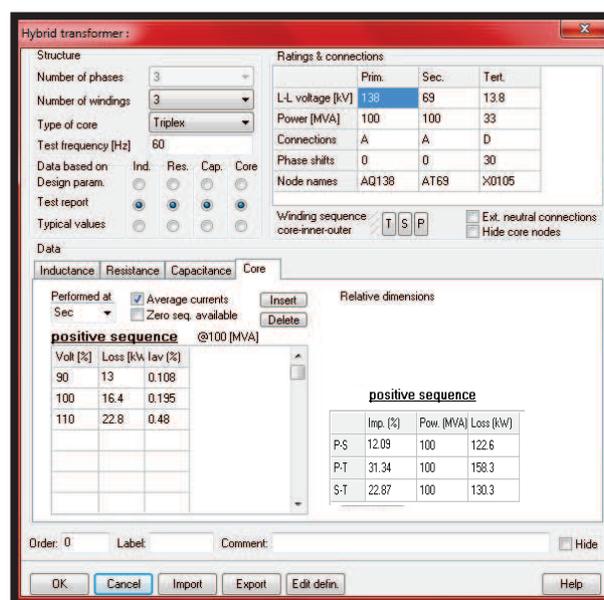


FIGURA 4.10 Datos de los autotransformadores ATQ y ATR

- **Transformador TRK 230/69/13.8 kV**

El transformador en la subestación consta de un banco de transformadores monofásicos conectados en YYD de las mismas características. A continuación se presenta los datos de placa del transformador TRK:

MITSUBISHI	TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	
Potencia nominal 33,33/44,4/55,5 MVA	Voltaje nominal 230/69/13.8 kV	Norma ANSI – C57.12.00
Frecuencia: 60 Hz	Enfriamiento: ONAN/ONAF1/ONAF2	Numero de fases: monofásico

TABLA 4.3 Datos de placa del transformador TRK

La figura 4.11 muestra la ventana principal del modelo XFMR, en la cual se encuentran los datos de las pruebas de cortocircuito y vacío del transformador TRK ya ingresados.

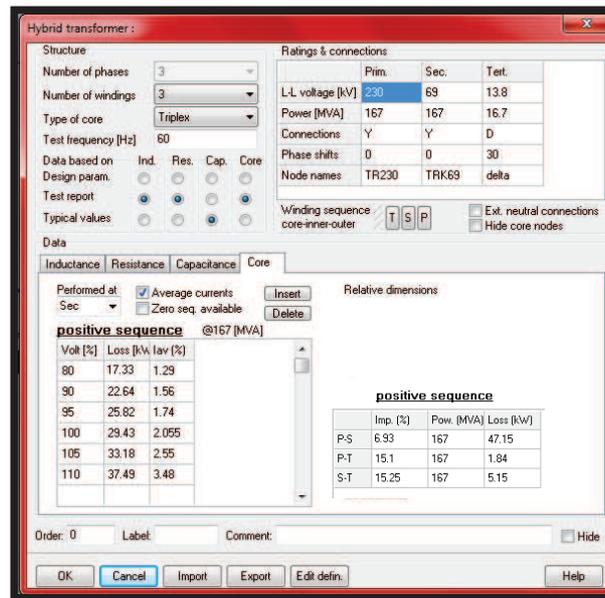


FIGURA 4.11 Datos del transformador TRK

4.1.2.3.5 Cargas

Para la representación de las cargas se utiliza un modelo de impedancia fija, como se describe en la ecuación 4.1, para la potencia activa y para la potencia reactiva descrita en la ecuación 4.2.

$$R = V^2/P \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$X = V^2/Q \quad \text{Ec. 4.2}$$

Los valores de resistencia e inductancia que se obtienen mediante las ecuaciones 4.1 y 4.2 deben ser representados por fase, por lo cual es necesario dividirlos por 3.

Los valores de potencias activa y reactiva de las cargas Emeloro 1 y 2 con los cuales se definieron las impedancias para realizar la simulación se encuentran indicados en la tabla 4.4.

	P [MW]	Q [MVA_r]	R [Ω]	L [Ω]	R/3 [Ω]	L/3 [Ω]
Emeloro 1	27,29	7,96	174,46	598,15	58,15	199,39
Emeloro 2	81,82	23,87	58,19	199,38	19,38	66,42

TABLA 4.4 Impedancias para la simulación de carga en ATP

El modelo de carga que se utilizó en ATP para representar una impedancia trifásica se indica en la figura 4.14.

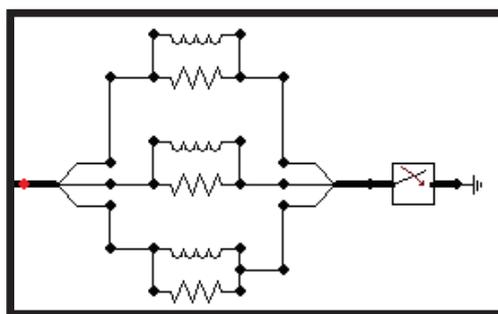


FIGURA 4.12 Modelo de impedancia fija trifásica en ATP

4.1.2.3.6 Transformadores de Corriente

Para la modelación de los transformadores de corriente se utiliza el modelo “Saturable 1 phase” de ATP, el cual brinda la posibilidad de ingresar los datos de prueba realizados en la fábrica, los cuales incluyen:

- Curva de saturación
- Resistencias y reactancias de los devanados

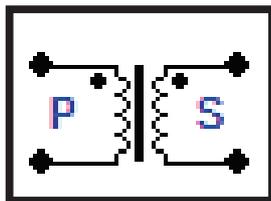


FIGURA 4.13 Saturable 1 phase

Los TC's existentes en la S/E Machala 138 kV presentan las siguientes relaciones de transformación:

- 600/5 colocados en las bahías del autotransformador ATR 138 kV, y los dos circuitos de la L/T San Idelfonso.
- 800/5 colocados en la bahía del autotransformador ATQ 138 kV.

4.1.2.3.7 Transformadores de interposición (4AM5120 -1DA/-2DA)^[9]

Para el caso de la S/E Machala 138 kV, los transformadores de interposición se encargan de reducir la corriente que proviene del secundario de los TC' de las diferentes bahías conectadas a la barra, con el fin de igualar estas corrientes, ya que los TC's de las diferentes bahías no poseen la misma relación de transformación.

Con las corrientes de las bahías ya igualadas y mediante su suma fasorial se obtendrá la corriente diferencial igual a cero.

Los transformadores de interposición se caracterizan por tener un bobinado primario en el cual se ajusta el número de vueltas y un bobinado secundario con el número de vueltas fijo.

Para el caso de Machala 138 kV, el módulo 4AM5120 actúa por fase, es decir existe un módulo por cada fase, razón por la cual se tendrá tres señales de corriente diferencial y tres de corriente de restricción.

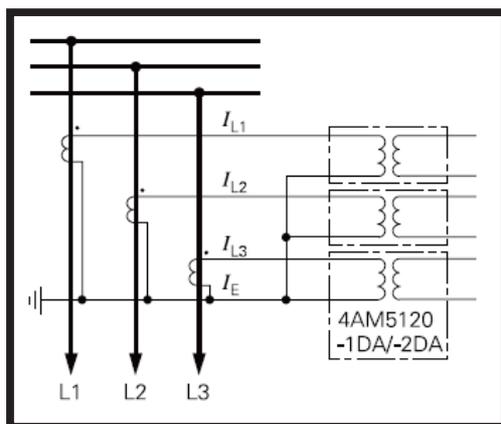


FIGURA 4.14 Módulo 4AM5120 -1DA/-2DA

El número de vueltas del devanado primario del módulo depende de la relación de los TC's que se encuentran instalados.

Para la protección diferencial por fases, el fabricante ofrece dos tipos de módulos 4AM5120, el 1DA y el 2DA.

El módulo 4AM5120 – 1DA es para los TC's con corrientes secundarias de 1 A, mientras que el módulo 4AM5120 – 2DA es para los TC's con corrientes secundarias de 5 A.

A continuación se presenta la distribución de espiras (número de vueltas) que presentan este tipo de transformadores de interposición:

4AM5120 – 1AD	Bobinados						
	Primario						Secundario
Devanado	A – B	B – C	D – E	E – F	G – H	H – J	Y – Z
Número de vueltas	1	2	4	8	16	32	500

TABLA 4.5 Relación de espiras del módulo 4AM5120 – 1AD

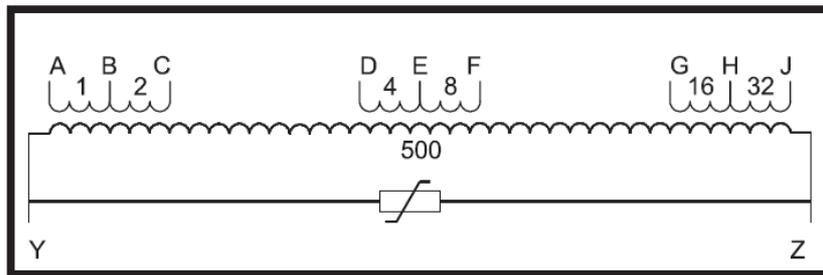


FIGURA 4.15 Transformador de interposición 4AM5120 – 1DA00 – 0AN2 para corrientes secundarias de 1A

4AM5120 – 2AD	Bobinados				
	Primario				Secundario
Devanado	A – B	B – C	D – E	E – F	Y – Z
Número de vueltas	1	2	4	8	500

TABLA 4.6 Relación de espiras del módulo 4AM5120 – 2AD

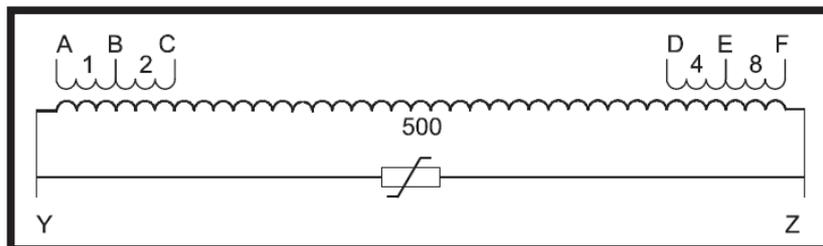


FIGURA 4.16 Transformador de interposición 4AM5120 – 2DA00 – 0AN2 para corrientes secundarias de 5A

Para los transformadores de corriente de la S/E Machala 138 kV, los cuales tienen una relación de transformación con una corriente secundaria de 5 A, se utiliza el módulo 4AM5120 – 2AD.

- **Relación de los transformadores de interposición para la S/E Machala 138 kV**

Las bahías ATR 138 kV, L/T San Idelfonso 1 y L/T San Idelfonso 2, poseen transformadores de corrientes con una relación de transformación 600/5. Por otra parte la bahía ATQ 138 kV, posee transformadores de corrientes con una relación de transformación 800/5.

En la tabla 4.7 y en la figura 4.17 se presenta a detalle el número de vueltas que tiene cada bobinado de los transformadores de interposición, para las bahías de Machala 138 kV.

ATR 138 kV L/T San Idelfonso 1 L/T San Idelfonso 2	RELACIÓN 600/5			
		Fases	Devanados	Número de vueltas
	PRIMARIO	A	B – C D – E	6
		B	B – C D – E	6
C		B – C D – E	6	
SECUNDARIO	A	X – Y	500	
	B	X – Y	500	
	C	X – Y	500	
ATQ 138 kV	RELACIÓN 800/5			
		Fases	Devanados	Número de vueltas
	PRIMARIO	A	E – F	8
		B	E – F	8
		C	E – F	8
	SECUNDARIO	A	X – Y	500
		B	X – Y	500
C		X – Y	500	

TABLA 4.7 Relación de los transformadores de interposición para la S/E Machala 138 kV

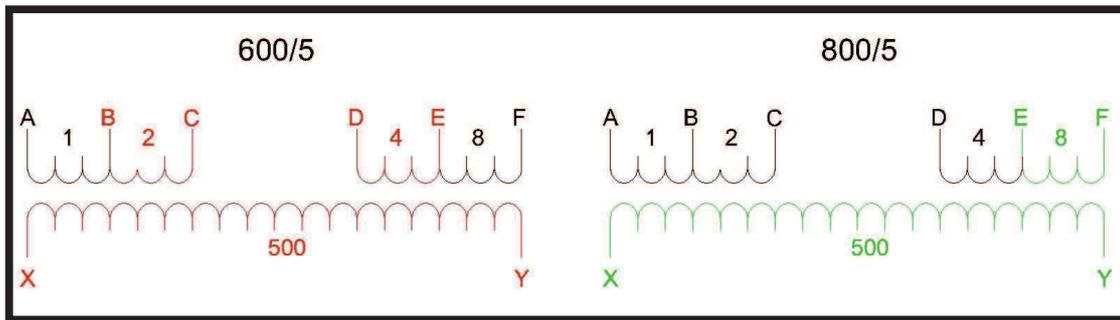


FIGURA 4.17 Conexiones de los transformadores de interposición para la S/E Machala 138 kV

En ATP no existe un modelo de transformador que represente directamente el módulo 4AM5120 – 2DA, razón por la cual se construyó un módulo aproximado.

Para el módulo aproximado se colocó 1 transformador “saturable 1 phase” en el cual se desprecian las corrientes de magnetización tanto en el bobinado primario (relación variable), como en el bobinado secundario (relación fija – 500 espiras), dando como resultado tres transformadores en paralelo, uno por fase, de acuerdo a la figura 4.18.

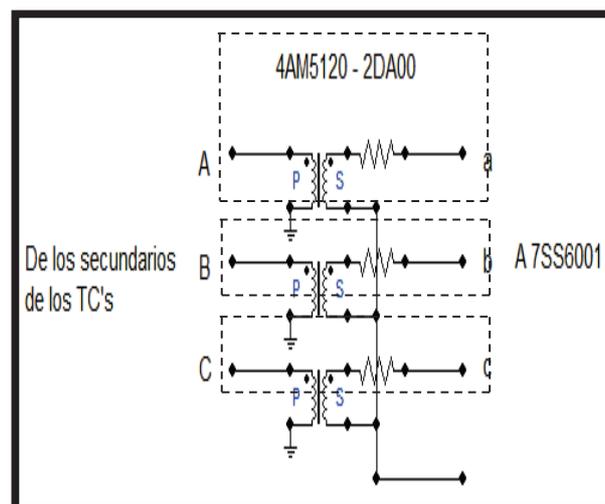


FIGURA 4.18 Módulo 4AM5120 – 2DA00 en ATP

La relación de espiras de los transformadores de interposición para la simulación en ATP, para las bahías de Machala 138 kV se presentan en la tabla 4.8.

ATR 138 kV L/T San Idelfonso 1 L/T San Idelfonso 2	RELACIÓN 600/5		
		"Saturable 1 phase"	
		FASES	Número de vueltas
	PRIMARIO	A	6
B		6	
C		6	
SECUNDARIO	A	500	
	B	500	
	C	500	
ATQ 138 kV	RELACIÓN 800/5		
		"Saturable 1 phase"	
		FASES	Número de vueltas
	PRIMARIO	A	8
		B	8
		C	8
	SECUNDARIO	A	500
B		500	
C		500	

TABLA 4.8 Relación de los transformadores de interposición para el modelo en ATP

4.1.2.3.8 Módulo de Restricción (7TM700) ^[7]

La suma de corrientes diferenciales I_{Op} es equivalente a la adición vectorial de todas las corrientes de alimentación. Además de I_{Op} , el sistema de medición requiere un valor de restricción I_{Res} , que está formado por la suma de las magnitudes de todas las corrientes.

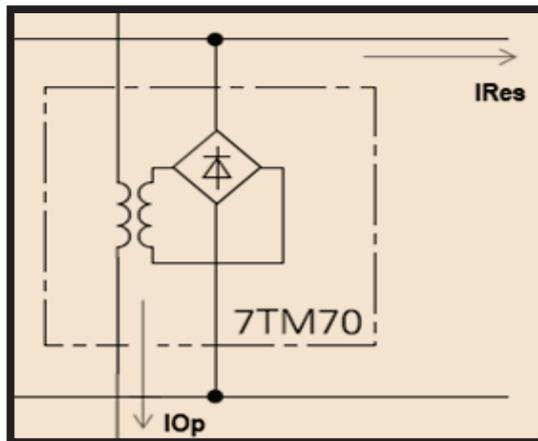


FIGURA 4.19 Módulo de restricción (7TM70) ^[8]

El módulo 7TM70 consta de un transformador con relación 1:1, que está compuesto por un puente de diodos, el cual rectifica la corriente diferencial I_{Op} , para obtener la corriente de restricción I_{Res} .

Para el modelamiento de este módulo en ATP, se optó por el transformador “saturable 1 phase” de relación 1:1 conectado a un puente rectificador, como se indica en la figura 4.23.

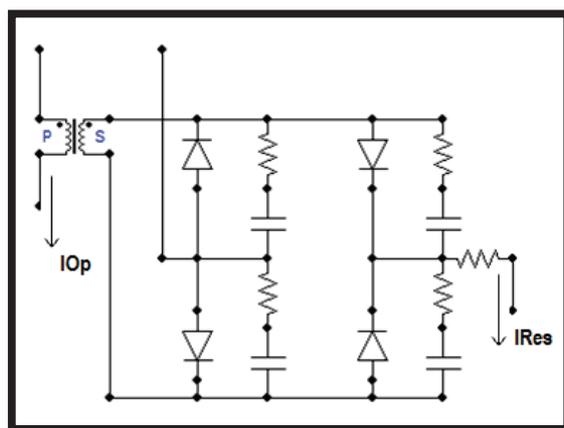


FIGURA 4.20 Módulo de restricción en ATP

4.1.2.4 Modelación de componentes adicionales

4.1.2.4.1 Interruptores

Para la simulación de interruptores ATP posee el modelo “SWIT_3XT”, el cual es un interruptor trifásico controlado por tiempo. En este estudio, este elemento es de gran ayuda al momento de realizar el aterrizamiento de cualquiera de los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV.

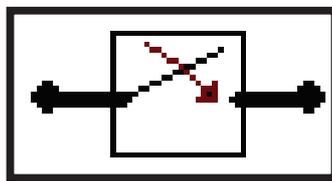


FIGURA 4.21 Modelo de ATP “SWIT_3XT”

4.1.2.4.2 Rama de conexión

El modelo “SPLITER” de ATP actúa como un nodo eléctrico. En el presente trabajo este elemento ayuda a interconectar las diferentes bahías a la barra de Machala 138 kV.

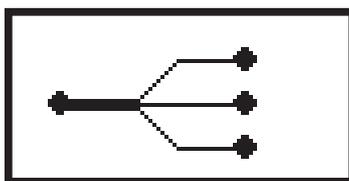


FIGURA 4.22 Modelo de ATP “SPLITER”

La modelación completa del SEP y de la protección diferencial en ATP se muestra en el ANEXO 2.

4.1.3 CONSTRUCCIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRA DE BAJA IMPEDANCIA EN MATLAB

4.1.3.1 Descripción del relé numérico a modelarse – 7SS601 ^[9]

La posibilidades de ajuste que presenta la protección 7SS60 SIPROTEC son las funciones “10Id>” y “10kfac”.

La función de protección de barras genera el comando de disparo que se multiplica por medio de módulos periféricos los cuales dan la señal de disparo a los disyuntores.

La figura 4.23 muestra la función de disparo de la protección. La característica se divide en una parte horizontal y una porción de pendiente.

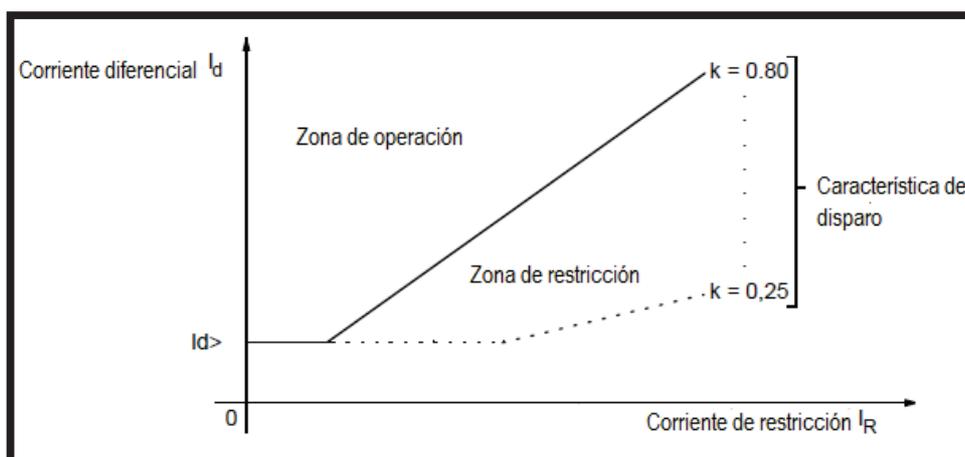


FIGURA 4.23 Característica de operación del 7SS601 ^[9]

Solo los pares ordenados de corriente diferencial y de restricción que están por encima de la característica constituyen una falla de barras que llevan a una orden de disparo.

El nivel de la porción horizontal de la característica se determina por el parámetro “10ld>”. La porción de pendiente puede ser variada por el ajuste del parámetro “10kfac”

A continuación se presentan los posibles ajustes de los parámetros 10ld> y 10kfac:

Protección zona selectiva	
Condición	Ajuste de 10kfac (1506)
Tiempo de saturación de los transformadores $\geq 3\text{ms}$ (16.7 Hz, 50 Hz, 60 Hz) Constante de tiempo para el sistema de potencia $< 300\text{ ms}$	0.6

TABLA 4.9 Configuración recomendada para 10kfac (1506) – protección zona selectiva^[9]

Zona de verificación	
Condición	Ajuste de 10kfac (1506)
Ninguna	0.3

TABLA 4.10 Configuración recomendada para 10kfac (1506) – zona de verificación^[9]

Dirección DIGSI	Parámetros	Posible ajuste	Ajuste predeterminado	Descripción
1505	10ld>	0.2I _{NO} a 2.5I _{NO}	1.00I _{NO}	Umbral de corriente diferencial
1506	10kfac	0.25 a 0.80	0.60	Sensibilidad para fallas internas
I _{no} : corriente normalizada; I _{no} = 100 mA con una corriente nominal simétrica que fluye en el lado primario				

TABLA 4.11 Descripción de los parámetro 10ld> y 10kfac^[9]

4.1.3.2 Implementación del algoritmo del relé SIEMENS 7SS601

El algoritmo del relé SIEMENS está representado por la rutina de programación en MATLAB llamada Análisis de la Protección Diferencial de Barra (APDB – 87B (2.0)).

El algoritmo necesita de las muestras instantáneas de la corriente diferencial (I_{de}) y de la corriente de restricción (I_{Re}), así como los parámetros “10ld>” y “10kfac”, los cuales son calibrados y llevados a la rutina de MATLAB para ejecutar la condición de disparo del relé diferencial de barra de baja impedancia como se muestra en la figura 4.24.

Luego de ser procesadas las muestras I_{de} e I_{Re} (archivos COMTRADE) por la rutina de MATLAB, resultan las corrientes diferencial (I_{diff}) y de restricción (I_{res}), con las cuales el relé 7SS601 determina si se dispara o no.

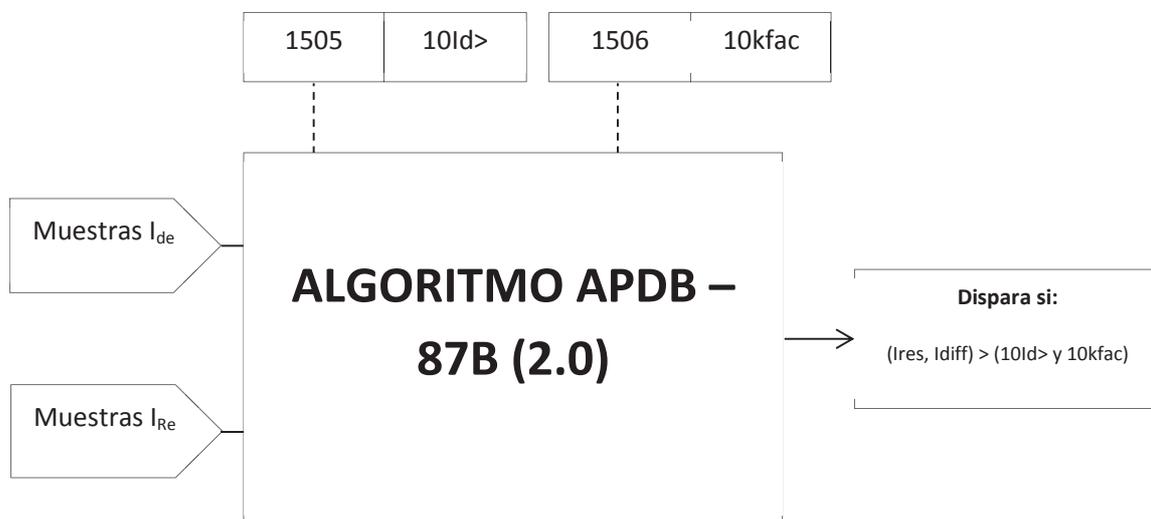


FIGURA 4.24 Diagrama lógico del relé 7SS601

La rutina de programación APDB – 87B (2.0), está basada en el diagrama de flujo que se encuentra indicado en la figura 4.25.

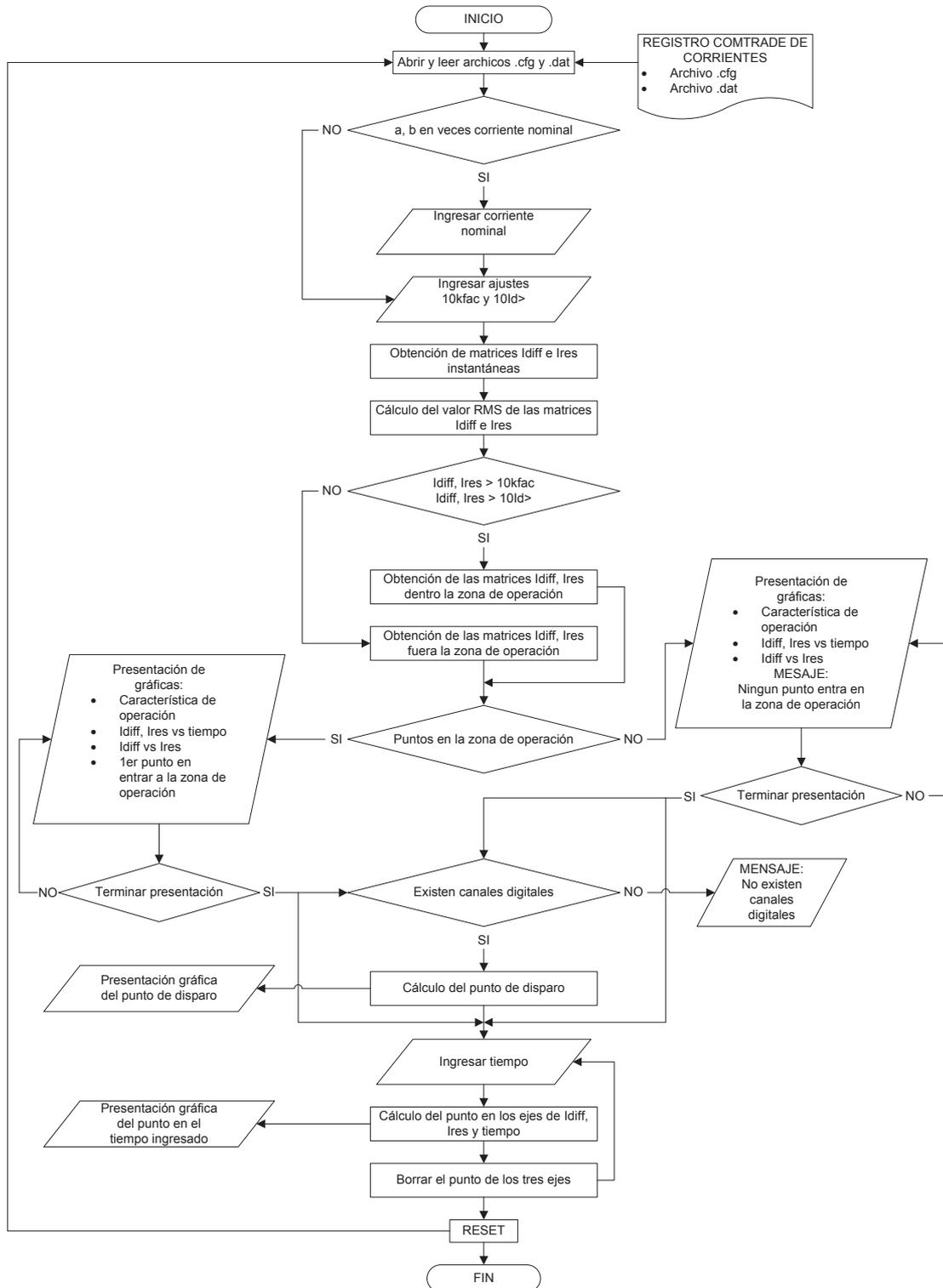


FIGURA 4.25 Diagrama de flujo de APDB – 87B (2.0)

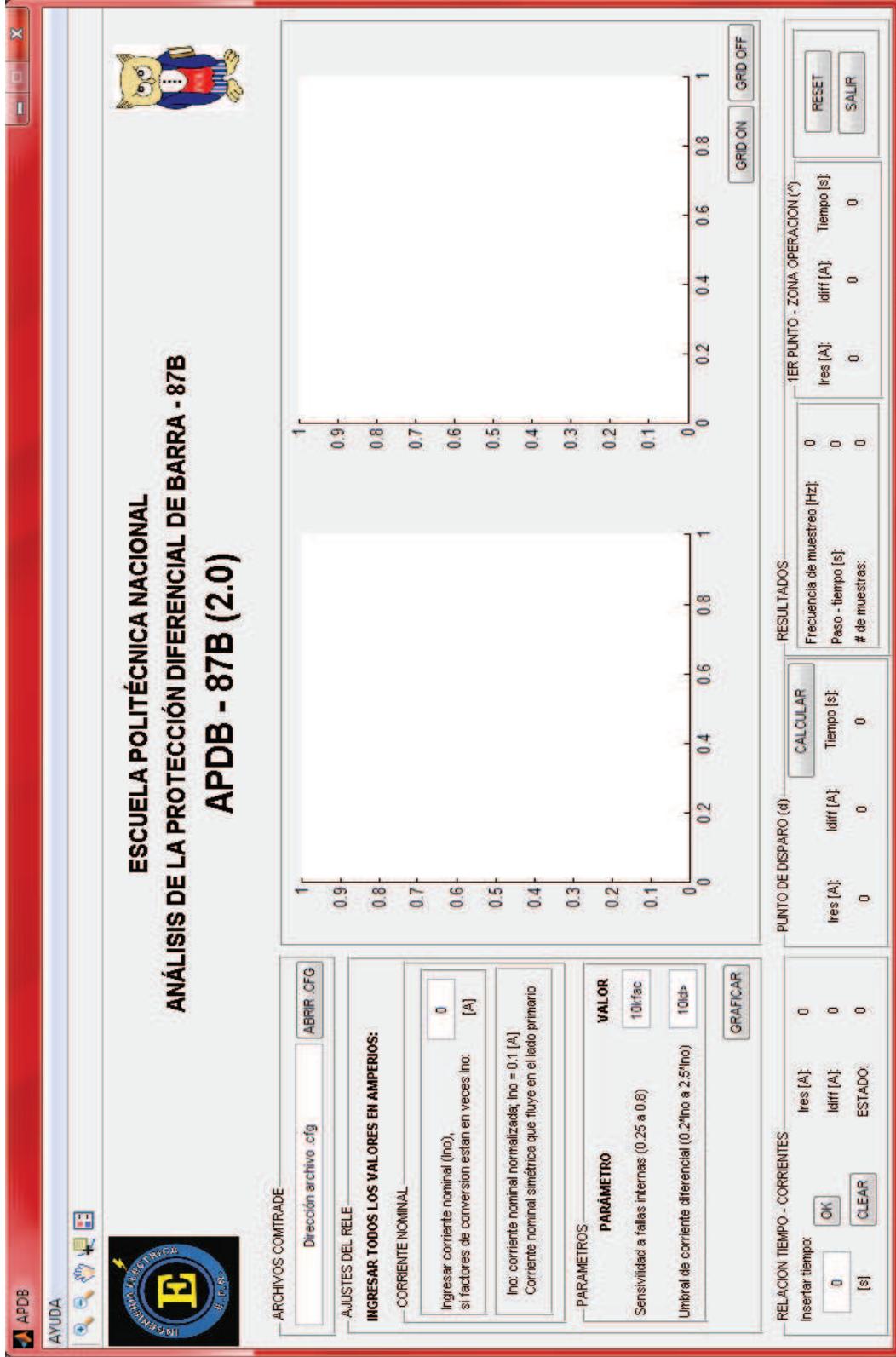


FIGURA 4.26 Análisis de la Protección Diferencial de Barra (APDB – 87B (2.0))

En la figura 4.26 se muestra la ventana principal de la rutina de programación APDB – 87B (2.0).

APDB – 87B (2.0) es útil para el análisis de la operación del relé diferencial de barra, en base a los valores que se ingrese de su característica de operación ($10I_d$ y $10k_{fac}$).

Una vez realizados los ajustes de la característica de operación del relé, esta permite analizar su operación ante fallas, energizaciones, pruebas de inyección, etc., basta con tener los archivos COMTRADE con las señales de corriente diferencial y restricción.

La explicación a detalle del funcionamiento de APDB – 87B (2.0), se presenta en el ANEXO 3, que corresponde a su manual de usuario.

4.1.3.2.1 Código de programación de APDB – 87B (2.0)

El código de programación que utiliza APDB – 87B (2.0) consta de archivos tales como:

- *.m
- *.fig
- *.jpg
- *.png
- *.pdf

Para el manejo sencillo del programa por parte del usuario, este se lo realiza en base a una interfaz gráfica de usuario (GUIDE), la cual contiene todos los archivos mencionados, los cuales son utilizados de acuerdo a la ejecución del programa.

A continuación se realiza una explicación detallada de los diferentes archivos *.m que fueron programados para el funcionamiento correcto de la subrutina.

APDB – 87B (2.0) basa su funcionamiento en cuatro archivos *.m, los cuales son:

- presentacion.m
- APDB.m
- corrientes_instantaneas.m
- valor_rms.m

- **presentacion.m**

El archivo M – file presentacion.m corresponde a la carátula del programa el cual inicia todo el proceso, además este hace que se ejecute el archivo APDB.m que corresponde a la interfaz gráfica que utiliza el usuario para el ingreso de datos e interpretación de resultados.

- **APDB.m**

En el archivo APDB.m se encuentra todo el proceso correspondiente a la interfaz gráfica del programa. Este archivo es el encargado de ejecutar los dos archivos *.m restantes como subrutinas de este, a medida que se ejecute el programa.

Internamente este archivo realiza también el cálculo del primer punto que entra en la zona de operación del relé.

Por otra parte, APDB.m realiza la presentación de resultados de manera gráfica y tabulada, una vez que se ha ejecutado todo el programa.

Posterior a la ejecución del programa, este archivo permite el cálculo del punto de disparo del relé, presentando sus resultados de manera gráfica y tabular.

Este archivo permite además la navegación simultánea en los ejes de la corriente diferencial, la corriente de restricción y el tiempo.

- **corrientes_instantaneas.m**

El archivo `corrientes_instantaneas.m` se encarga de leer los archivos COMTRADE `*.cfg` y `*.dat`, para posteriormente formar las matrices de la corriente diferencial y de restricción, las cuales servirán para cálculos posteriores.

Al mismo tiempo este archivo realiza la conversión de la magnitud de las señales de corriente, es decir si estas están dadas en veces la corriente nominal del relé en análisis, el programa convierte la magnitud de las señales a valores en amperios, mientras que si las señales vienen directamente en amperios, el programa no realiza ninguna conversión, y representa sus valores de forma directa.

- **valor_rms.m**

El archivo `valor_rms.m` calcula el valor rms de las señales de corriente diferencial y de restricción a partir de los valores instantáneos de estas corrientes que están dados en las matrices que se forman en el archivo `corrientes_instantaneas.m`.

Para el cálculo del valor rms, este archivo captura también la frecuencia de muestreo y la frecuencia del sistema a partir del archivo COMTRADE `*.cfg`, con lo cual determina el número de muestras por ciclo que posee la oscilografía en análisis.

4.1.4 PARÁMETROS 10Id> Y 10kfac DE LA S/E MACHALA 138 KV

Los parámetros de la característica de operación del relé diferencial de barra de baja impedancia de la S/E Machala son los siguientes:

10Id>	10kfac
$0,2 \cdot I_{n07SS601} = 20 \text{ [mA]}$	0,7
$I_{n07SS601} = 100 \text{ [mA]}$: corriente nominal del módulo 7SS601 de Siemens.	

TABLA 4.12 Parámetros 10Id> y 10kfac del 87B de la S/E Machala 138 kV

Los archivos COMTRADE obtenidos por medio del programa TOP están en amperios, por lo que en la opción “corriente nominal” de APDB no se ingresa ningún valor, como se indica en el manual de usuario del programa (ANEXO 3).

The screenshot shows the 'ARCHIVOS COMTRADE' window with the following settings:

- File path: C:\Users\USER\Desktop\TESIS\TESIS\ISAN_IDELFC
- Button: ABRIR .CFG
- Section: AJUSTES DEL RELE
- Instruction: INGRESAR TODOS LOS VALORES EN AMPERIOS:
- Section: CORRIENTE NOMINAL
- Input field: Ingresar corriente nominal (Ino), si factores de conversion estan en veces Ino: [A] (Value: 0)
- Text: Ino: corriente nominal normalizada; Ino = 0.1 [A]
Corriente nominal simétrica que fluye en el lado primario
- Section: PARAMETROS
- Table:

PARÁMETRO	VALOR
Sensibilidad a fallas internas (0.25 a 0.8)	0.7
Umbral de corriente diferencial (0.2*Ino a 2.5*Ino)	0.02

Button: GRAFICAR

FIGURA 4.27 Parámetros 10kfac y 10Id> de la S/E Machala 138 kV ingresados en APDB – 87B (2.0)

4.1.5 SIMULACIONES REALIZADAS EN ATP Y APDB 87B (2.0)

Con el fin de obtener una parametrización correcta del 87B de la S/E Machala 138 kV, se realiza la simulación del aterrizamiento del circuito 2 de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV.

Las simulaciones se realizan a demanda máxima, tomando los valores de la tabla 3.13.

4.1.5.1 Aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138kV

El aterrizamiento de la L/T se lo realiza de la siguiente manera:

- Se considera que la L/T se encuentra aterrizada en el extremo de la S/E Machala. El aterrizamiento de la L/T en el extremo de San Idelfonso se lo realiza en un tiempo igual a 0.2 s, intentando obtener transitorios de corriente al momento del aterrizamiento, ya que estos al poseer valores altos pueden sobrepasar la característica de operación del 87B.

Las señales de corriente diferencial y de restricción por fase obtenidas con las simulaciones realizadas en ATP se presentan en las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 que corresponden a las fases A, B y C respectivamente.

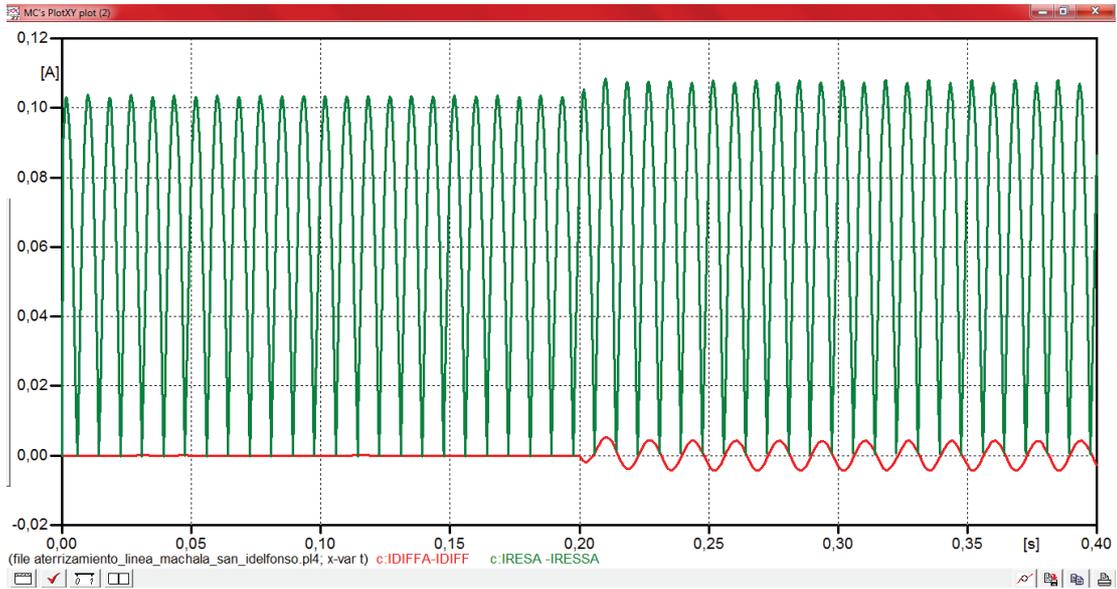


FIGURA 4.28 Corrientes diferencial y de restricción de la fase A por el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso 2 en 0.2 s

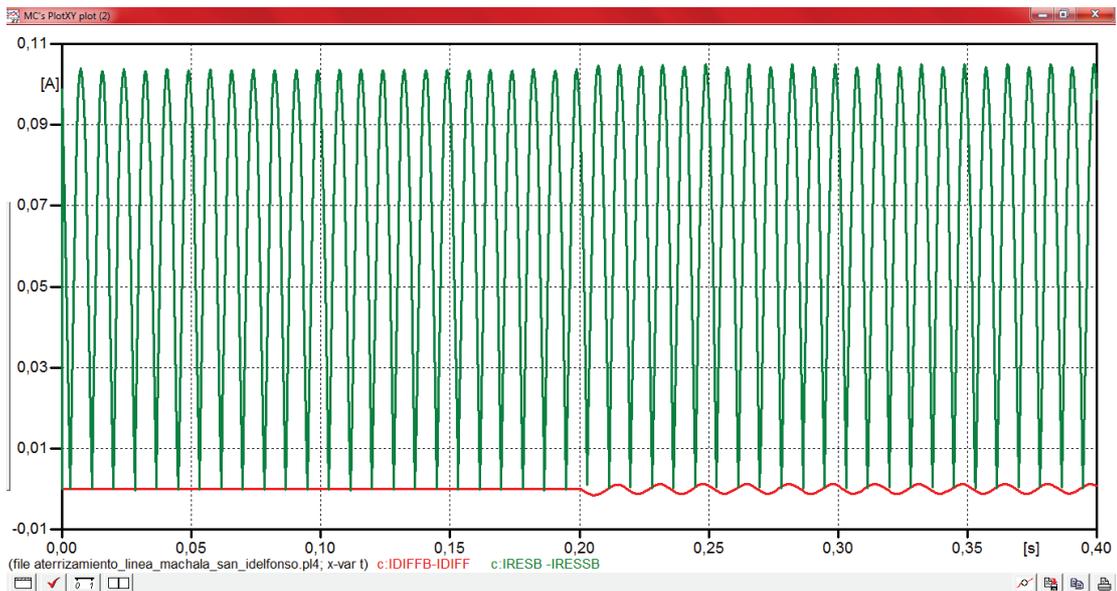


FIGURA 4.29 Corrientes diferencial y de restricción de la fase B por el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso 2 en 0.2 s

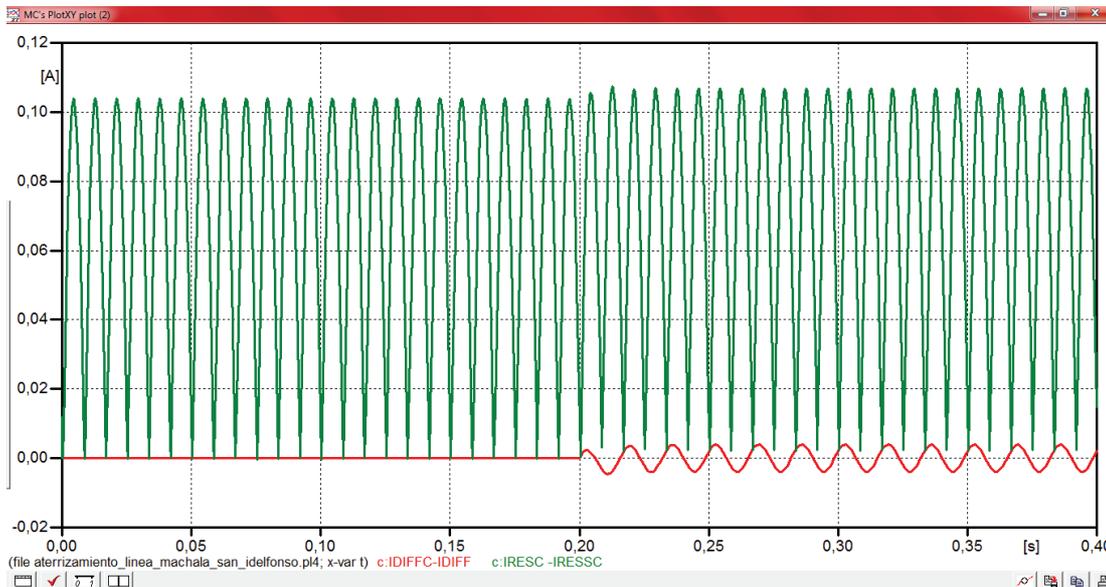


FIGURA 4.30 Corrientes diferencial y de restricción de la fase C por el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso 2 en 0.2 s

4.1.5.1.1 Análisis de la operación del relé diferencial – L/T aterrizada

Con la ayuda de APDB 87B (2.0), obtenemos los máximos valores de corriente diferencial y restricción, con la finalidad de obtener el máximo valor del parámetro 10kfac (tabla 4.13) y posteriormente definir si el relé opera o no.

ATERRIZAMIENTO L/T					
			FASE A	FASE B	FASE C
CORRIENTE MÁXIMA	DIFERENCIAL (Idiff)	[mA]	3,2	1	3,2
	RESTRICCIÓN (Ires)	[mA]	76,1	73,8	75,7
Sensibilidad a fallas internas (10kfac)			0,0420499343	0,0135501355	0,04227212682

TABLA 4.13 Valor máximo de las corrientes diferencial y restricción que registra el módulo 7SS601 – Aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138kV

Partiendo de la tabla 4.13, al realizar esta maniobra, el máximo valor de corriente diferencial entre las tres fases (3,2 mA) no sobrepasa el factor $10I_d >$ igual a 20 mA de la S/E Machala 138 kV.

Por otra parte el máximo valor del parámetro $10k_{fac}$ entre la tres fases es 0,04227212682, el cual no supera al establecido en la S/E Machala que es 0,7.

Los resultados de las simulaciones realizadas en APDB 87B (2.0), se muestran en las figuras 4.31, 4.32 y 4.33, en estas se puede observar claramente que los pares ordenados de las corrientes diferencial y retricción en cada fase no sobrepasan en ningun momento la característica de operación del 87B.

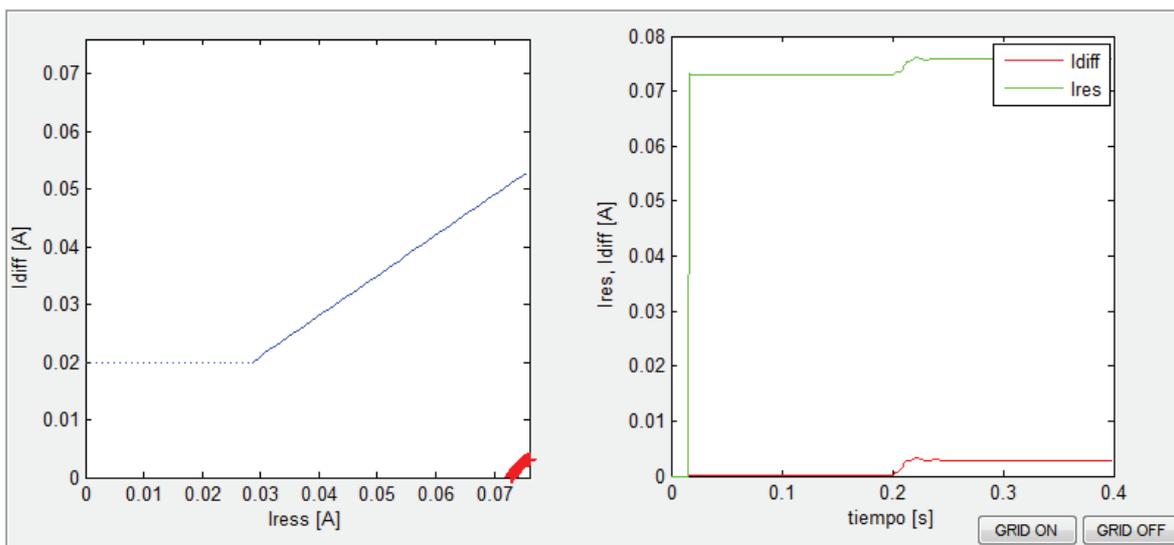


FIGURA 4.31 Característica de operación del relé diferencial – fase A – aterrizamiento de la L/T

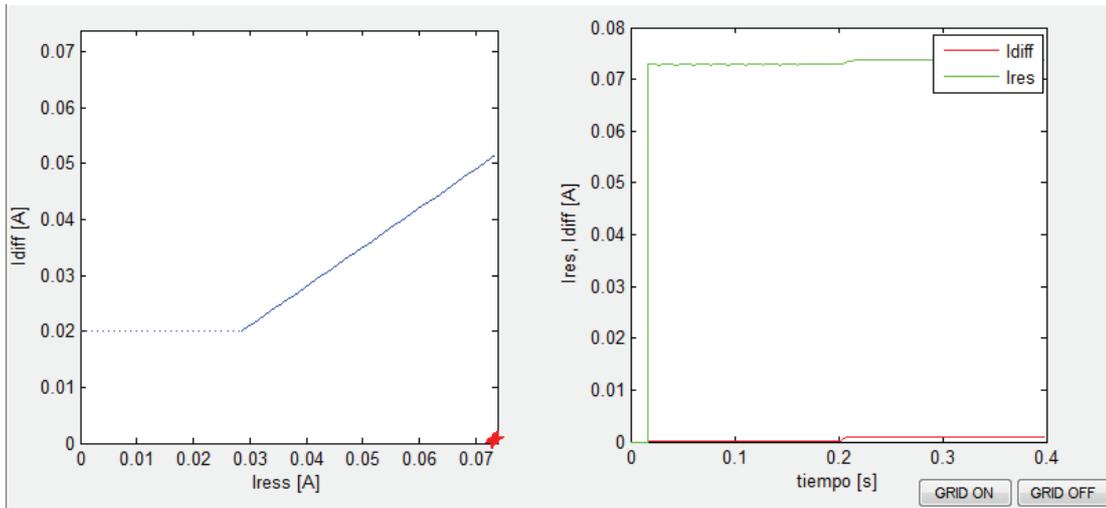


FIGURA 4.32 Característica de operación del relé diferencial – fase B – aterrizamiento de la L/T

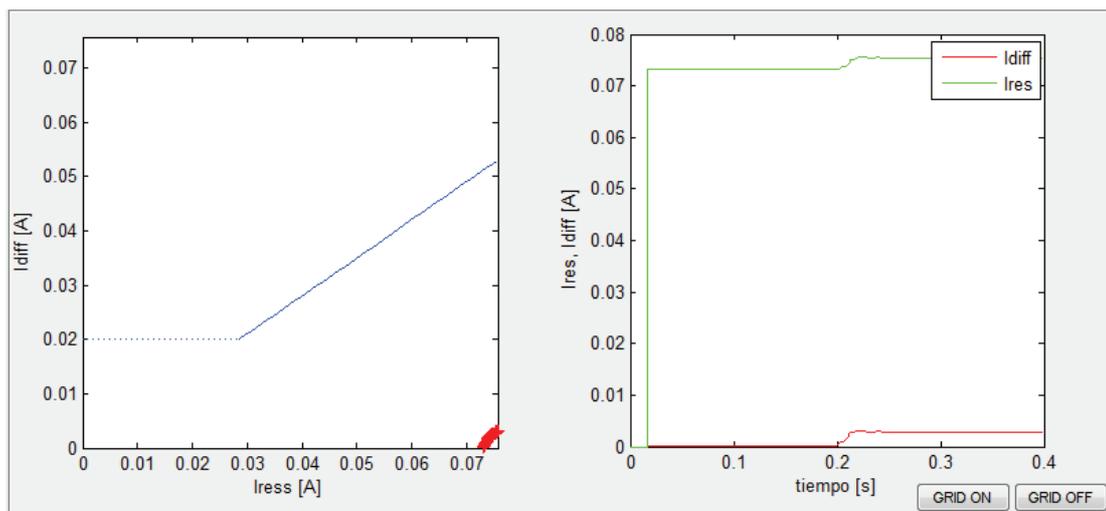


FIGURA 4.33 Característica de operación del relé diferencial – fase C – aterrizamiento de la L/T

Una vez realizados todos estos análisis se puede afirmar que los parámetros que se encuentran establecidos para el relé diferencial de barra de la S/E Machala 138 kV son los adecuados ante el aterrizamiento de uno de los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV, a demanda máxima.

4.1.5.2 Aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138kV mas falla externa – barra de Machala 69 kV

Para realizar esta simulación se considera que el circuito 2 de la L/T se encuentra aterrizado solo en el extremo de Machala, posteriormente se realiza el aterrizamiento de la línea en el extremo de San Idelfonso en un tiempo igual a 0.2 s, por último se realiza la simulación de una falla monofásica “a”, en la barra de 69 kV de la S/E Machala a los 0.3 s. La probabilidad de que este evento suceda es escasa, pero es un evento provechoso para efectos de estudio.

Las señales de corriente diferencial y de restricción por fase obtenidas con las simulaciones realizadas en ATP se presentan en las figuras 4,34, 4.35 y 4.36 que corresponden a las fases A, B y C respectivamente.

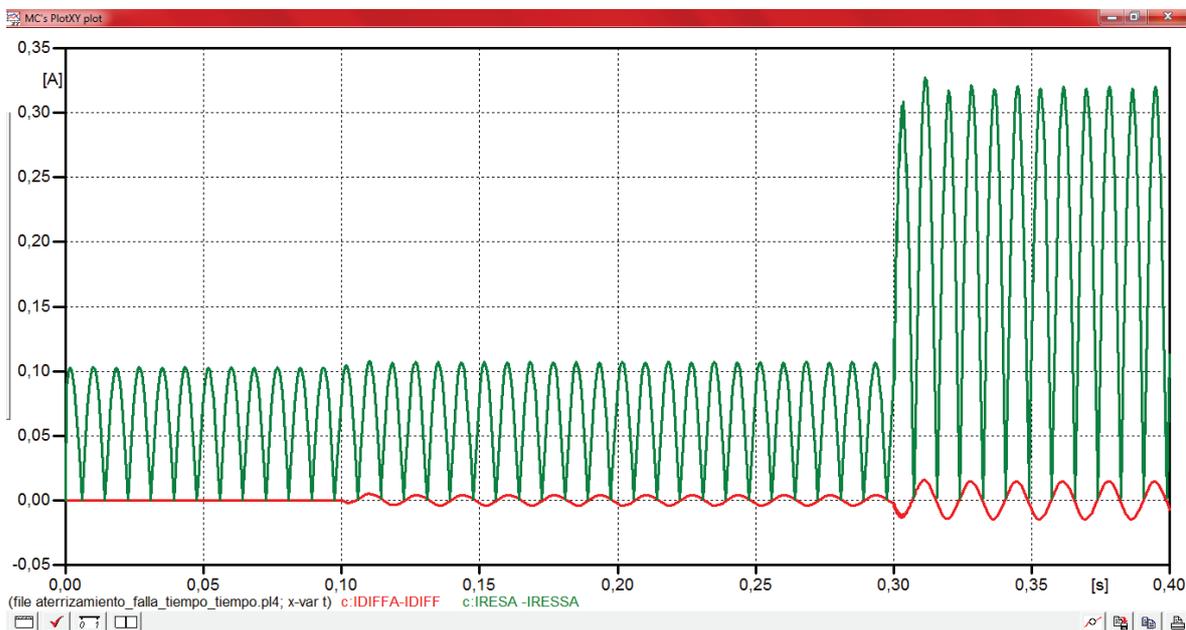


FIGURA 4.34 Corrientes diferenciales y de restricción de la fase A por el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso 2 – falla externa

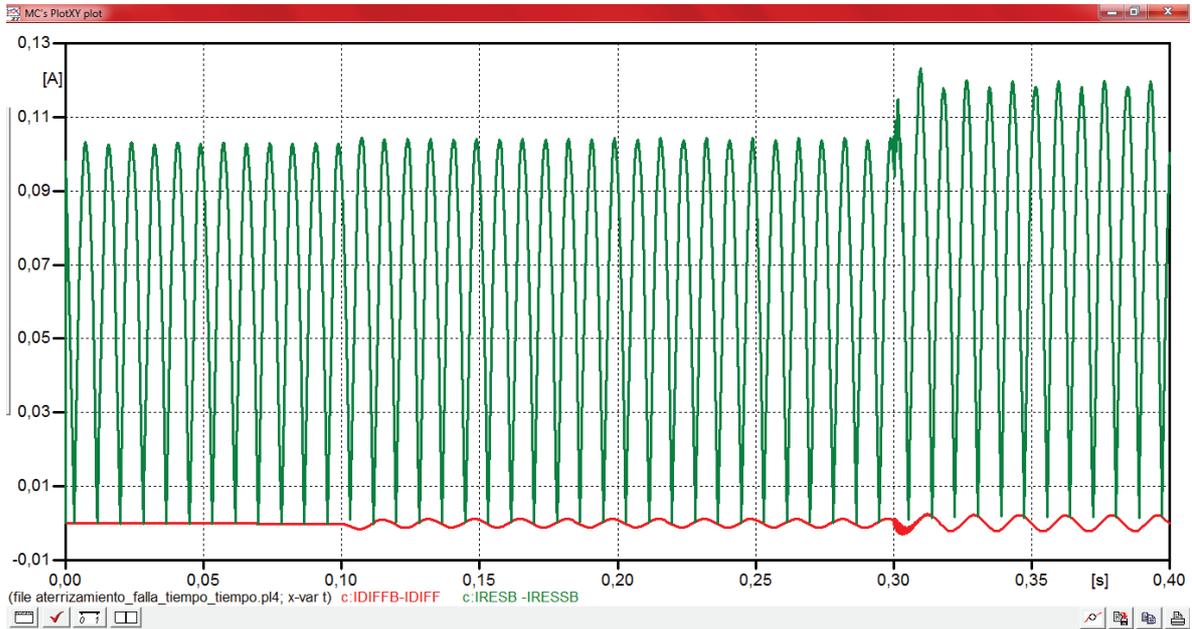


FIGURA 4.35 Corrientes diferencial y de restricción de la fase B por el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso 2 – falla externa

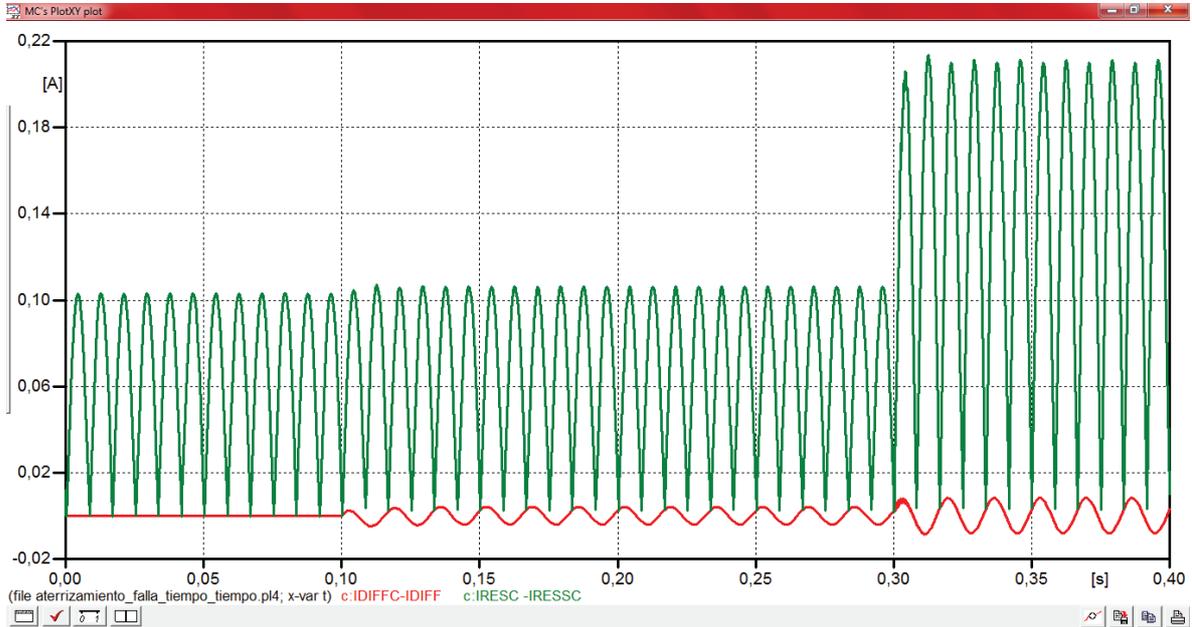


FIGURA 4.36 Corrientes diferencial y de restricción de la fase C por el aterrizamiento de la L/T San Idelfonso 2 – falla externa

4.1.5.2.1 Análisis de la operación del relé diferencial – L/T aterrizada – falla externa

APDB 87B (2.0) permite obtener los máximos valores de corriente diferencial y restricción, con la finalidad de obtener el máximo valor del parámetro 10kfac para este evento (tabla 4.14).

ATERRIZAMIENTO L/T – FALLA EXTERNA					
			FASE A	FASE B	FASE C
CORRIENTE MÁXIMA	DIFERENCIAL (I_{diff})	[mA]	10,7	1,6	5,9
	RESTRICCIÓN (I_{res})	[mA]	227,7	89,7	149
Sensibilidad a fallas internas (10kfac)			0,04699165569	0,01783723523	0,03959731544

TABLA 4.14 Valor máximo de las corrientes diferencial y restricción que registra el módulo 7SS601 – Aterrizamiento de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV – falla externa

Partiendo de la tabla 4.14, al realizar la simulación de este evento, el máximo valor de corriente diferencial entre las tres fases (10,7 mA) no sobrepasa el factor $10I_d >$ igual a 20 mA de la S/E Machala 138 kV.

Por otra parte el máximo valor del parámetro 10kfac entre la tres fases es 0,04699165569, el cual no supera al establecido en la S/E Machala que es 0,7.

Los resultados de las simulaciones realizadas en APDB 87B (2.0), se muestran en las figuras 4.37, 4.38 y 4.39, en estas se puede observar claramente que los pares ordenados de las corrientes diferencial y restricción en cada fase no sobrepasan en ningun momento la característica de operación del 87B.

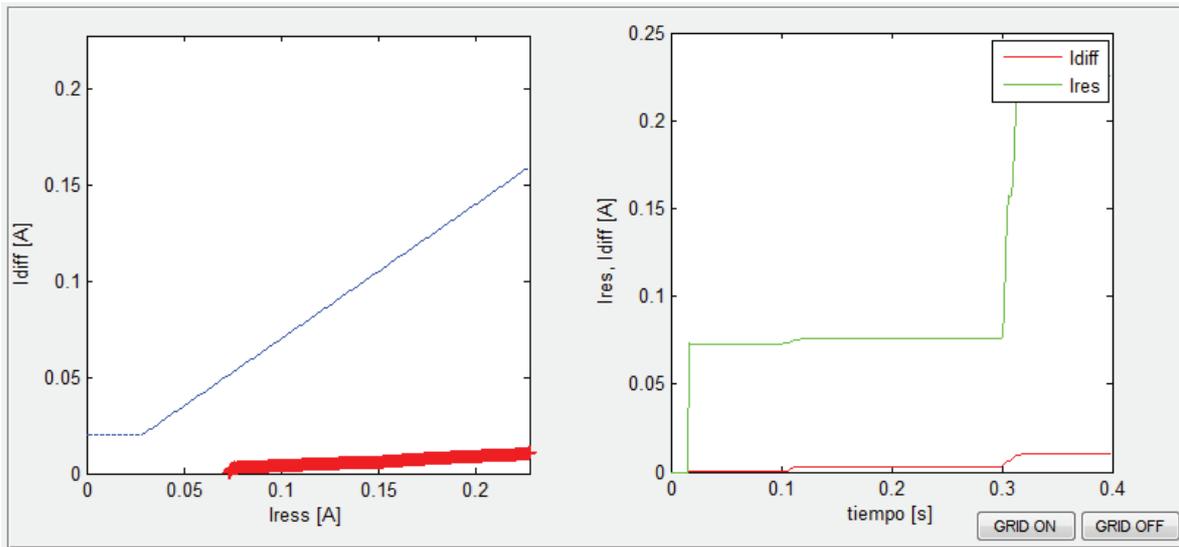


FIGURA 4.37 Característica de operación del relé diferencial – fase A – aterrizamiento de la L/T – falla externa

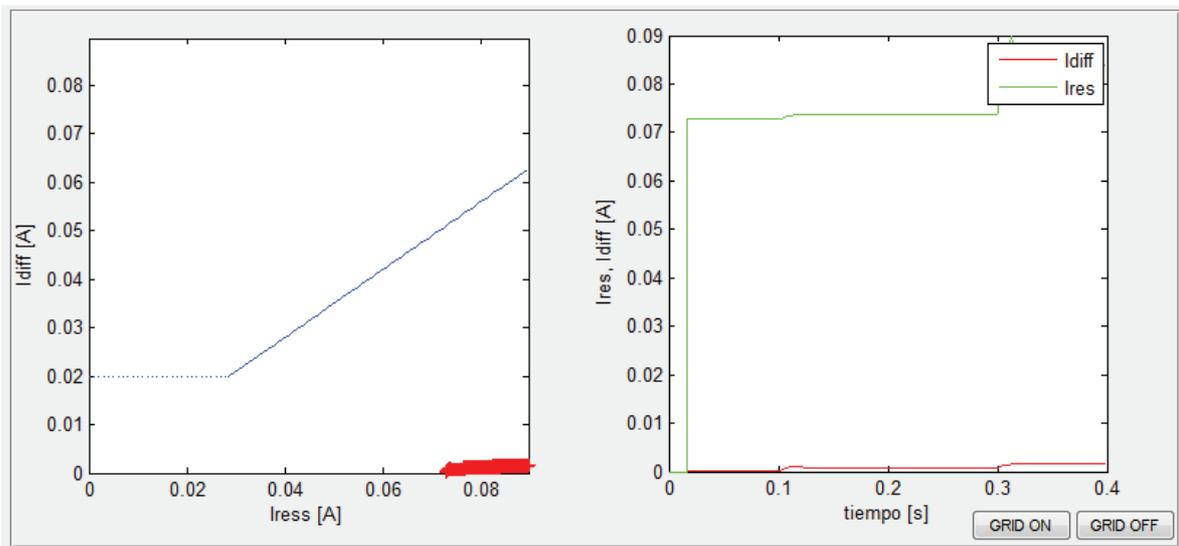


FIGURA 4.38 Característica de operación del relé diferencial – fase B – aterrizamiento de la L/T – falla externa

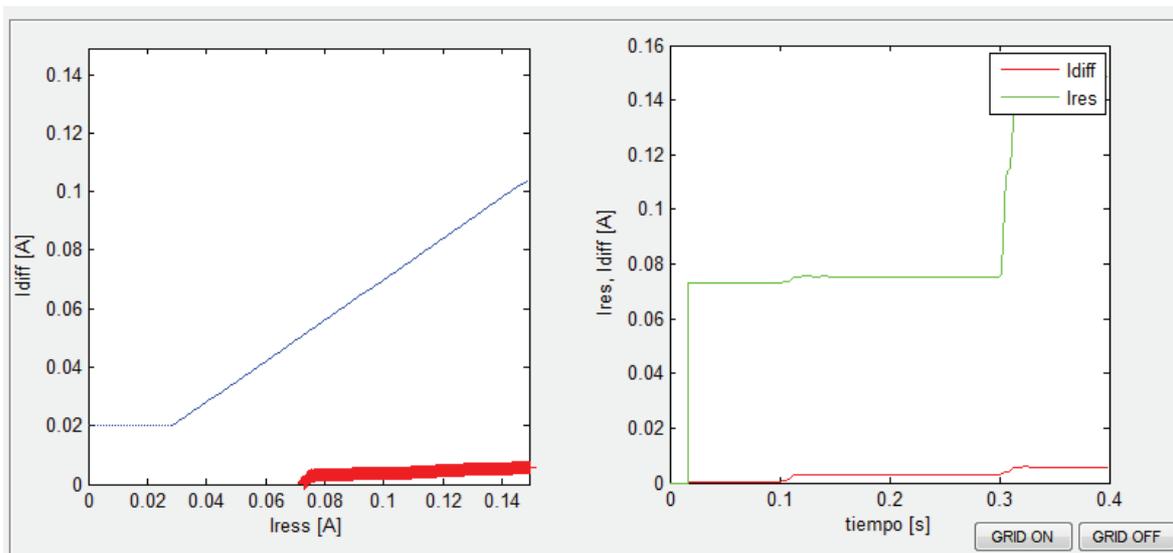


FIGURA 4.39 Característica de operación del relé diferencial – fase C – aterrizamiento de la L/T – falla externa

Para este caso en particular la corriente inducida en el circuito aterrizado, aumenta ante una falla externa, aumentando directamente la corriente diferencial, pero esta no sobrepasa la característica de operación del relé.

Pon lo tanto con las simulaciones realizadas para este evento, se puede deducir que el relé diferencial de barra de Machala 138 kV está correctamente calibrado ante una falla externa y ante el aterrizamiento de cualquiera de los circuitos de la L/T más una falla externa.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- En una L/T paralela, los acoplamientos entre redes de secuencia y entre circuitos presentes en la matriz de impedancias Z_{ABC} y en la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell P_{ABC} , afectan directamente en la operación de las protecciones eléctricas. Por esta razón es necesario realizar un estudio detallado incluyendo estos acoplamientos para así definir el ajuste correcto de las diferentes protecciones.
- En una L/T paralela transpuesta, las inducciones electromagnéticas y electrostáticas de voltaje y corriente son nulas, debido a la ausencia de acoplamientos en las matrices P_{ABC} y Z_{ABC} .
- La corriente que se induce cuando se aterriza en sus extremos uno de los dos circuitos de una L/T paralela sin transposición, es producida por la inducción electromagnética que genera la corriente que se encuentra circulando por el circuito energizado y por las impedancias mutuas presentes en la matriz Z_{ABC} . El efecto electrostático también presenta una inducción de corriente, pero esta resulta ser muy baja en comparación a la corriente producida por el efecto electromagnético.

- Cuando un circuito de una L/T paralela sin transposición se encuentra desenergizado (abierto en sus dos extremos), se induce un voltaje en el mismo. Este voltaje depende de la inducción electrostática causada por el nivel de voltaje que se encuentra presente en el circuito energizado y por la presencia de acoplamientos en la matriz P_{ABC} . En este caso el efecto electromagnético también presenta una inducción de voltaje, pero en comparación al voltaje resultante por el efecto electrostático este es insignificante.
- Para el caso de una L/T paralela sin transposición con uno de sus circuitos aterrizado en un extremo y abierto en el otro, el voltaje punta que se induce en el mismo es producido solo por efecto electromagnético. En este caso la inducción electrostática no interviene puesto que los coeficientes de potencial de Maxwell propios de la línea no energizada (P_{ABC-C2}) y los mutuos entre los dos circuitos ($P_{ABC-C1C2}$ y $P_{ABC-C2C1}$) se anulan al momento de aterrizar el circuito en uno de sus extremos.
- El acoplamiento mutuo existente entre redes de secuencia y entre circuitos de una L/T paralela, produce errores considerables en la determinación de la impedancia de falla en los relés de distancia (21), para los casos de fallas bifásica y monofásica.
- Para el caso de mantenimiento con L/T aterrizadas y en base a la disposición de los TC's, se debe analizar la necesidad de reajustar las protecciones de distancia considerando los periodos de tiempo requeridos para el mantenimiento.

- Debido a la inducción de corrientes entre los circuitos de una L/T paralela, al realizar el aterrizamiento de la línea y por la disposición de los TC's, se afecta directamente a la operación de la protección 87B. Esto genera un incremento en la determinación de la corriente diferencial (I_{diff}), razón por la cual es necesario considerar la definición de nuevos ajustes para esta protección.
- El algoritmo implementado (APDB – 87B (2.0)) permite analizar el proceso digital que realiza el relé diferencial de barra ante fallas, energizaciones, pruebas de inyección y el aterrizamiento de L/T.
- APDB – 87B (2.0) facilita la ubicación de los pares ordenados formados por las corrientes diferencial y de restricción en un tiempo determinado. Por otra parte este algoritmo ubica el primer punto que entra en la zona de operación del 87B, así como también permite el cálculo del punto de disparo del relé.
- Los ajustes del 87B fijados actualmente para la barra de 138 kV de la S/E Machala 230/138/69 kV no presentan ningún inconveniente para el caso del aterrizamiento de uno de los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV y también para el caso del aterrizamiento de cualquiera de sus circuitos y la presencia de una falla externa.

5.2 RECOMENDACIONES

- En L/T paralelas, para la determinación de la impedancia de ajuste de la protección 21 es recomendable no realizar la compensación del efecto mutuo K_m , puesto que puede ocasionar la operación involuntaria de esta protección, ante fallas en circuitos externos. Sin embargo, el modelo eléctrico de la L/T debe ser completo, de tal manera que considere dentro de las simulaciones de falla los efectos de los acoplamientos.

- Para la localización de fallas en L/T paralelas, se recomienda realizar la compensación por el efecto mutuo k_m , ya que para este caso al realizar esta consideración se determina la distancia de falla de una forma más correcta.
- El aterrizamiento de cualquiera de los circuitos de la L/T San Idelfonso – Machala 138 kV a demanda máxima, debe realizarse con la protección diferencial de barra de baja impedancia (87B) de la S/E Machala 138 kV activada, puesto que esta maniobra no afecta a su característica de operación.
- Para el correcto funcionamiento del algoritmo digital APDB – 87B (2.0) es necesario que el archivo COMTRADE tenga como máximo tres canales, los dos primeros corresponden a las señales analógicas de corriente diferencial y restricción, mientras que el tercer canal corresponde a una señal digital, la misma que provee la información necesaria para establecer el punto de disparo del relé, este canal es optativo.
- Para que APDB – 87B (2.0), realice los cálculos de manera óptima y precisa es recomendable que las oscilografías en análisis posean una frecuencia de muestreo de 1200 Hz.
- Para que el algoritmo implementado en Matlab obtenga resultados favorables, es recomendable saber si el módulo de las oscilografías está dado en veces la corriente nominal del IED o está directamente en amperios. Esta información se la puede determinar a partir del archivo de configuración del COMTRADE con extensión *.cfg.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ZIEGLER, Gerhard, “Numerical Distance Protection, Principles and Applications”. SIEMENS. Berlin and Munich. 1999.

[2] CORPORACIÓN “CENACE”; FUNDACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, “Protección de sistema Eléctricos de Potencia y automatismos”. Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia. Quito, Ecuador. 2001

[3] FONSECA, Antonio; Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica, TRANSELECTRIC S. A., “Efecto del Acoplamiento Mutuo en los Relés de Distancia de Líneas de Transmisión”.

[4] ABDUL, M. Mousa, “Ground Switch Interrupting Duty and Total Ground Current Imposed by Induction from Parallel Transmission Lines: Part I – Theoretical Analysis”. 1981.

[5] ABDUL, M. Mousa, “Ground Switch Interrupting Duty and Total Ground Current Imposed by Induction from Parallel Transmission Lines: Part II – A Quantitative Analysis for the range 69 kV - 1150 kV”. 1981.

[6] DUTÁN, Luis; CELEC EP TRANSELECTRIC, “Modelación de Transformadores para Estudios de Energización usando ATP - EMTP”. Quito, Ecuador.

[7] Siemens PTDA EA, “Applications for SIPROTE Protection Relays”. 2005.

[8] Siemens SIP, “Busbar Differential Protection / 7SS60”. 2008.

[9] MANUAL SIEMENS, “SIPROTEC 7SS60 V3.1 – Centralized Numerical Busbar Protection”.

[10] DIAGRAMA ESQUEMÁTICO, Bahía diferencial de barras 138 kV, entrada de señales de corriente a 87B / 1 \neq 2; G63006 – S1003 – S6S – 225 – C.

[11] IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, “IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems”

[12] Biblioteca de CELEC EP TRANSELECTRIC, “TEST REPORT FOR CURRENT TRANSFORMER”.

ANEXOS

ANEXO 1

SIMULACIONES REALIZADAS DE LAS DIFERENTES MANIOBRAS EN LA L/T SAN IDELFONSO – MACHALA 138 kV

- L/T SIN TRANSPOSICIÓN

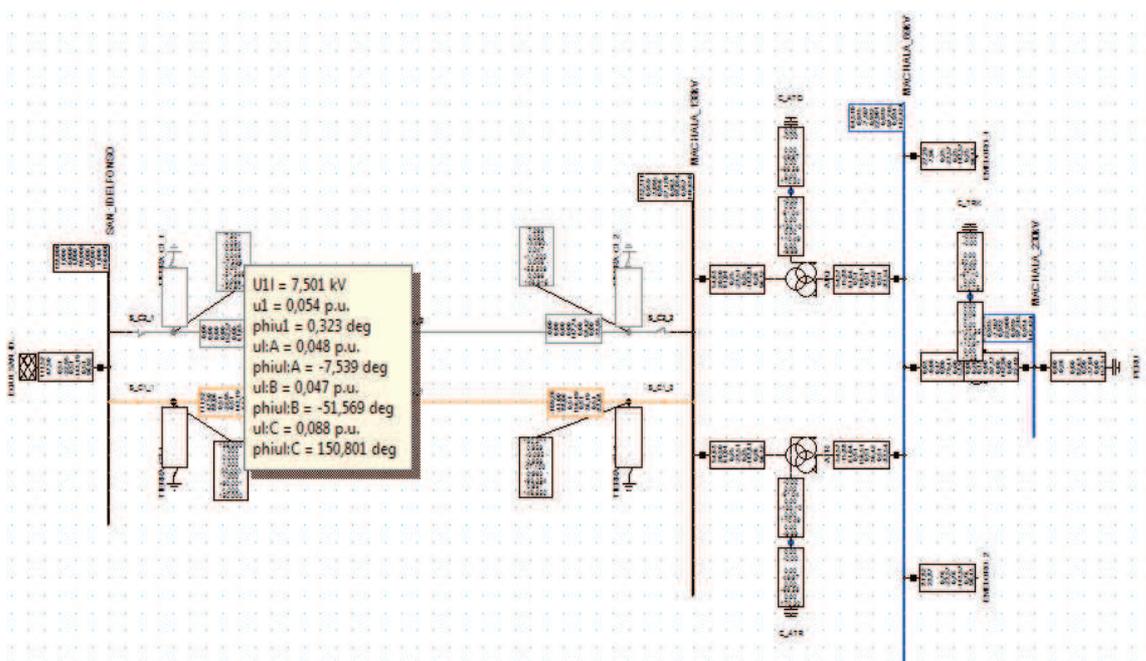


FIGURA A1.1 Voltaje inducido en el extremo de San Idelfonso – DlgSILENT Power Factory – L/T sin transposición

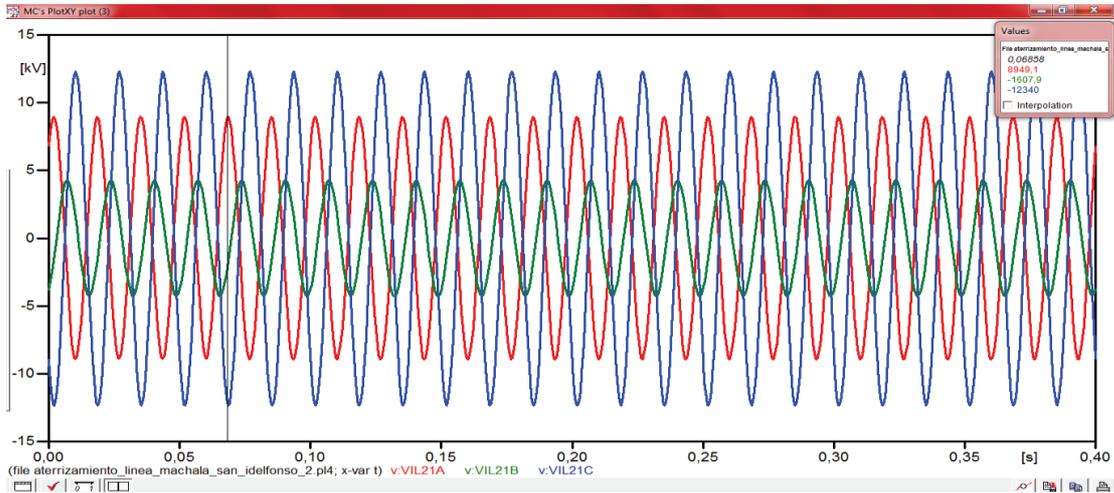


FIGURA A1.2 Voltaje inducido en el extremo de San Idelfonso – ATP – L/T sin transposición

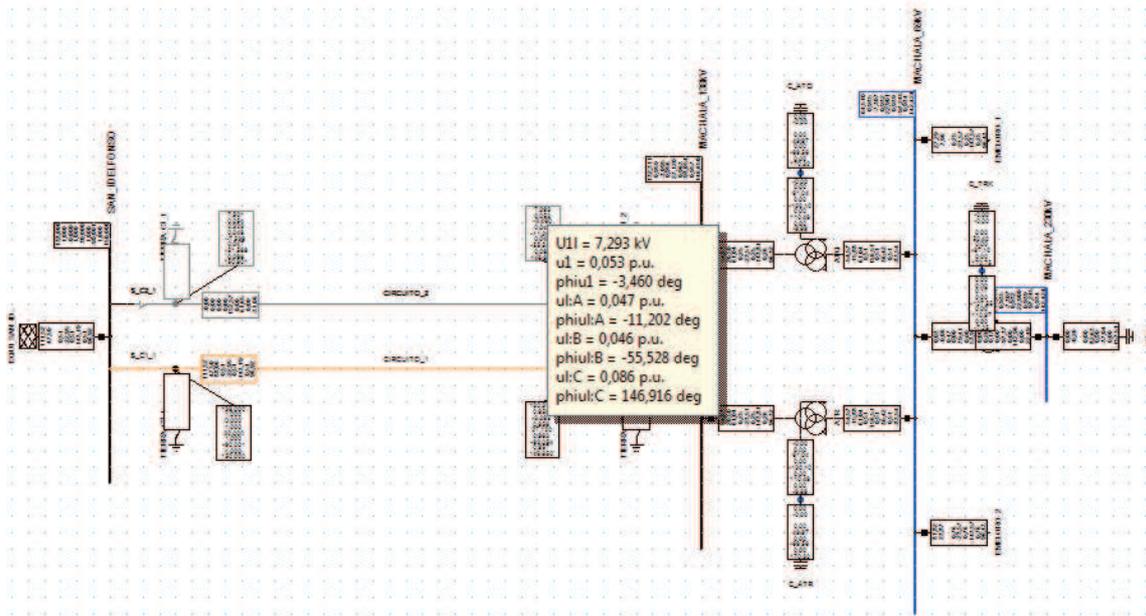


FIGURA A1.3 Voltaje inducido en el extremo de Machala – DigSILENT Power Factory – L/T sin transposición

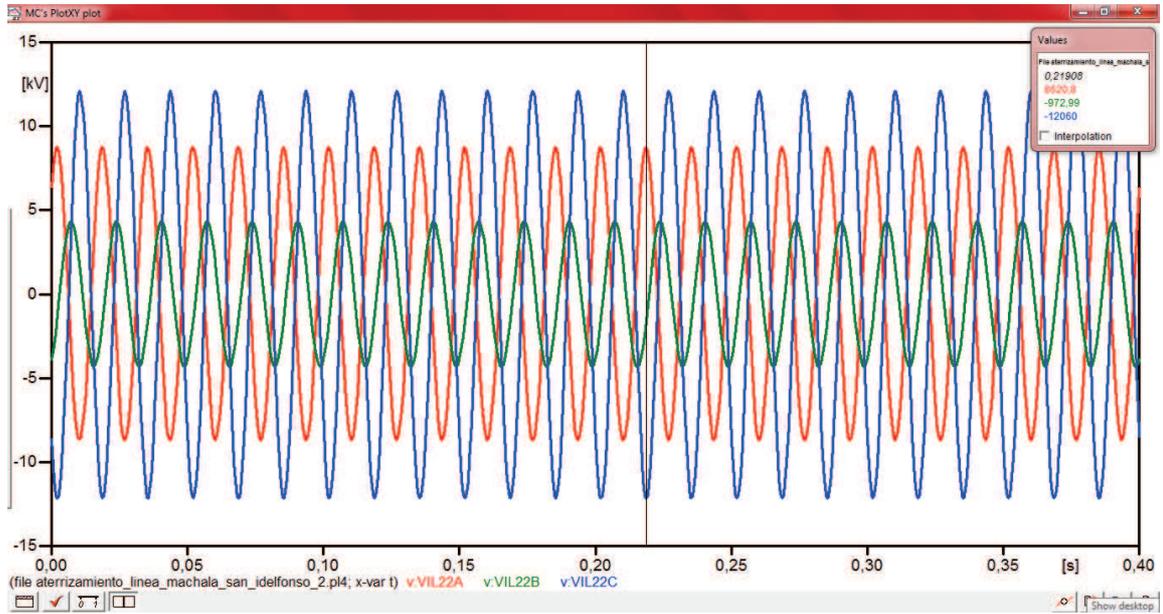


FIGURA A1.4 Voltaje inducido en el extremo de Machala – ATP – L/T sin transposición

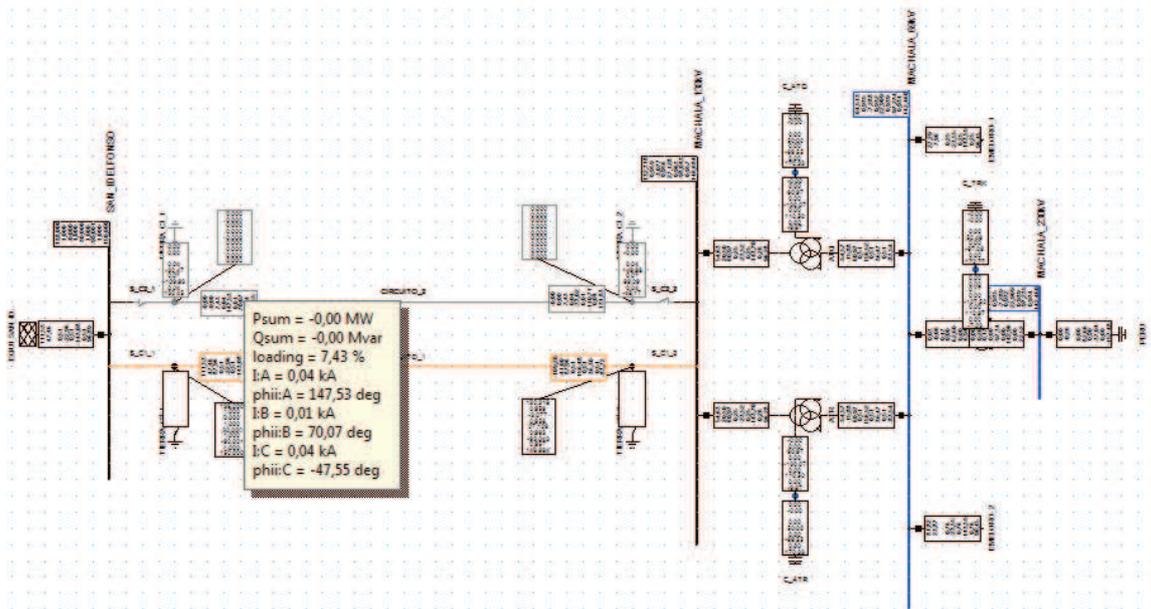


FIGURA A1.5 Corriente inducida ante el aterrizamiento de la L/T – DIgSILENT Power Factory – L/T sin transposición

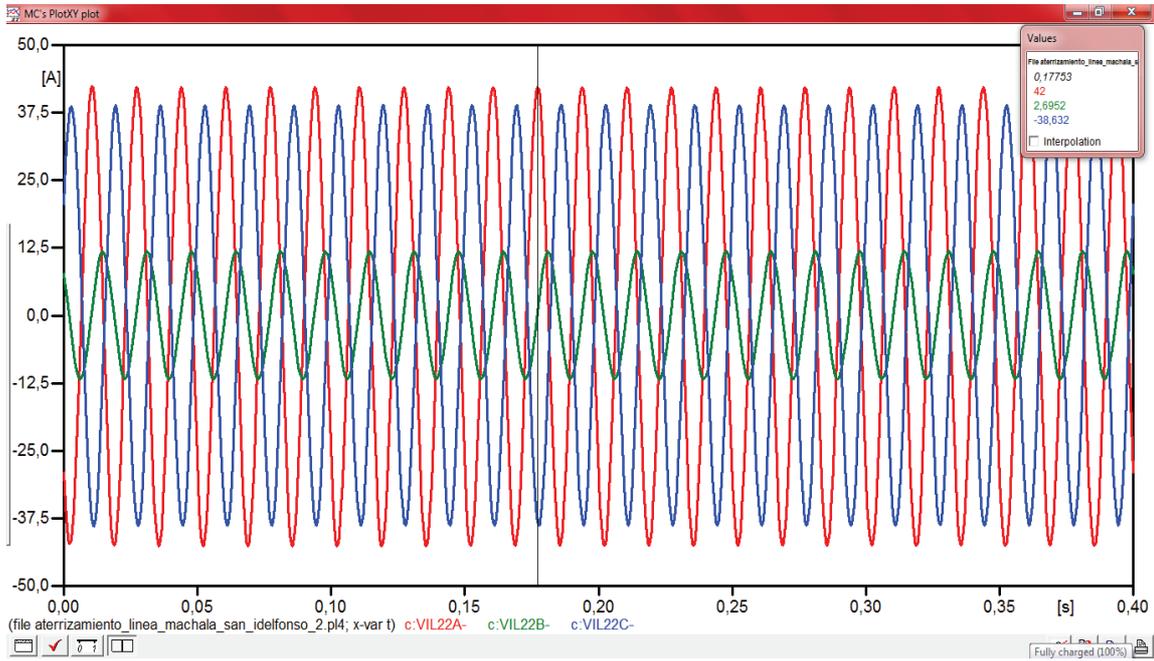


FIGURA A1.6 Corriente inducida ante el aterrizamiento de la L/T – ATP – L/T sin transposición

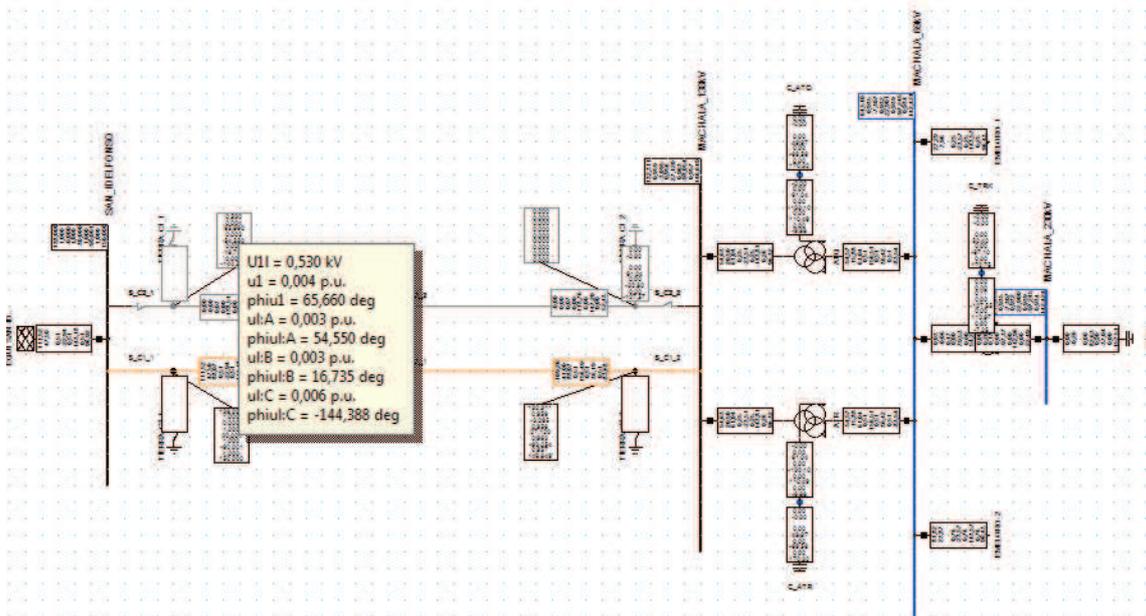


FIGURA A1.7 Voltaje punta inducido cuando la L/T esta aterrizada solo en uno de sus extremos – DigSILENT Power Factory – L/T sin transposición

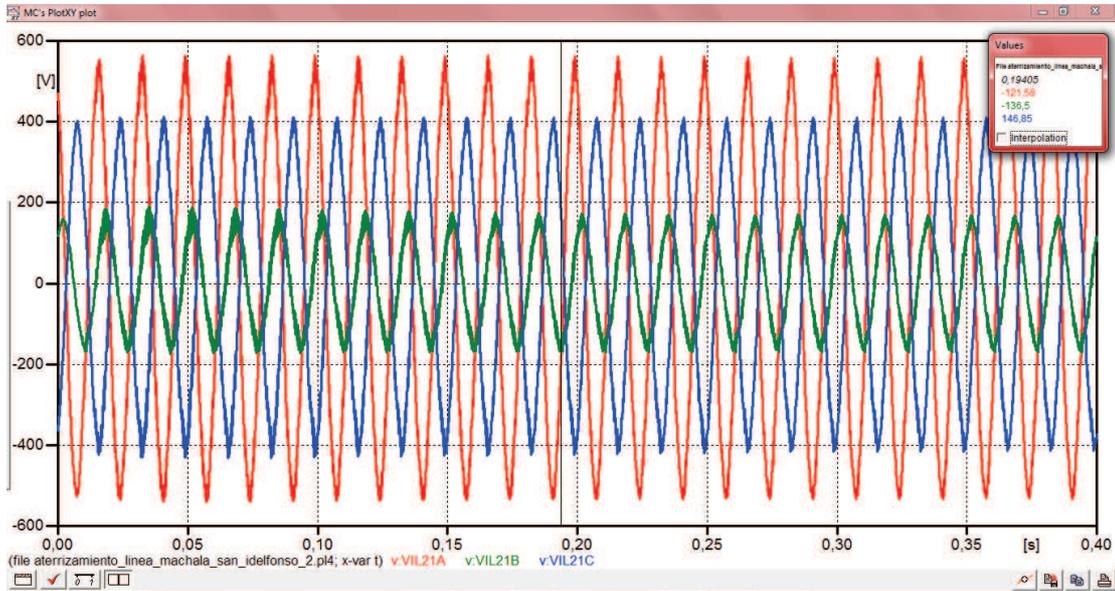


FIGURA A1.8 Voltaje punta inducido cuando la L/T esta aterrizada solo en uno de sus extremos – ATP – L/T sin transposición

- **L/T CON TRANSPOSICIÓN**

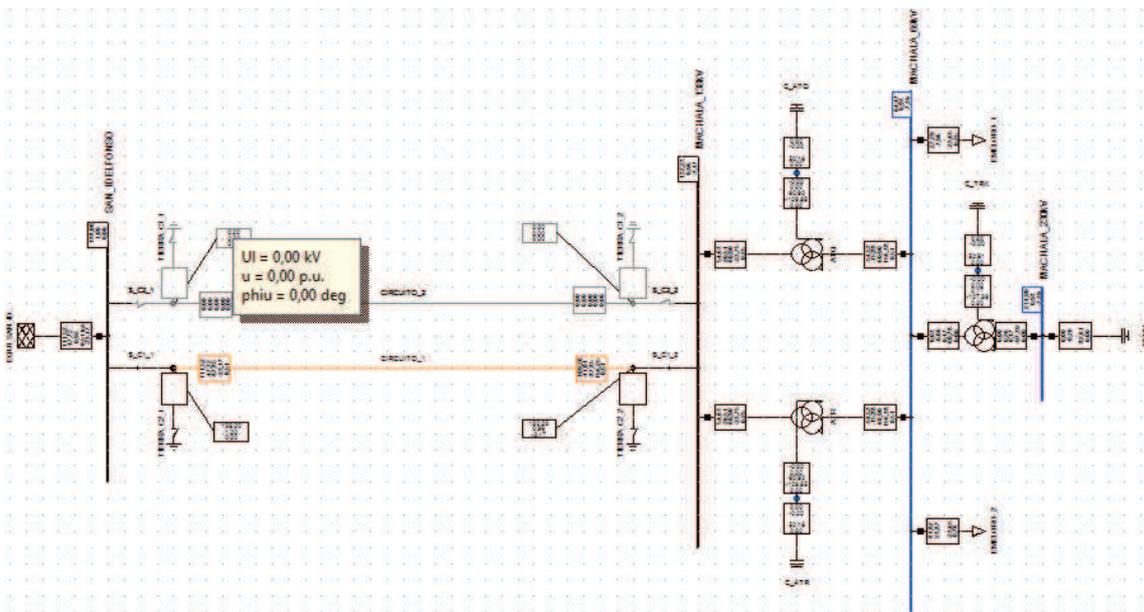


FIGURA A1.9 Voltaje inducido en el extremo de San Idelfonso – DigSILENT Power Factory – L/T transpuesta

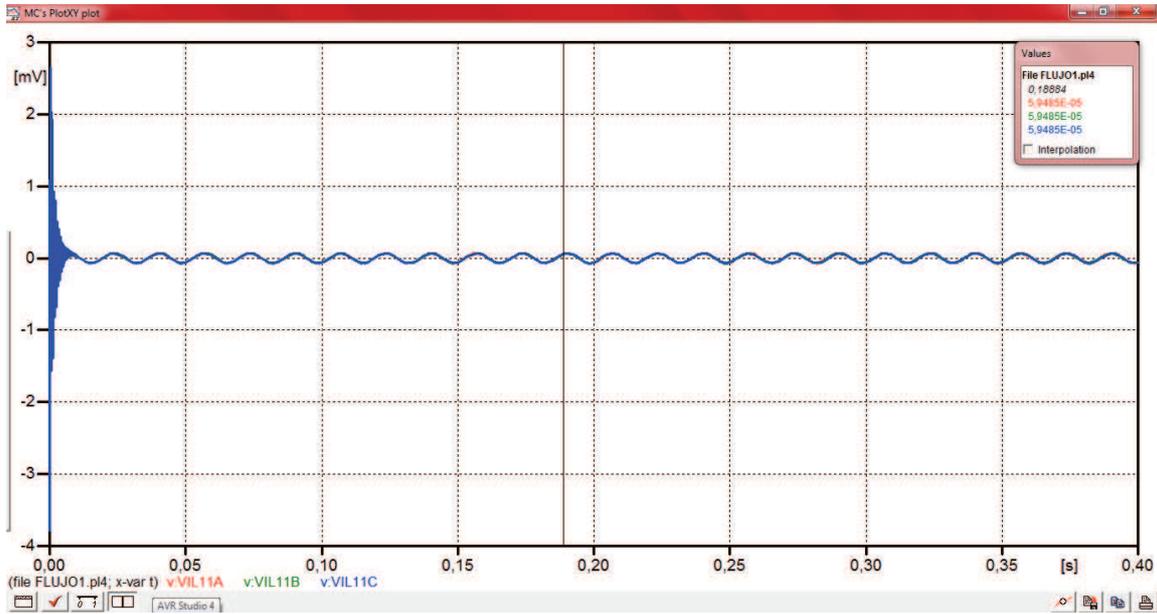


FIGURA A1.10 Voltaje inducido en el extremo de San Idelfonso – ATP – L/T transpuesta

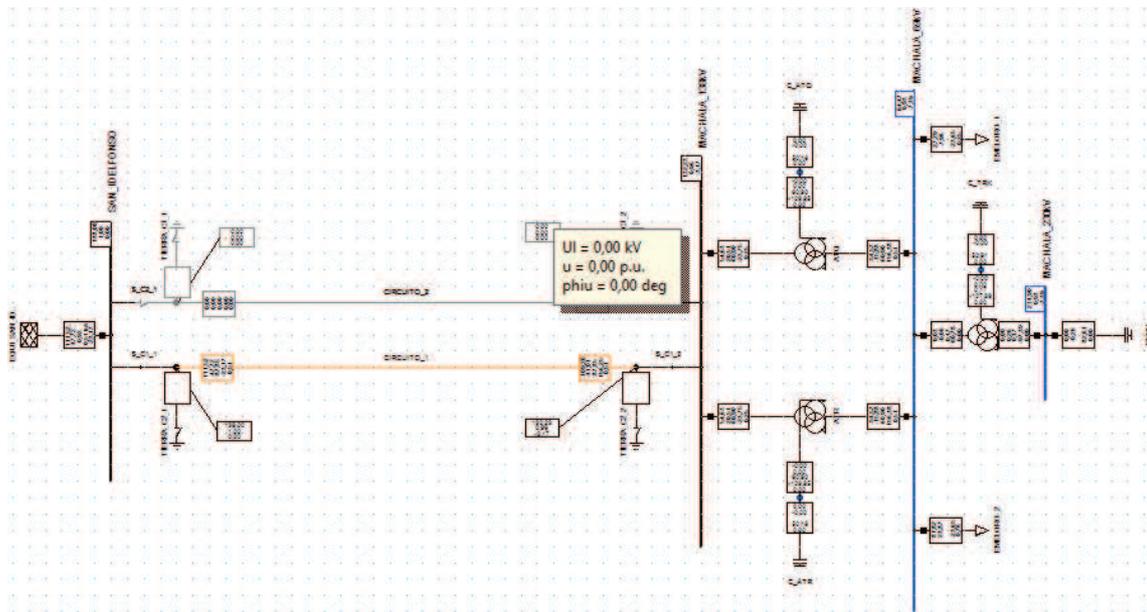


FIGURA A1.11 Voltaje inducido en el extremo de Machala – DigSILENT Power Factory – L/T transpuesta

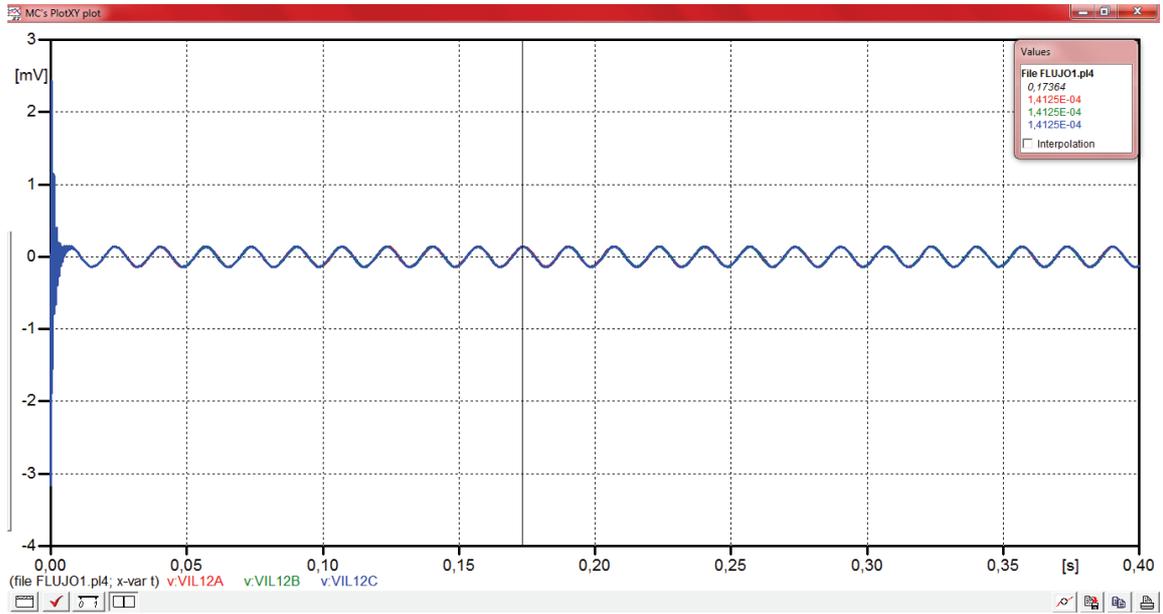


FIGURA A1.12 Voltaje inducido en el extremo de Machala – ATP – L/T transpuesta

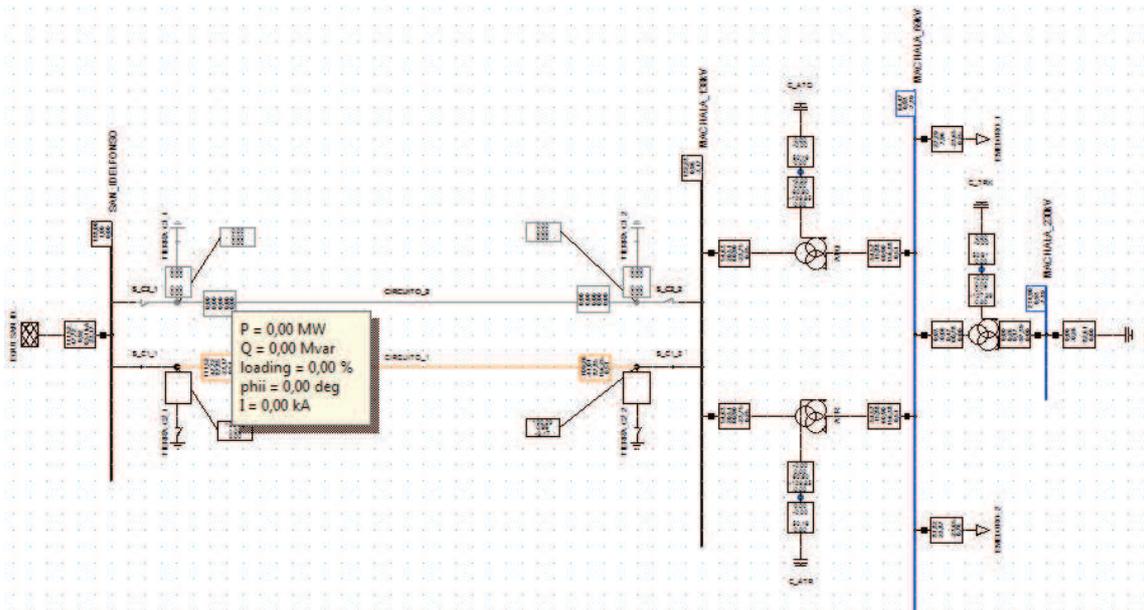


FIGURA A1.13 Corriente inducida ante el aterrizaje de la L/T – DigSILENT
Power Factory – L/T transpuesta

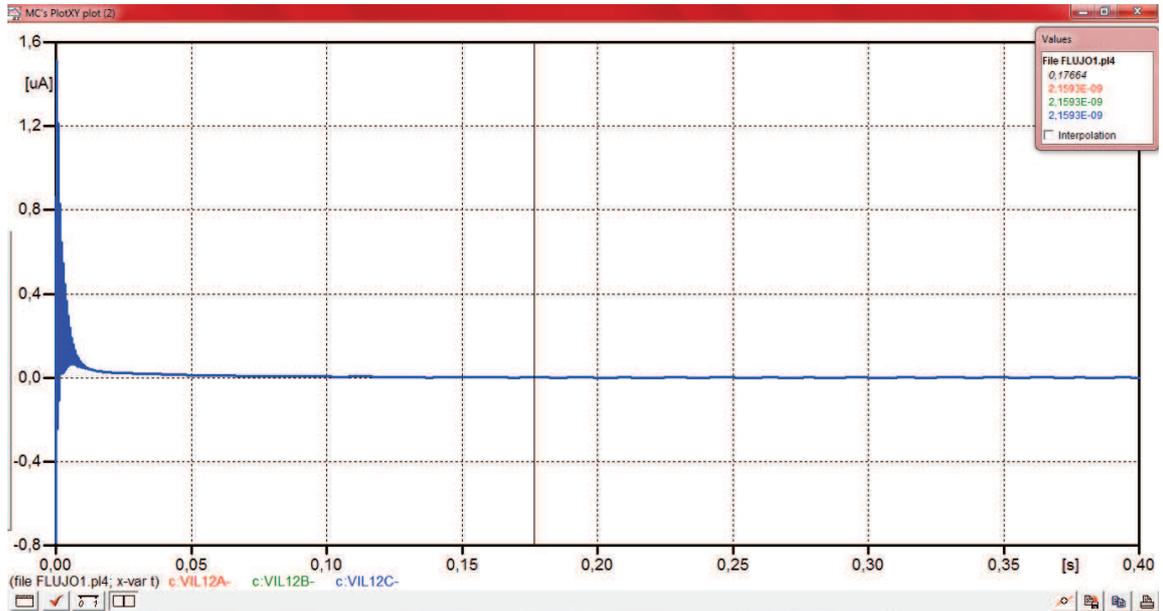


FIGURA A1.14 Corriente inducida ante el aterrizamiento de la L/T – ATP – L/T transpuesta

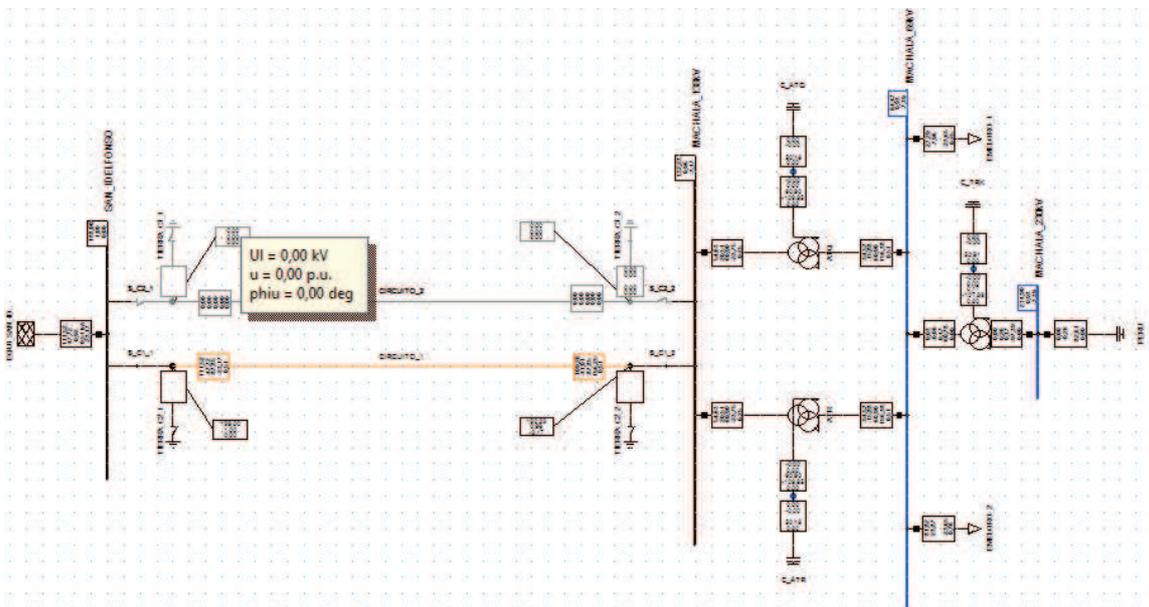


FIGURA A1.15 Voltaje punta inducido cuando la L/T esta aterrizada solo en uno de sus extremos – DigSILENT Power Factory – L/T transpuesta

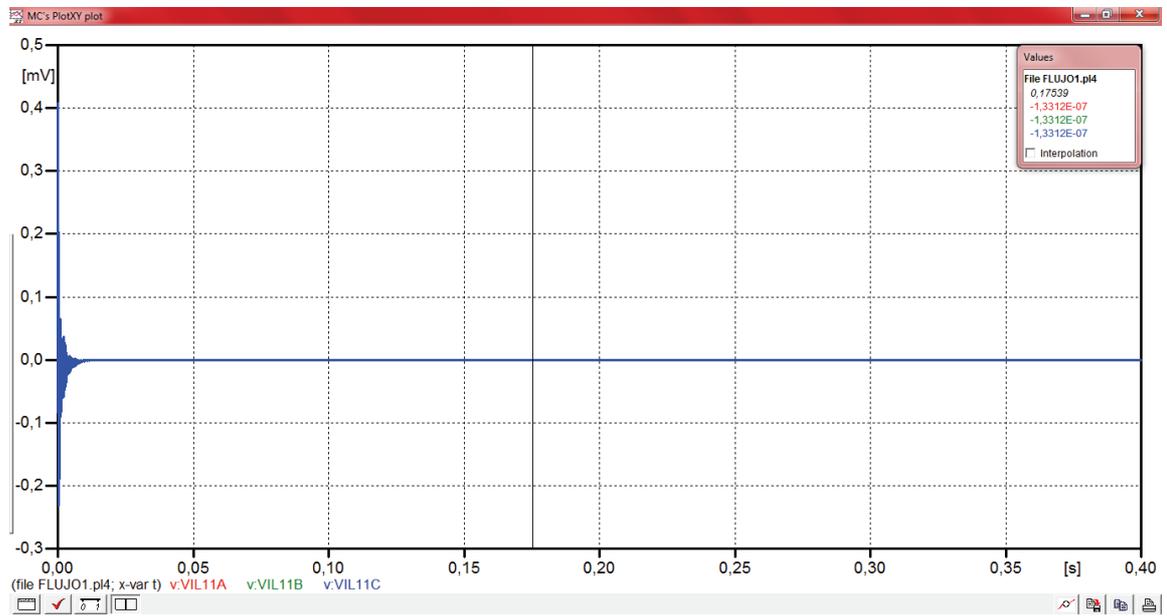


FIGURA A1.16 Voltaje punta inducido cuando la L/T esta aterrizada solo en uno de sus extremos – ATP – L/T transpuesta

ANEXO 2

MODELACIÓN COMPLETA DEL SEP Y DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL EN ATP

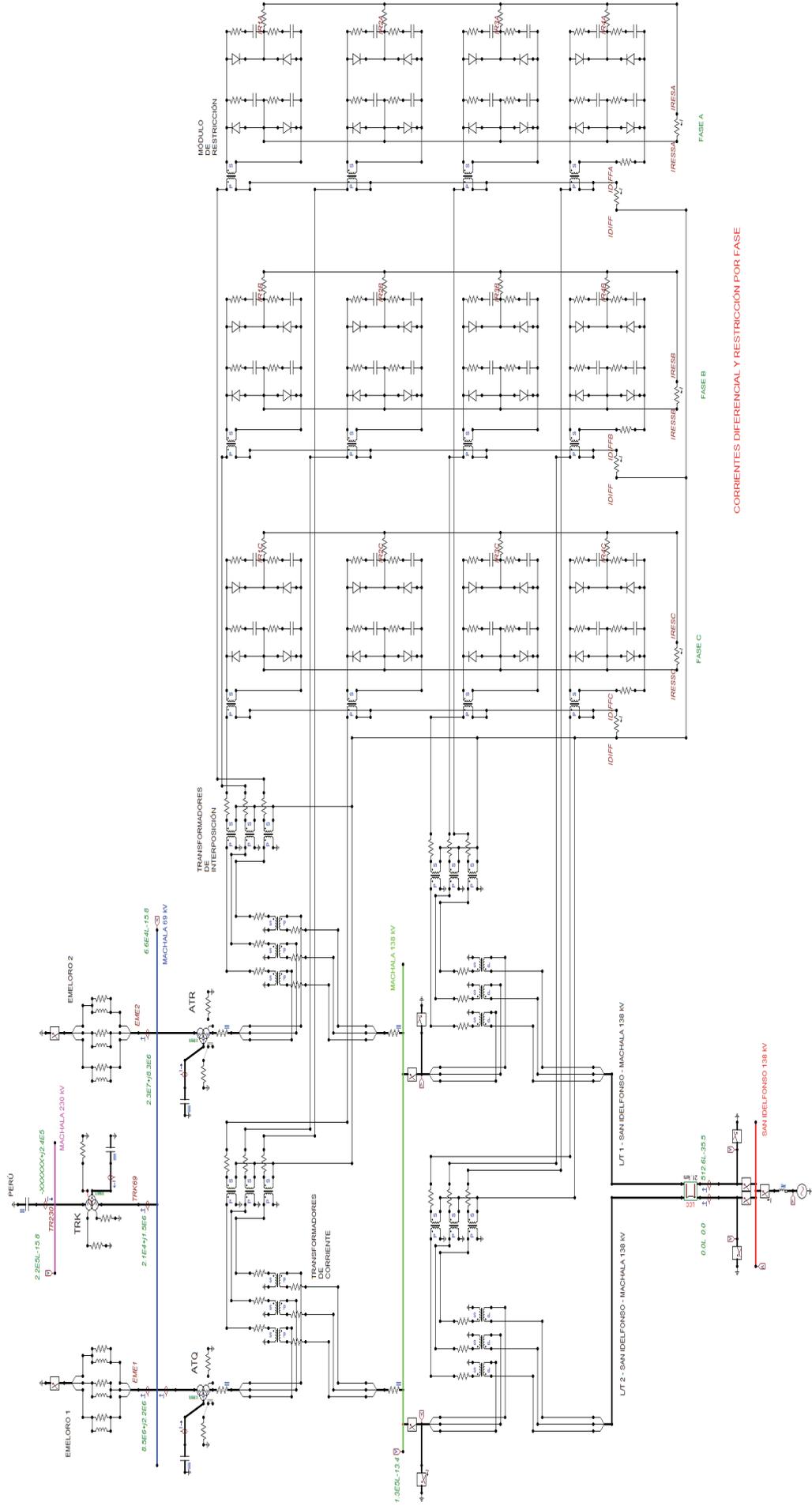


FIGURA A2.1: Modelación completa del SEP y de la protección diferencial en ATP

ANEXO 3

MANUAL DE USUARIO DE APDB – 87B (2.0)

a) DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

La rutina de programación APDB – 87B (2.0) (Análisis de la Protección de Barra), permite analizar la operación del relé diferencial de barra ante fallas, energizaciones, pruebas de inyección, etc., con los ajustes que este tenga por defecto.

El código de programación que utiliza APDB – 87B (2.0) consta de archivos tales como:

- *.m
- *.fig
- *.jpg
- *.png
- *.pdf

Para el manejo sencillo del programa por parte del usuario, este consta con una interfaz gráfica de usuario (GUIDE), la cual contiene todos los archivos mencionados, los cuales son utilizados de acuerdo a la ejecución del programa.

b) REQUERIMIENTO DEL SOFTWARE Y HARDWARE

Para la ejecución del programa son necesarios los siguientes requerimientos:

Software

- Windows 7
- MATLAB 7.7.0.471 (R2008b)
- Adobe Reader XI

Hardware

- Procesador Intel(R) Core(TM) i5 – CPU, 2410M – 2.3 GHz
- Memoria RAM de 6 GB

c) ACCESO Y EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Para acceder a APDB – 87B (2.0), primero se debe ejecutar el programa MATLAB, posteriormente se abre el archivo *.m llamado presentacion.m, tal y como se indica en la figura:

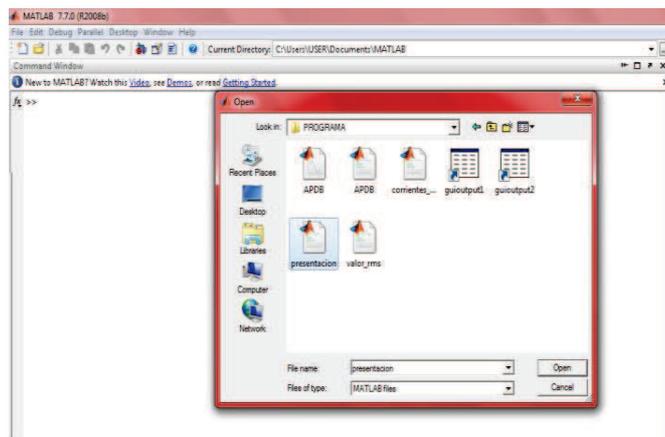


FIGURA A3.1: Ventana para buscar y abrir el archivo *.m llamado presentacion.m

Después de abrir el archivo presentacion.m, aparece una nueva ventana de edición de archivos *.m, en esta se debe correr el programa presionando el botón Save and run presentacion.m, el cual se encuentra en la barra de herramientas, como se indica a continuación:

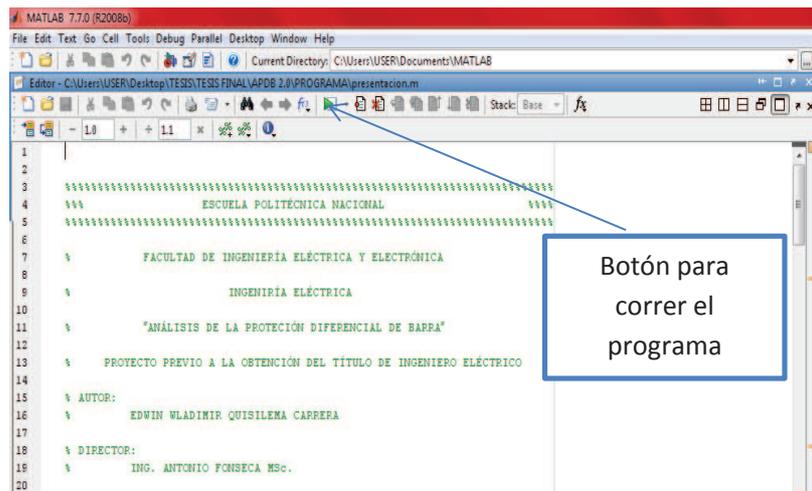


FIGURA A3.2: Ventana para la ejecución de la rutina de programación

Al momento de correr la rutina de programación es posible que sea necesario actualizar 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 la opción Change Directory (cambiar directorio):

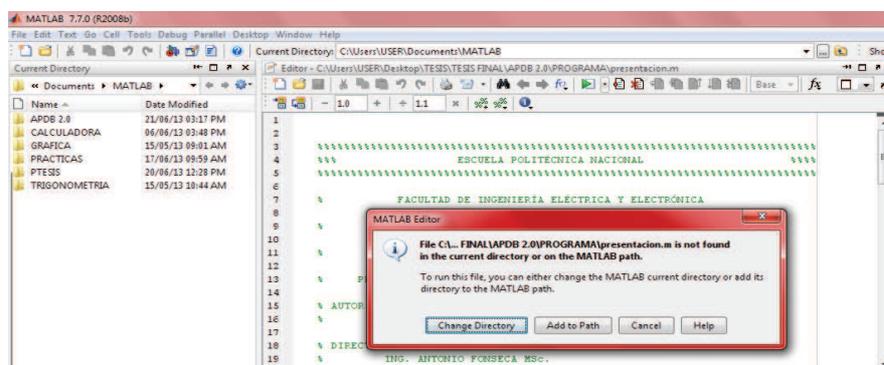


FIGURA A3.3: Ventana para actualizar la dirección de los archivos *.m

Luego de ejecutar el programa, y al no tener ningún error, aparece la presentación general de APDB – 87B (2.0), en esta misma ventana se presenta una opción de acceso a la siguiente ventana de la rutina de programación, lo cual se logra presionando la opción continuar, tal como se indica en la figura A3.4.

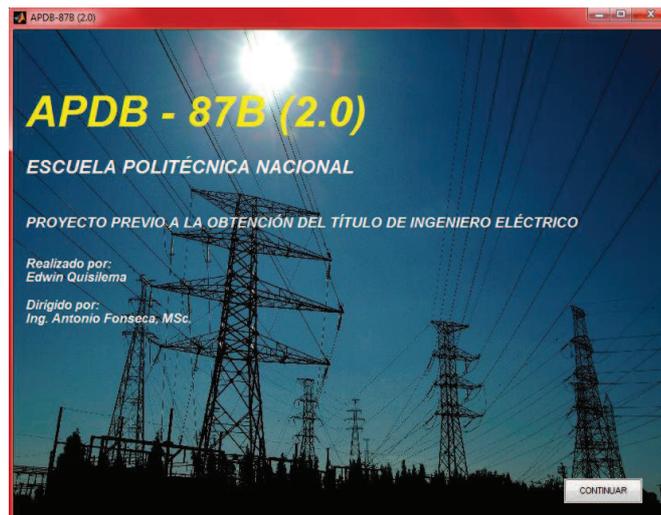


FIGURA A3.4: Caratula de la rutina de programación APDB – 87B (2.0)

Una vez que se ingresa al programa, es necesario el ingreso de los diferentes valores, los cuales deben ser ingresados de una manera correcta para el correcto funcionamiento de la rutina de programación, esto se detalla a continuación.

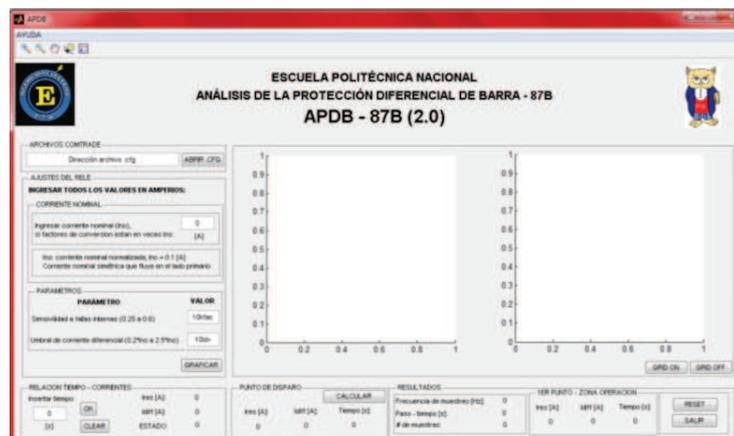


FIGURA A3.5: Ventana principal de APDB – 87B (2.0)

c.1. INGRESO DE LOS ARCHIVOS COMTRADE

En parte superior izquierda de la ventana de APDB – 87B (2.0), se encuentra el botón ABRIR .CFG, luego de presionarlo aparece una nueva ventana en la que se debe seleccionar el archivo COMTRADE. Una vez seleccionado el archivo *.cfg, automáticamente se carga el archivo *.dat del mismo nombre.

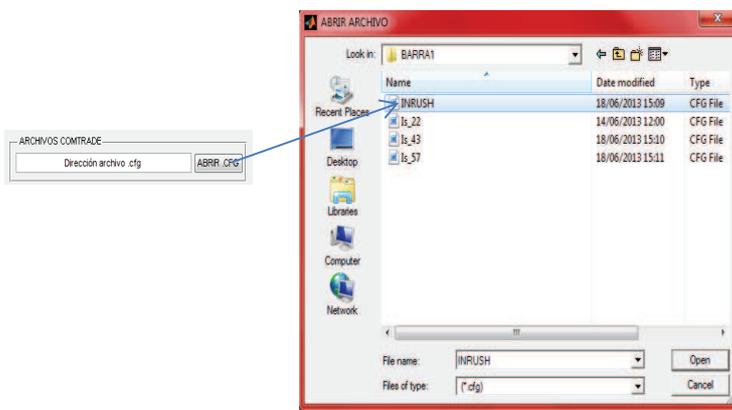


FIGURA A3.6: Ingreso del PAT de los archivos COMTRADE

c.2. AJUSTES DEL RELÉ

En los ajustes del relé es necesario ingresar todos los valores en amperios para el correcto funcionamiento del programa.

AJUSTES DEL RELÉ

INGRESAR TODOS LOS VALORES EN AMPERIOS:

CORRIENTE NOMINAL

Ingresar corriente nominal (Ino),
si factores de conversión están en veces Ino: [A]

Ino: corriente nominal normalizada; Ino = 0.1 [A]
Corriente nominal simétrica que fluye en el lado primario

PARAMETROS

PARÁMETRO	VALOR
Sensibilidad a fallas internas (0.25 a 0.8)	10kfac
Umbral de corriente diferencial (0.2*Ino a 2.5*Ino)	10Id>

GRAFICAR

FIGURA A3.7: Ingreso de los valores de ajuste del relé

c.2.1. Corriente nominal

En esta opción que presenta APDB – 87B (2.0), es necesario la información del archivo COMTRADE, si este está en amperios, el valor de corriente nominal se queda en cero, mientras que si el archivo COMTRADE está en veces la corriente nominal es necesario ingresar el valor de la corriente nominal del relé, en este caso la corriente nominal para este relé es 100 mA.

CORRIENTE NOMINAL

Ingresar corriente nominal (Ino),
si factores de conversión están en veces Ino: [A]

Ino: corriente nominal normalizada; Ino = 0.1 [A]
Corriente nominal simétrica que fluye en el lado primario

FIGURA A3.8: Ingreso del valor de la corriente nominal del relé

c.2.2. Parámetros

En esta opción, se debe ingresar los valores de la característica de operación del relé diferencial de barra.

El valor 10kfac, es el valor de sensibilidad ante fallas internas, el cual varía de 0.25 a 0.8 para este relé, este valor es adimensional.

El valor 10ld>, es el valor umbral de corriente diferencial, el cual varía de 0.2 a 2.5 veces la corriente nominal.

PARAMETROS

PARÁMETRO	VALOR
Sensibilidad a fallas internas (0.25 a 0.8)	10kfac
Umbral de corriente diferencial (0.2*Ino a 2.5*Ino)	10ld>

FIGURA A3.9: Ingreso de los valores de ajuste de la característica de operación del relé

c.2.3. Graficar

Una vez ingresados los valores indicados, se procede a presionar el botón GRAFICAR, el cual nos grafica la característica de operación del relé, y en el mismo gráfico la corriente diferencial con respecto a la corriente de restricción.

En la otra figura se reproduce la gráfica de la corriente diferencial y la corriente de restricción con respecto al tiempo.

Además se reproduce el gráfico del primer punto que entra a la zona de operación, y los valores de este proceso se presentan en la opción resultados.

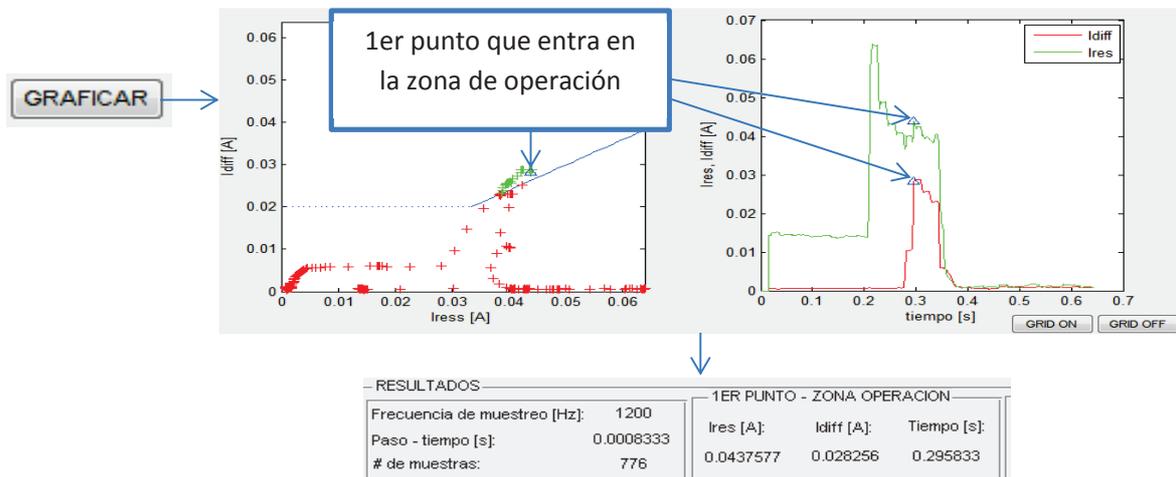


FIGURA A3.10: Gráfica de corrientes y característica de operación del relé

c.3. PUNTO DE DISPARO

Esta opción de APDB – 87B (2.0), permite encontrar el punto en el que se produce el disparo siempre y cuando el archivo COMTRADE presente un canal digital, caso contrario, al presionar el botón calcular se produce un mensaje en el cual se indica que no existen canales digitales.

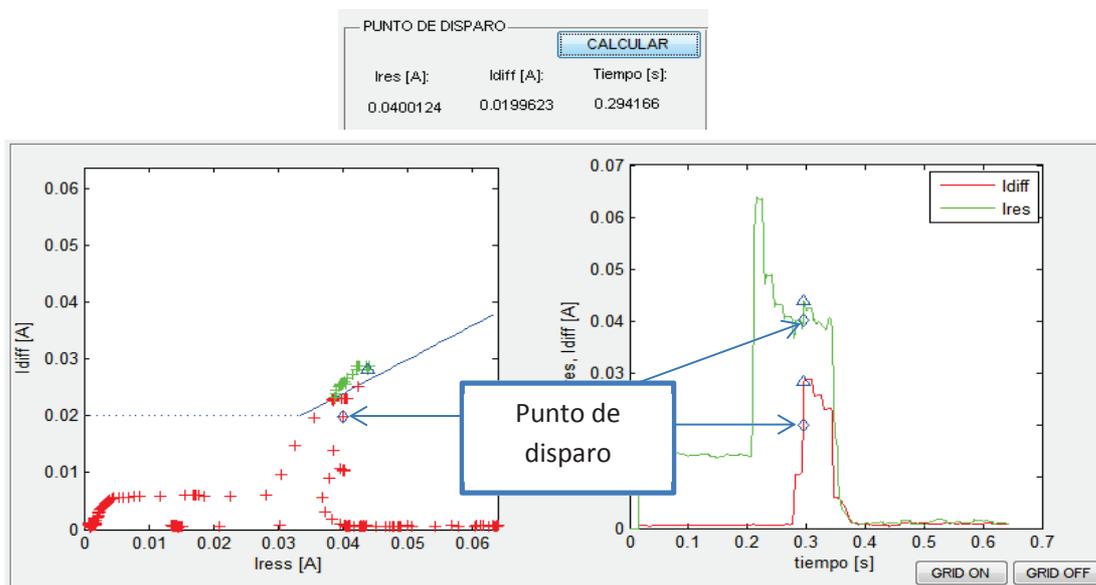


FIGURA A3.11: Cálculo del punto de disparo del relé

c.4. RELACIÓN TIEMPO – CORRIENTES

El cálculo de la relación tiempo corrientes, permite navegar tanto en la gráfica corrientes vs tiempo como en la gráfica corrientes vs corrientes, basta con ingresar el tiempo y presionar OK, los resultados se presentan de manera detallada tal y como se indica en la figura A3.12. Para realizar el cálculo de un nuevo punto es necesario presionar CLEAR y realizar el proceso ya indicado. Es necesario recalcar que una vez que se presiona el boton OK se produce tambien el gráfico del punto en las diferentes gráficas.

La opción ESTADO es cero cuando el punto esta fuera de la zona de operación, y es uno cuando esta dentro de la zona de operación.

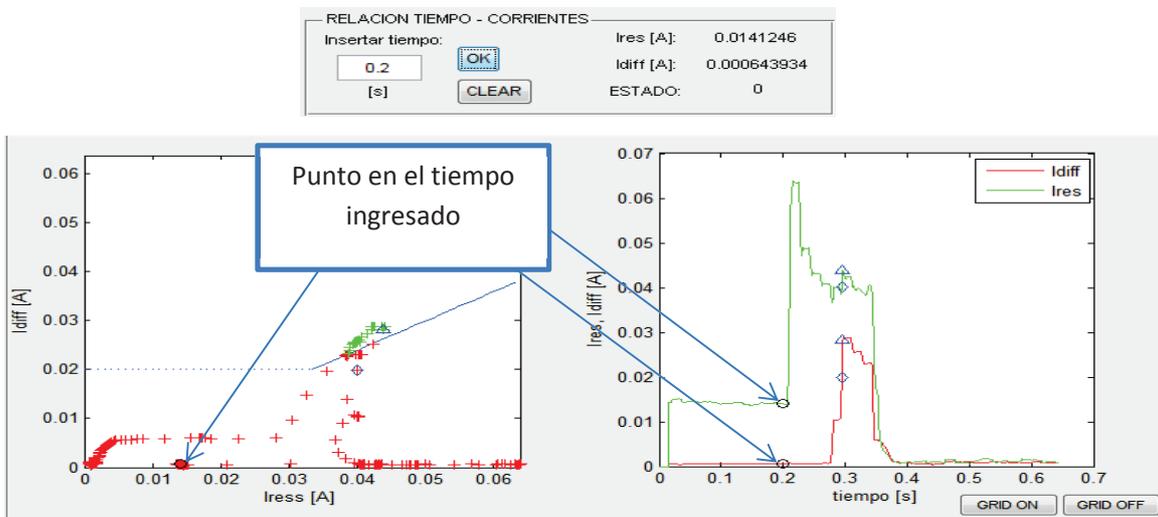


FIGURA A3.12: Cálculo del punto, relación tiempo – corrientes

c.5. GRID ON – GRID OFF

Con esta opción se activa o desactiva las cuadrículas en las dos gráficas.



FIGURA A3.13: Activar o desactivar cuadrículas

c.6. RESET

Para realizar el análisis de un nuevo archivo COMTRADE, se debe presionar el botón RESET, el cual inicializa el programa, posteriormente se procede a realizar el proceso ya indicado nuevamente.



FIGURA A3.14: Botón para inicializar el programa

c.7. COMPLEMENTOS DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN APDB – 87B (2.0)

En la parte superior izquierda del programa se encuentra la barra de menú, en la cual existe la opción manual de usuario, al seleccionar esta opción inmediatamente se despliega un archivo formato PDF.

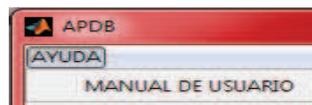


FIGURA A3.15: Ayuda de APDB – 87B (2.0)

También, en la parte superior izquierda del programa se encuentra la barra de herramientas, la cual nos permite la manipulación de los gráficos, para una mayor facilidad al momento del análisis.

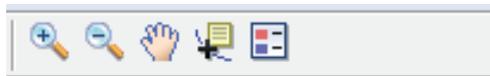


FIGURA A3.16: Barra de herramientas de APDB – 87B (2.0)

Finalmente para salir de la rutina de programación APDB – 87B (2.0), se debe seleccionar el botón salir que se encuentra en la parte inferior derecha de la ventana. Después de hacer clic en esta opción, se presenta una ventana (figura A3.17), y según la opción seleccionada permite salir de la rutina de programación, o regresar a APDB – 87B (2.0)



FIGURA A3.17: Salir de APDB – 87B (2.0)