



**INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE CD. MADERO**



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“PROTECCIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON EL
ALGORITMO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. BRYAN HADEMAR VAZQUEZ CORDOVA

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. JUAN DE DIOS RODRIGUEZ CARTAGENA.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

Cd. Madero, Tamps; a 04 de Febrero de 2010.

OFICIO No.: U2.019/10
AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

**C. ING. BRYAN HADEMAR VÁZQUEZ CORDOVA
PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"PROTECCIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON EL ALGORITMO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL"

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTA MENTE
"Por mi Patria y por mi Bien"

Ma. Yolanda Chávez Cinco
M. P. MARÍA YOLANDA CHÁVEZ CINCO
JEFA DE LA DIVISIÓN

c.c.p.- Archivo

MYCHC 'HCV' aygc



S.E.P.
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION
I T C M

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

Cd. Madero, Tamps; a 04 de Febrero de 2010.

OFICIO No.: U2.019/10
AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

**C. ING. BRYAN HADEMAR VÁZQUEZ CORDOVA
PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"PROTECCIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON EL ALGORITMO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL"

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTA MENTE
"Por mi Patria y por mi Bien"

Ma. Yolanda Chávez Cinco
M. P. MARÍA YOLANDA CHÁVEZ CINCO
JEFA DE LA DIVISIÓN

c.c.p.- Archivo

MYCHC 'HCV' 'aygc'



S.E.P.
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION
I T C M

Dedicatorias

*A mi esposa
Beatriz Adriana Cabrera Aguilar
Que amo con toda mi alma.*

*A mis hijos
Bryan Alejandro y Axel Hademar
Por ser mi motivación.*

*A Alberto V.
Por enseñarme a pescar.*

*A Guadalupe Córdova
Por que ha estado siempre.*

Agradecimientos

A Dios

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Protección de la línea de transmisión con el algoritmo
de la ecuación diferencial**

Tesista: Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdova

Director de tesis: M.C. Juan de Dios Rodríguez Cartagena

Resumen

La presente tesis trata de la simulación del cortocircuito de un sistema de potencia modelado en el software AtpDraw, posteriormente se realiza un análisis numérico en el software Matlab, considerando que en una línea de transmisión cuando una falla se presenta y si se considera que ocurre a una distancia determinada, es posible expresar la ecuación de la línea de transmisión en forma diferencial.

El algoritmo basado en la ecuación diferencial determina la localización de una falla utilizando los valores de resistencia y reactancia de la línea de transmisión que existe en el momento de su ocurrencia. Los valores de resistencia y reactancia están en proporción a longitudes de líneas por lo tanto R y L son dependientes de la línea, por esto es posible estimar la distancia a la falla resolviendo una ecuación diferencial en Matlab.

En este proyecto para el desarrollo del algoritmo se considera el uso de filtros digitales con el objeto de mejorar su precisión y límites de actuación ante una falla monofásica, con un filtro de Butterworth la falla es analizada, con y sin carga, además se analiza la falla con cambio en la impedancia de falla, y cruce por diferentes instantes de la magnitud de voltaje. Se comprueba la exactitud del estimado al punto fallado mostrando la localización y la zona en la que ocurrió la falla.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Protection of the transmission line with the algorithm
of the differential equation**

Tesista: Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdoba

Director of thesis: M.C. Juan de Dios Rodríguez Cartagena

Abstract

This thesis is the simulation of short circuit of a power system modeling software AtpDraw then performed a numerical analysis software in Matlab, whereas in a transmission line when a fault occurs and if one considers that occurs a given distance, it is possible to express the equation of the transmission line in differential form.

The algorithm based on the differential equation determines the location of a fault using the values of resistance and reactance of the transmission line that exists at the time of its occurrence. The resistance and reactance values are proportional to line lengths therefore R and L are dependent on the line, it is possible to estimate the distance to the failure to solve a differential equation in Matlab.

In this project for the development of the algorithm is considering the use of digital filters in order to improve accuracy and performance limits to a single phase fault, with a Butterworth filter failure is analyzed, with and without load, also discusses the fails to change in impedance fault, and different times crossing the magnitude of voltage. It verifies the accuracy of the estimate failed to point showing the location and the area in which the failure occurred.

Índice

	<i>Página</i>
Índice.....	i
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	xi

CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Hipótesis.....	2
1.3	Objetivo.....	3
1.3	Justificación.....	3

CAPITULO II MARCO TEORICO

2.1	INTRODUCCION.....	4
2.2	MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	4
	2.2.1 Líneas largas.....	6
	2.2.2 Líneas medias.....	6
	2.2.1 Líneas cortas.....	7
2.3	CONFIGURACIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	8
	2.3.1 Líneas de dos terminales.....	8
	2.3.2 Líneas en anillo.....	9
	2.3.3 Líneas paralelas de dos o mas circuitos.....	9
2.4	COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.....	10
2.5	ENLACES DE COMUNICACIONES.....	11
	2.5.1 Características Funcionales.....	12
	2.5.2 Características requeridas por los sistemas de protección....	12
	2.5.2.1 Hilo piloto.....	12
	2.5.2.2 Onda portadora.....	13
	2.5.2.3 Fibra optica.....	14
	2.5.2.4 Radio UHF.....	14
2.6	IMPEDANCIA DE FALLA.....	15
2.7	DISPAROS Y SEÑALIZACION DE FALLA.....	16
2.8	DISCRETIZACION DE SEÑALES.....	16
2.9	PROTECCION DE DISTANCIA.....	17
	2.9.1 Característica mínima de impedancia.....	18

2.9.2	Característica mho.....	18
2.9.3	Característica lenticular.....	18
2.9.4	Característica cuadrilateral.....	19
2.9.5	Característica reactancia con mho.....	19
2.10	TIPOS DE FILTROS.....	21
2.10.1	Filtro de Butterworth.....	23

CAPITULO III MODELADO DE LA LINEA DE TRANSMISION

3.1	INTRODUCCION.....	25
3.2	CARACTERISTICAS GENERALES DE LINEAS DE TRANSMISION.....	25
3.2.1	Líneas aéreas.....	26
3.3	IMPEDANCIA DE LINEAS DE TRANSMISION.....	30
3.3.1	Resistencia de la línea.....	30
3.3.2	Resistencia de corriente directa.....	30
3.3.3	Efecto de la temperatura sobre la resistencia.....	31
3.3.4	Efecto piel.....	31
3.3.5	Efecto corona.....	33
3.4	ADMITANCIA PARALELO DE LA LINEA DE TRANSMISION.....	33
3.4.1	Conductancia de la línea de transmisión.....	34
3.4.2	Capacitancia monofásica.....	34
3.5	TRANSPOSICION DE CONDUCTORES EN LA LINEA DE TRANSMISION.....	35
3.6	SOFTWARE ATP.....	35
3.7	LINEA DE TRANSMISION BAJO ESTUDIO.....	37
3.8	MODELADO DE LA LINEA DE TRANSMISION EN EL PROGRAMA ATP DRAW.....	38
3.9	TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO.....	42
3.9.1	Transformadores de corriente.....	43
3.9.2	Transformadores de potencial.....	44
3.9.3	Transformadores de acoplamiento capacitivo.....	45
3.10	MODELADO DE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO EN EL PROGRAMA ATP DRAW.....	47
3.10.1	Modelado del transformador de corriente en el programa Atp Draw.....	47
3.10.2	Modelado del transformador de potencial en el programa Atp Draw.....	50
3.11	MODELADO DE LA CARGA EN EL PROGRAMA ATP DRAW.....	54
3.12	MODELADO DE LOS EQUIVALENTES DE SISTEMA DE POTENCIA EN EL PROGRAMA ATP DRAW.....	55

3.13	MODELADO DE LOS GENERADORES DEL SISTEMA DE POTENCIA EL PROGRAMA ATP DRAW.....	57
3.14	SIMULACION DE FALLA A TIERRA DE LA LINEA DE TRANSMISION BAJO ESTUDIO.....	59

CAPITULO IV DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LA ECUACION DIFERENCIAL.

4.1	INTRODUCCION.....	63
4.2	SOLUCION DEL MODELO MONOFASICO DE LA ECUACION DIFERENCIAL.....	63
4.3	SOFTWARE MATLAB.....	67
4.3.1	Conversión .PL4 a .MAT para análisis numérico del algoritmo.....	67
4.4	DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LA ECUACION DIFERENCIAL EN MATLAB.....	70
4.4.1	Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión con carga y sin filtrado.....	72
4.4.2	Diseño del filtro de Butterworth para el algoritmo de la ecuación diferencial en Matlab.....	77
4.4.3	Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión con carga con filtro de Butterworth	78
4.4.4	Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión sin carga, sin filtrado.....	84
4.4.5	Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión sin carga, con filtro de Butterworth.....	87

CAPITULO V ANALISIS DE RESULTADOS.

5.1	INTRODUCCION.....	89
5.2	ANALISIS DE LA FALLA AL 10% DE LA LINEA DE TRANSMISION SIN FILTRO DE BUTTERWORTH.....	89
5.3	ANALISIS DE LA FALLA AL 50% DE LA LINEA DE TRANSMISION SIN FILTRO DE BUTTERWORTH.....	91
5.4	ANALISIS DE LA FALLA AL 90% DE LA LINEA DE TRANSMISION SIN FILTRO DE BUTTERWORTH.....	93
5.5	ANALISIS DE LA FALLA AL 10% DE LA LINEA DE TRANSMISION CON FILTRO DE BUTTERWORTH.....	95
5.6	ANALISIS DE LA FALLA AL 50% DE LA LINEA DE TRANSMISION CON FILTRO DE BUTTERWORTH.....	96
5.7	ANALISIS DE LA FALLA AL 90% DE LA LINEA DE TRANSMISION CON FILTRO DE BUTTERWORTH.....	97
5.8	ANALISIS DE LA FALLA OCURRIDA EN DIFERENTES	

	MAGNITUDES DE VOLTAJE CON FILTRO DE BUTTERWORTH..	98
5.9	ANALISIS DE LA FALLA AL 10% CON FILTRO DE BUTTERWORTH CON CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE FALLA.....	101
5.10	ANALISIS DE LA FALLA AL 50% CON FILTRO DE BUTTERWORTH CON CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE FALLA.....	102
5.11	ANALISIS DE LA FALLA AL 90% CON FILTRO DE BUTTERWORTH CON CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE FALLA.....	104
5.12	APERTURA DE INTERRUPTORES DE LA LINEA DE TRANSMISION Y LOCALIZACION DEL ESTIMADO AL PUNTO FALLADO.....	107
 CAPITULO VI CONCLUSIONES.		
6.1	CONCLUSIONES.....	115
6.2	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	116
 Apéndice A: CÓDIGO FUENTE DEL ALGORITMO DE LA ECUACION DIFERENCIAL.		
A.1	CODIGO FUENTE EN MATLAB.....	118
 Apéndice B: CARACTERISTICAS FISICAS Y ELECTRICAS DE CONDUCTORES.		
B.1	CONDUCTORES.....	123
	Referencias.....	125

Lista de figuras

	<i>Pagina</i>
Figura 2.1. Circuito equivalente de conductor corto.....	4
Figura 2.2. Línea con constantes distribuidas.	5
Figura 2.3. Circuito equivalente líneas largas (Pi).....	6
Figura 2.4. Circuito equivalente líneas medias.....	7
Figura 2.5. Circuito equivalente líneas cortas.....	7
Figura 2.6. Tensión en el Relé de Distancia para una Falla en la Línea.....	15
Figura 2.7. El proceso de muestreo.....	17
Figura 2.8. Relés con característica Impedancia, Mho y Lenticular.....	19
Figura 2.9. Reactancia.....	19
Figura 2.10. Filtros de Butterworth de varios órdenes.....	24
Figura 3.1. Tipos de conductores.....	27
Figura 3.2. Características de construcción de Conductor ACSR.....	27
Figura 3.3. Aisladores de suspensión de Porcelana.....	28
Figura 3.4. Aisladores de suspensión Vidrio templado.....	28
Figura 3.5. Estructuras mas usadas en líneas de transmisión.....	29
Figura 3.6. Fundaciones de tierra.....	29
Figura 3.7. Sección transversal de un conductor mostrando dos de sus filamentos.....	31
Figura 3.8. Línea monofásica para el análisis de capacitancias.....	34
Figura 3.9. Esquema de la transposición completa de una línea de transmisión.....	35
Figura 3.10. ATPDraw ventana que muestra la mayoría de los componentes predefinidos.....	36
Figura 3.11. Estructura de la línea de transmisión.....	38
Figura 3.12. Representación de la línea de transmisión.....	38
Figura 3.13. Información del modelo de línea en el programa ATP.....	39
Figura 3.14. Información del modelo de los alimentadores en el programa ATP.....	40
Figura 3.15. Configuración de las fases e hilo de guarda en Atp Draw.....	42
Figura 3.16. Partes de las que esta conformado un transformador de corriente...	43
Figura 3.17. Diagrama unifilar simplificado para un transformador de corriente.....	43
Figura 3.18. Partes de las que esta conformado un transformador de corriente...	44
Figura 3.19. Transformadores con capacitor de acoplamiento.....	45
Figura 3.20. Diagrama unifilar simplificado para un transformador de potencial.	46
Figura 3.21. Modelado de los TC en el programa Atp Draw.....	47

Figura 3.22.	Ventana de Datos del Transformador de Corriente en el software ATP Draw.....	48
Figura 3.23.	Ventana de Datos de la Característica de Saturación del TC.....	48
Figura 3.24.	Ventana de Datos de la Carga del TC.....	50
Figura 3.25.	Modelado de los Tp`s en el programa Atp Draw.....	50
Figura 3.26.	Ventana de Datos del Transformador de Corriente en el software ATPDraw.....	51
Figura 3.27.	Ventana de Datos del Capacitor 1 del Transformador de Potencial en el software ATP Draw.....	52
Figura 3.28.	Ventana de Datos del capacitor 2 del Transformador de Potencial en el software ATPDraw.....	53
Figura 3.29.	Ventana de Datos de la Carga en el secundario del Transformador de Potencial en el software ATPDraw.....	53
Figura 3.30.	Modelo de la carga en el software ATPDraw.....	54
Figura 3.31.	Ventana de datos para la carga en el software AtpDraw.....	54
Figura 3.32.	Modelo de equivalente de corto circuito 1 en el software ATP Draw.....	55
Figura 3.33.	Ventana de datos para el equivalente de cortocircuito 1 en el software Atp Draw.....	56
Figura 3.34.	Modelo de equivalente de corto circuito 2 en el software ATP Draw.....	56
Figura 3.35.	Ventana de datos para el equivalente de corto circuito 2 en el software Atp Draw.....	57
Figura 3.36.	Modelo del generador 1 en el software ATP Draw.....	57
Figura 3.37.	Ventana de datos para el generador 1 en el software Atp Draw.....	58
Figura 3.38.	Modelo del generador 2 en el software ATP Draw.....	58
Figura 3.39.	Ventana de datos para el generador 2 en el software Atp Draw.....	59
Figura 3.40.	Modelo de la línea de transmisión con falla monofásica a 30 KM...	60
Figura 3.41.	Ventana de datos para la cuchilla de puesta a tierra en el software Atp Draw.....	60
Figura 3.42.	Ventana de datos para la configuración del tiempo de simulación y muestras por segundo en ATPDraw.....	61
Figura 3.43.	Voltaje para la falla monofásica en Atp Draw.....	62
Figura 3.44.	Corriente para la falla monofásica en Atp Draw.....	62
Figura 4.1.	Modelo de un circuito serie R-L de una línea de transmisión.....	63
Figura 4.2.	Análisis de una función para la solución de la ecuación diferencial.	65
Figura 4.3.	Código en Matlab para importar graficas de .pl4 a .mat.....	68
Figura 4.4.	Modelo de la línea de transmisión con unidades medición de corriente y voltaje para análisis con carga.....	69
Figura 4.5.	Voltaje obtenido de la línea de transmisión en la simulación en ATP Draw.....	69
Figura 4.6.	Voltaje obtenido de la línea de transmisión en el programa Matlab.	70
Figura 4.7.	Valor base obtenido del la ecuación diferencial para el coeficiente kl.....	71

Figura 4.8.	Valor base obtenido del la ecuación diferencial para el coeficiente k_r	72
Figura 4.9.	Modelo del corto circuito al 10% de la línea de transmisión.....	73
Figura 4.10.	Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro.....	74
Figura 4.11.	Modelo del corto circuito al 50% de la línea de transmisión.....	75
Figura 4.12.	Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión sin filtro.	75
Figura 4.13.	Modelo del corto circuito al 90% de la línea de transmisión.....	76
Figura 4.14.	Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión sin filtro.....	76
Figura 4.15.	Filtro de Butterworth de orden 5.....	78
Figura 4.16.	Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth.....	80
Figura 4.17.	Estimado k_l de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth.....	81
Figura 4.18.	Estimado k_l de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth en los tres ciclos después de la falla.	82
Figura 4.19.	Estimado k_l de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth después de tres ciclos de ocurrida la falla.....	82
Figura 4.20.	Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión filtro de Butterworth.....	83
Figura 4.21.	Estimado k_l de la distancia al 50% de la línea de transmisión filtro de Butterworth con menos de tres ciclos de ocurrida la falla.....	83
Figura 4.22.	Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión filtro de Butterworth.....	84
Figura 4.23.	Modelo de la línea de transmisión con unidades medición de corriente y voltaje para análisis con carga.....	85
Figura 4.24.	Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro.....	85
Figura 4.25.	Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro.....	86
Figura 4.26.	Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro.	86
Figura 4.27.	Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth sin carga.....	87
Figura 4.28.	Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth sin carga.....	87
Figura 4.29.	Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth sin carga.....	88
Figura 4.30.	Comparación de la simulación con y sin filtro de Butterworth.....	88
Figura 5.1.	Análisis del estimado KR al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	89
Figura 5.2.	Análisis del estimado KR al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	90
Figura 5.3.	Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión con	

	carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	90
Figura 5.4.	Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 6 primeros ciclos de falla.....	90
Figura 5.5.	Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	91
Figura 5.6.	Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 6 primeros ciclos de falla.....	91
Figura 5.7.	Análisis del estimado KR al 50% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	92
Figura 5.8.	Análisis del estimado KR al 50% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	92
Figura 5.9.	Análisis del estimado KL al 50% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	92
Figura 5.10.	Análisis del estimado KL al 50% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 6 primeros ciclos de falla.....	93
Figura 5.11.	Análisis del estimado KL al 50% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	93
Figura 5.12.	Análisis del estimado KR al 90% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	93
Figura 5.13.	Análisis del estimado KR al 90% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	94
Figura 5.14.	Análisis del estimado KL al 90% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	94
Figura 5.15.	Análisis del estimado KL al 90% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	94
Figura 5.16.	Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	95
Figura 5.17.	Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 primeros ciclos de falla.....	95
Figura 5.18.	Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	96
Figura 5.19.	Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla.....	97
Figura 5.20.	Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 3 primeros ciclos de falla.....	98
Figura 5.21.	Análisis del algoritmo en diferentes instantes de la magnitud de voltaje.....	99
Figura 5.22.	Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla en el cruce por cero...	99
Figura 5.23.	Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla en el cruce por cero...	100
Figura 5.24.	Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla en el cruce por cero...	100
Figura 5.25.	Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 25 Ω en los 6 ciclos de falla.....	101

Figura 5.26.	Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 50 en los 6 ciclos de falla.....	101
Figura 5.27.	Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 75 en los 6 ciclos de falla.....	102
Figura 5.28.	Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 25 en los 6 ciclos de falla.....	103
Figura 5.29.	Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 50 en los 6 ciclos de falla.....	103
Figura 5.30.	Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 75 en los 6 ciclos de falla.....	104
Figura 5.31.	Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 25 en los 6 ciclos de falla.....	105
Figura 5.32.	Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 50 en los 6 ciclos de falla.....	105
Figura 5.33.	Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 75 en los 6 ciclos de falla.....	106
Figura 5.34.	Falla en el sistema de potencia bajo estudio.....	107
Figura 5.35.	Zonas de operación del relevador en línea de transmisión bajo estudio.....	107
Figura 5.36.	Código fuente para delimitación de las zonas de operación del relevador.....	108
Figura 5.37.	Diagrama R-X de las zonas de operación del relevador de impedancia en línea de transmisión bajo estudio.....	108
Figura 5.38.	Código fuente para zonas de operación del relevador.....	109
Figura 5.39.	Diagrama de bloques para zonas de operación del relevador.....	110
Figura 5.40.	Tiempo desde la detección de la falla hasta la apertura del interruptor.....	111
Figura 5.41.	Operación y detección para una falla simulada al 10% con la característica de impedancia.....	112
Figura 5.42.	Operación y detección para una falla simulada al 50%.....	113
Figura 5.43.	Operación y detección para una falla simulada al 90%.....	113
Figura 5.44.	Detección para una falla fuera de la zona protegida.....	114
Figura A.1.	Ventana acerca de Matlab.....	118
Figura A.2.	Resultado del código fuente “estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth”.....	120
Figura A.3.	Código fuente “obtención numérica de las zonas”.....	121
Figura A.4.	Código fuente “obtención numérica de las zonas y el estimado al	

	punto fallado”	122
Figura A.5.	Código fuente “obtención grafica de las zonas de operación del relevador”	122
Figura A.6.	Resultado del Código fuente “obtención grafica de las zonas de operación del relevador”	122

Lista de Tablas

	<i>Pagina</i>
Tabla 3.1. Valores para Condensadores de Acoplamiento.....	46
Tabla 3.2. Valores para transformadores de Tensión Capacitivos.....	46
Tabla 3.3. Características Eléctricas de los TC.....	49
Tabla 3.4. Características Eléctricas de los TP.....	51
Tabla B.1. Características del cable.....	123
Tabla B.2. Características del hilo de guarda.....	124

Capítulo

1

Introducción

1.1. ANTECEDENTES

El algoritmo de protección a distancia basado en la ecuación diferencial determina la localización de una falla en función de los valores de resistencia y reactancia de la línea de transmisión que existe en el momento de su ocurrencia. Para determinar la precisión del algoritmo se utiliza el modelo de la línea de transmisión parámetros distribuidos.

Cuatro parámetros afectan el desempeño de los conductores conectados de una fuente a la carga: resistencia, inductancia, capacitancia paralelo, y conductancia en paralelo, estos parámetros afectan a líneas aéreas y cables y los mismos procedimientos de cálculo son usados para obtener los valores de los parámetros en cada caso. Por esta razón, la determinación rápida de una falla con una precisión aceptable facilita la restauración oportuna del suministro eléctrico, dando como resultado mejoras en la seguridad y confiabilidad del sistema de potencia. Es muy importante que el sistema no se quede sin suministro de energía, esto garantiza que la operación y funcionamiento sea de calidad, permitiendo que funcione. En el caso de ocurrir un corto circuito, en algunos casos esto tienen como consecuencia el rechazar grandes cantidades de carga, es decir que algunas cargas como poblaciones y grandes compañías que demandan cantidades significativas de energía eléctrica se queden sin suministro eléctrico, ocasionando pérdidas económicas y energéticas.

El algoritmo ayudara a encontrar la localización de la falla, en las líneas de transmisión cuando ocurra una falla y esta sea clareada, si la falla es de tipo transitoria, los

mismos elementos de protección reestablecen el sistema. Cuando las fallas son de tipo permanente, los elementos reaccionan según el tipo de protección pero ninguna localiza el punto exacto donde ocurrió el disturbio y se tiene que realizar exploración de campo para ver que ocurrió. Esta operación puede tardar mucho tiempo mientras tanto el sistema esta en desequilibrio o sensible a otra mala operación. Este algoritmo proporcionara la localización de este modo analizar los limites de actuación y ofrecer una restauración rápida y eficientemente del sistema eléctrico de potencia. [1]

El estudio de líneas es interesante ya que los parámetros de línea son cambiantes según su estado, este trabajo de investigación surge del estudio de las líneas de transmisión en especial por las protecciones de distancia.

El comportamiento de los parámetros de líneas es que son proporcionales a la distancia pero en el momento en que su nivel de voltaje y potencia aumentan estos son los representados por los circuitos equivalentes de línea PI y parámetros distribuidos, entonces si los parámetros de resistencia y reactancia son conocidos y dependientes de la línea, entonces es posible poder calcular la distancia a la falla resolviendo una ecuación diferencial [2]. Siendo el modelo de parámetros distribuidos el que mas se ajusta a la realidad. [1]

1.2. HIPÓTESIS

Cuando se presenta una falla en una línea de transmisión y si se considera que la falla ocurre a una distancia determinada, es posible expresar la ecuación de línea en forma diferencial. Los valores de resistencia y reactancia están en proporción a longitudes de líneas. Los parámetros R, L y C son dependientes de la línea y, por tanto, es posible estimar la distancia a la falla resolviendo una ecuación diferencial. [3]

Se considerara el uso de filtros digitales con el objeto de probar el algoritmo y determinar su precisión y límites de actuación ante una falla monofásica.

Cuando la falla ocurra dentro de la línea de transmisión protegida, la localización en una forma rápida garantizará una restauración rápida y confiabilidad alta en el sistema eléctrico de potencia.

1.3. OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo es comprobar los límites de actuación y simular por medio de software (ATP y Matlab) el algoritmo de protección de distancia en una línea de transmisión, ante una falla monofásica, con y sin el uso de filtros digitales. El Modelo a utilizar será una línea de transmisión con parámetros distribuidos con un nivel de tensión de 400 KV y una longitud de 300 Km. con un calibre del conductor 1113 ACSR, hilo de guarda es Alumoweld 3/8 de diámetro.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El algoritmo de protección a distancia basado en la ecuación diferencial determina la ubicación de una falla en función de los valores de resistencia y reactancia de línea que existe en el momento de su ocurrencia, este algoritmo ha sido probado por investigadores con modelos de línea en equivalente PI siendo el modelo de parámetros distribuidos en el que mas se ajusta a la realidad. Con el objeto de obtener una precisión en el algoritmo se considera con el modelo de parámetros distribuidos adicionalmente el uso de filtros digitales es evaluado, el algoritmo presenta como ventaja que puede trabajar con cantidades no sinusoidales en la determinación de la distancia a la que ocurre la falla esto mejorando la precisión de la protección. El presente trabajo de investigación se realiza con el objeto de probar el algoritmo de protección de distancia basado en la ecuación diferencial, se simulará una línea de transmisión y se analizará la falla monofásica, con distancia entre de 10%, 50%, y 90% de la longitud total de la línea. Se modelará un sistema de potencia en el programa ATP y el algoritmo en MATLAB.

Capítulo

2

Marco Teórico

2.1. INTRODUCCIÓN

Los conductores conectados de una fuente a la carga presentan cuatro parámetros: resistencia, inductancia, capacitancia paralelo, y conductancia en paralelo estos afectan a las líneas aéreas y los mismos procedimientos de cálculo son usados obtener los valores de los parámetros en cada caso. Por esta razón, es común usar la palabra línea.

2.2. MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

En las líneas de transmisión un conductor corto puede ser modelado como en la figura 2.1, una línea puede ser considerada como muchos conductores cortos colocados en serie, producen el modelo de la figura 2.2 la longitud individual de cada conductor podría ser hecha mas corta, de esta manera aumenta el numero de estos conductores para una dada longitud de línea. Continuando este proceso se define el modelo de línea de parámetros distribuidos este modelo ha sido reducido al circuito equivalente mostrado en la figura 2.2.

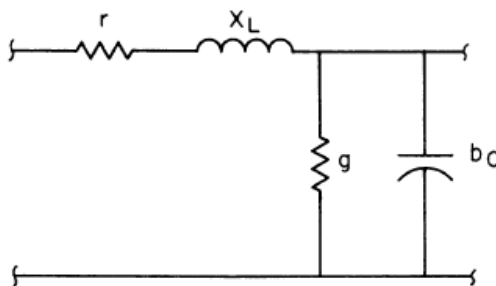


Figura 2.1. Circuito equivalente de conductor corto.

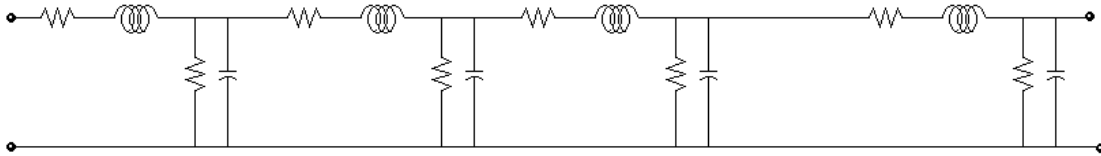


Figura 2.2. Línea con constantes distribuidas.

$$Z' = Z_C \frac{\sinh l}{l} \quad (2.1)$$

Y el ramal paralelo.

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y_C \tanh(l/2)}{2} \quad (2.2)$$

$$= \frac{1(\cosh l - 1)}{Z_C \sinh l} \quad (2.3)$$

Donde:

$Z_C = (z/y)$ Definido como la impedancia característica o súbita de la línea

$\gamma = (zy)$ Definido como la constante de propagación

La constante de propagación puede ser expresada en la forma rectangular:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.4)$$

Donde:

$\alpha =$ La constante de atenuación

$\beta =$ Es la constante de fase

Los modelos de líneas han sido reducidos a los circuitos equivalentes mostrados a continuación

2.2.1. Líneas largas.

Frecuentemente en sistemas de potencia las líneas son de 150 millas deben ser representadas por las constantes distribuidas a un modelo reducido a un equivalente π como se muestra en la figura 2.3.

La conductancia shunt puede ser atenuada por que el dieléctrico es aire un buen dieléctrico y el espacio en el conductor es grande sin embargo si la capacitancia pierde esta importancia ellas deben ser representadas por g .

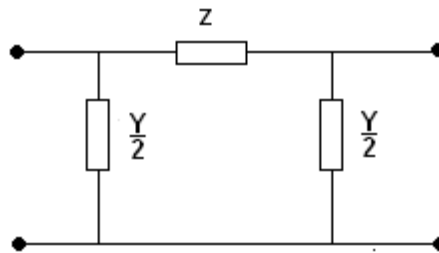


Figura 2.3. Circuito equivalente líneas largas (π).

$$Z = (r + jx_L)l \quad (2.5)$$

$$Y = (g + jb_c)l \quad (2.6)$$

En este modelo el ramal paralelo es puramente capacitivo, el circuito nominal π puede ser diseñado al ser formado por el proceso descrito al inicio excepto que la unidad de longitud del conductor es aumentado, y el circuito es hecho simétrico. Este resulta en las constantes que son calculas por un proceso de aproximación, el circuito nominal T es formado de la misma forma excepto que todas las constantes shunt son aproximadas comparadas con el circuito π .

2.2.2. Líneas Medias.

Están en el rango de aproximadamente 50-150 millas (80-240km). Su circuito equivalente se muestra a continuación.

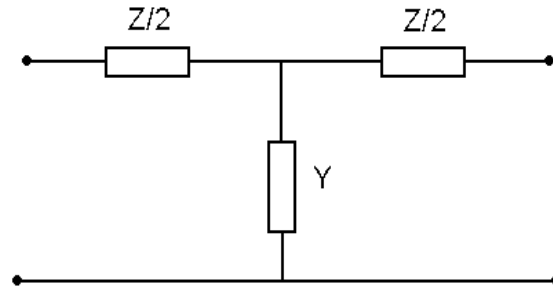


Figura 2.4. Circuito equivalente líneas medias.

$$\hat{Z} = Z \quad (2.7)$$

$$\frac{\hat{Y}}{2} = \frac{Y}{2} \quad (2.8)$$

2.2.3. Líneas Cortas.

Para líneas aéreas más cortas que 50 millas, se omite la capacitancia shunt en los modelos presentados anteriormente, no afectaran grandemente el resultado de flujo de carga, corto circuito o cálculos de estabilidad.

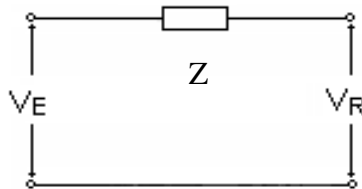


Figura 2.5. Circuito equivalente líneas cortas.

Donde:

r = Es la resistencia efectiva en ohms por unidad de longitud

g = Es la conductancia paralelo neutra en siemens por unidad de longitud

l = Es la longitud total de la línea

b = Es la susceptancia capacitava en siemens $b = 2jfC$

L = Es la inductancia total del conductor en henrys por unidad de longitud

c = Es la inductancia paralelo del conductor en farads en por unidad

$z = r+jx$ Es la impedancia serie en ohms en por unidad

$y = g+jb$ Es la admitancia paralelo en siemens en por unidad

$Z = zl$ Es la impedancia total serie en ohms en por unidad de longitud.

$Y = yl$ Es la admitancia total paralelo en siemens en por unidad de longitud

V_E = Voltaje en el extremo emisor.

V_R = Voltaje en el extremo receptor.

2.3. CONFIGURACIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

La selección de la protección de una línea de transmisión está determinada por su configuración y su conexión al SEP (Sistema Eléctrico de Potencia). Estos aspectos se definen con los criterios de diseño del proyecto y de la operación prevista para la línea. Las configuraciones utilizadas en el SEIN (Sistema eléctrico interconectado nacional) son las siguientes:

2.3.1. Líneas de dos terminales.

La configuración básica de una línea es con dos terminales, ya sea una interconexión o una alimentación radial, según se tenga, un flujo bidireccional o unidireccional respectivamente.

No es recomendable la configuración con más de dos terminales porque los sistemas de protección son muy sofisticados.

Una línea debe ser considerada como un circuito que tiene solamente dos extremos, dos subestaciones bien definidas donde se cuenta con los Interruptores para la maniobra y protección del correspondiente circuito. Se puede considerar las siguientes variantes:

2.3.2. Líneas en anillo.

La configuración básica de una línea es con dos terminales que puede ser alimentada desde ambos extremos, como una interconexión donde se tiene un flujo bidireccional. En consecuencia, una línea que forma parte de un anillo corresponde a la configuración general ya que tiene alimentación por ambos extremos.

2.3.3. Líneas paralelas de dos o más circuitos.

En los sistemas eléctricos se suele utilizar líneas paralelas que están instaladas en una misma trayectoria e incluso utilizan las mismas estructuras y soportes. La protección de estas líneas es afectada por el acoplamiento mutuo entre ambos circuitos. Este acoplamiento no es significativo para las corrientes de secuencia positiva y negativa, sobre todo si las líneas cuentan con transposiciones, lo que significa que están adecuadamente compensadas. Sin embargo, las corrientes homopolares son corrientes iguales en las tres fases y sus efectos de acoplamiento electromagnético se suman en la línea paralela; por tanto, se tendrá un acoplamiento mutuo para las fallas a tierra.

Líneas con transformadores en derivación. La instalación de transformadores en derivación solo es aceptable en niveles menores a 220 kv, siempre que sean de bajo valor de potencia, de manera que la impedancia de los transformadores sea mucho mayor que la impedancia de la línea. El criterio general es que la primera zona de la protección de distancia de la línea no alcance más del 20% de la impedancia del transformador.

Se recomienda el grupo de conexión en delta en el lado primario conectado a la línea ya que cuando se tiene la conexión estrella con el neutro a tierra, el transformador constituye una fuente de corriente homopolar para las fallas en la línea.

Líneas con compensación en derivación. Es frecuente hacer una compensación de las líneas de transmisión, de manera de mejorar su desempeño tanto durante las maniobras de energización como en la operación en estado permanente. Lo más usual se suele utilizar

reactores en derivación. Estos equipos son parte de la subestación donde están instalados y deben contar con una protección dedicada para los mismos.

Un reactor en derivación debe tener una protección unitaria y rápida, independientemente que esté conectado a la línea o a la barra. Si el reactor está conectado dentro de la línea; es decir, la derivación al reactor está antes de la llegada de la línea, de manera que el relé de la línea mide la corriente incluyendo la compensación, entonces la protección de la línea debe considerar que existe esta posibilidad operativa. En este caso, una falla dentro del reactor será también vista por la protección de la línea.

Por otro lado se requiere que la protección del reactor sea bastante rápida. Además, se debe tener en cuenta que puede haber corrientes oscilantes entre la línea y el reactor que no deben afectar el desempeño de la protección de la línea.

Por otro lado, cuando se efectúa un recierre en líneas largas, es posible que después de la apertura de la fase fallada no se extinga el arco porque se sigue teniendo energía a través de las fases sanas. En este caso, se puede usar un reactor adicional conectado en el neutro del reactor en derivación. Este reactor del neutro se dimensiona para provocar que la corriente del arco secundario sea lo suficientemente baja para permitir su extinción.

Líneas con compensación serie. Los capacitores serie suelen estar diseñados para compensar del 25% al 75% de la impedancia serie de la línea y deben estar convenientemente conectados a la línea con la finalidad de no afectar el desempeño del sistema de protección.

2.4. COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

Un sistema de protección debe tener varias características de comportamiento para que pueda asegurar el cumplimiento de sus funciones. Las principales son:

A) Sensibilidad

Es la capacidad de detectar una falla por muy pequeña o incipiente que sea. La mayor sensibilidad viene a ser la capacidad para diferenciar una situación de falla con una situación de no existencia de falla.

B) Selectividad

Es la capacidad de detectar una falla dentro de la zona de protección. La mayor selectividad viene a ser la capacidad de descartar una falla cercana a la zona de protección.

C) Velocidad

Es la capacidad de respuesta con el mínimo tiempo. La necesidad de tener una rápida respuesta está relacionada con la minimización de los daños por causa de la falla.

D) Dependability

Es la capacidad de actuar correctamente cuando sea necesario, aún cuando en condiciones de falla se produzcan tensiones y corrientes transitorias que puedan perjudicar la capacidad de detección de la falla.

E) Seguridad

Es la capacidad de no actuar cuando no es necesario, aún cuando en condiciones de falla se produzcan tensiones y corrientes transitorias, las cuales puedan ocasionar errores en la discriminación de la falla dentro de la zona de protección.

F) Capacidad de Registro

Es la capacidad de almacenar información relativa a la falla con la finalidad de proporcionar datos de las fallas.

2.5. ENLACES DE COMUNICACIONES.

Los enlaces de comunicación de teleprotección tienen por finalidad comunicar a los relés de dos subestaciones que se encuentran en los extremos de una línea de transmisión. Estos enlaces sirven para establecer una lógica en la operación de los relés sobre la base de la información recibida del extremo remoto.

2.5.1. Características Funcionales.

Para cumplir con su propósito, los Enlaces de comunicaciones deben cumplir con los siguientes requisitos funcionales:

- Transmitir las señales en condiciones adversas de señal/ruido debido a la presencia de las líneas de alta tensión energizadas a 60 Hz, las cuales están además expuestas a cortocircuitos a tierra, así como a descargas atmosféricas.
- Transmitir las señales en condiciones adversas incluyendo la posibilidad de ruptura de uno de los conductores de la línea de alta tensión.
- Transmitir las señales de teleprotección en canales de transmisión de datos y de voz, priorizando las funciones de protección en condiciones de falla.

2.5.2. Características requeridas por los Sistemas de Protección.

Los enlaces de comunicaciones serán de los siguientes tipos: onda portadora, fibra óptica, microondas y radio digital. Se requiere por lo menos dos canales de teleprotección con frecuencias de operación diferentes: uno para la protección primaria y otro para la protección secundaria. En total se tendrá un mínimo de cuatro señales de teleprotección.

La utilización de sistemas de transferencia de disparo directo será efectuando la utilización de dos señales en paralelo, una en cada uno de los dos canales de frecuencia diferentes.

Los sistemas de comunicaciones que se utilizan para la teleprotección son básicamente los siguientes:

2.5.2.1. Hilo Piloto

El sistema de hilo piloto consiste de un par de hilos instalados en una línea aérea o cable subterráneo para transmitir señales como las corrientes, tensiones y/o los valores de fase. Este sistema tiene el inconveniente de estar expuesto a la permanente interferencia de

la línea de transmisión y es más crítico durante las fallas, en las cuales se puede presentar altas tensiones inducidas.

Para evitar la interferencia con la línea de transmisión muchas veces se prefiere emplear una ruta diferente de la línea, lo que trae consigo otras complicaciones para su realización.

La transmisión puede ser efectuada en corriente alterna a la frecuencia del sistema; pero, a veces se emplea señales moduladas en una frecuencia de audio (2 Khz.) o en corriente continua.

2.5.2.2. Onda Portadora

El sistema de onda portadora envía señales de alta frecuencia utilizando la misma línea de transmisión como medio para las telecomunicaciones. Para ello, los equipos transmisores/receptores de onda portadora son acoplados a la línea de transmisión a través de un capacitor (que usualmente es el mismo del transformador de tensión capacitivo) y se filtra a la entrada de las señales a la subestación mediante una trampa de onda. Se debe mencionar que las cuchillas de puesta a tierra de la línea están ubicadas fuera del enlace de telecomunicaciones por lo que la puesta a tierra de la línea no le afecta a la transmisión de la alta frecuencia.

Este sistema también tiene el inconveniente de estar expuesto a la interferencia de la línea de transmisión. En la operación permanente el ruido del efecto corona causa interferencia; pero, durante las fallas puede ser más crítica la transmisión, ya que la propia falla puede ser causa de una gran atenuación de la señal. Por esta razón no se utiliza acoplamientos sencillos (fase-tierra) sino que se prefiere acoplamientos redundantes (fase-fase).

2.5.2.3. Fibra Óptica

El sistema de fibra óptica utiliza una fina fibra de vidrio (óxido de silicio y germanio), la cual tiene una baja atenuación a las ondas de luz que pueden viajar en su interior, debido a su alto índice de refracción y está rodeado de un material similar con un índice de refracción menor. De esta manera el cable de fibra óptica actúa como una guía de onda de la luz introducida por un láser, o por un diodo emisor de luz (Led).

El cable de fibra óptica suele ser instalado dentro del cable de guarda de la línea de transmisión, ya que por tratarse de la transmisión de luz es totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas de la línea. Además, los relés normalmente están preparados para un acoplamiento directo a la fibra óptica. Por estas razones, este medio resulta de muy fácil aplicación e integración a la protección de las líneas de transmisión.

Existen enlaces de distinta capacidad y en una aplicación específica de protección, donde se utiliza señales analógicas y lógicas, es usual emplear enlaces de mediana capacidad con una velocidad de transmisión de 64 kbits/segundo. Sin embargo, existen enlaces de hasta 2 Mbits/segundo.

.

2.5.2.4. Radio UHF

El sistema de radio usado para las telecomunicaciones envía señales en una banda que requiere una línea de visión entre ambos puntos extremos por tanto, muchas veces es necesario utilizar estaciones repetidoras. Este sistema, por su naturaleza, es totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas de la línea

El radio transmite sus señales en el rango de 1350 Mhz – 39500 Mhz, aunque también se utiliza la banda de 380 Mhz – 470 Mhz. cada enlace utiliza un ancho de banda que puede ser de 200 Mhz hasta 2500 Mhz, según la aplicación.

2.6. IMPEDANCIA DE FALLA.

Cuando la línea es corta, la resistencia de falla resulta comparable con la impedancia de la línea por lo que la medición de su impedancia se ve afectada por dicha resistencia. Una manera de ponderar la impedancia de la línea es compararla con respecto a la impedancia de la fuente, ya que cuanto menor es la impedancia de la línea menor es la tensión que se obtiene al medir su impedancia, dificultándose su evaluación. Para analizar este aspecto se puede considerar el circuito de un sistema al cual se conecta una simple línea con un relé que mide la tensión y la corriente en la línea.

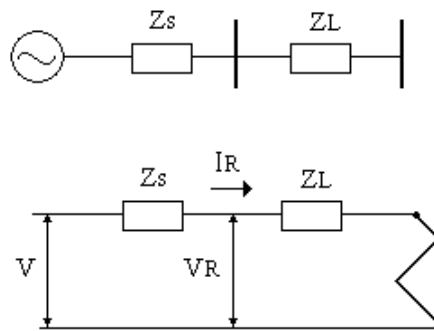


Figura 2.6. Tensión en el Relé de Distancia para una Falla en la Línea.

Si se tiene un cortocircuito al final de la línea, sin considerar la resistencia de falla, la tensión que mide el relé será:

$$V_R = \frac{Z_L V}{Z_S + Z_L} = \frac{V}{\frac{Z_S + 1}{Z_L}} \quad (2.9)$$

Donde:

V = Tensión de la fuente.

V_R = Tensión en el relé.

Z_L = Impedancia de la línea.

Z_S = Impedancia de la fuente.

2.7. DISPAROS Y SEÑALIZACIÓN DE FALLA.

Al producirse una falla fase-tierra el relé detecta la falla y si ha efectuado la correcta selección de fase puede proceder con una apertura monopolar con la finalidad de proceder a un recierre. También se puede efectuar un recierre tripolar. En ambos casos se debe hacer una verificación de sincronismo o una supervisión de tensión, a fin de que no se produzca un segundo recierre sobre falla.

2.8. DISCRETIZACIÓN DE SEÑALES.

Una señal de tiempo discreto $x(k)$ puede representar un fenómeno para el cual la variable independiente es inherentemente discreta. Señales tales como las relaciones especie-abundancia, o los datos demográficos o indicadores económicos ya mencionados, son ejemplos típicos de estas señales. Por otro lado, una señal de tiempo discreto puede representar muestras de un fenómeno para el cual la variable independiente es en realidad continua.

2.8.1. El proceso de muestreo.

El proceso a través del cual una señal continua $x(t)$ es transformada en una señal discreta "equivalente" $x(k)$ consiste simplemente en la toma de muestras de la señal continua en instantes discretos de tiempo k denominados instantes de muestreo $k = \{\dots, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$.

El proceso de muestreo se muestra en la figura 2.7. Para realizar dicho proceso es necesaria una señal adicional que marque el ritmo de la toma de muestras, idealmente dicha señal $p(t)$ es un tren de impulsos con una frecuencia $f_s = 1/T_s$ denominada frecuencia de muestreo (en Hertz). También es usual considerar dicha frecuencia en radianes/seg. .

El muestreo puede ser uniforme (T_s constante) $f_s = 1 / T_s$ o no uniforme (T_s variable). a T_s se le llama también el periodo de muestreo.

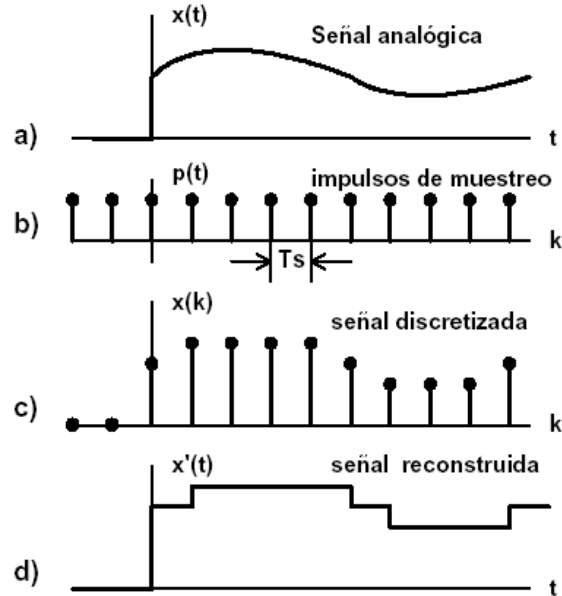


Figura 2.7 El proceso de muestreo.

2.9. PROTECCIÓN DE DISTANCIA. [14]

La protección de distancia utiliza las corrientes y tensiones para calcular permanentemente las impedancias vistas en el extremo de la línea. De esta manera, al producirse una falla dentro de la línea se puede determinar si la impedancia medida por el relé está dentro de la zona protegida (que es la impedancia total o parcial de la línea).

En la operación normal se tiene la línea con su carga conectada al final de la misma; luego, si se produce una falla dentro de la línea, la impedancia vista por el relé será una fracción de la impedancia de la línea. el relé tiene la capacidad de ver fallas más allá de la línea protegida; pero, su actuación dependerá de su ajuste.

La protección de distancia se prefiere a la protección de sobre corriente porque la utilización de esta última depende fundamentalmente de las corrientes de cortocircuito, por lo cual resulta a veces muy difícil de aplicar hay varios tipos de protección de distancia, los principales son los siguientes:

2.9.1. Característica de mínima Impedancia

Mide la relación entre la tensión y la corriente sin considerar ningún ángulo de fase. Su característica es un círculo en el plano R-X y opera cuando las impedancias medidas están dentro de este círculo. Si se desea obtener direccionalidad se necesita una característica complementaria adicional. Ver figura 2.8.

2.9.2. Característica Mho

Su característica es un círculo que pasa por el origen en el plano R-X y su diámetro tiene un ángulo especificado similar al de las líneas de transmisión. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro de este círculo. Ver figura 2.8. A veces se modifica la característica para desplazar ligeramente el círculo, de manera que no pase por el origen. A esta característica modificada se le denomina Mho desplazado (offset).

2.9.3. Característica Lenticular

Su característica es una superposición de dos características circulares para constituir una forma de lente. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro de la zona formada por la lente. Ver figura 2.8.

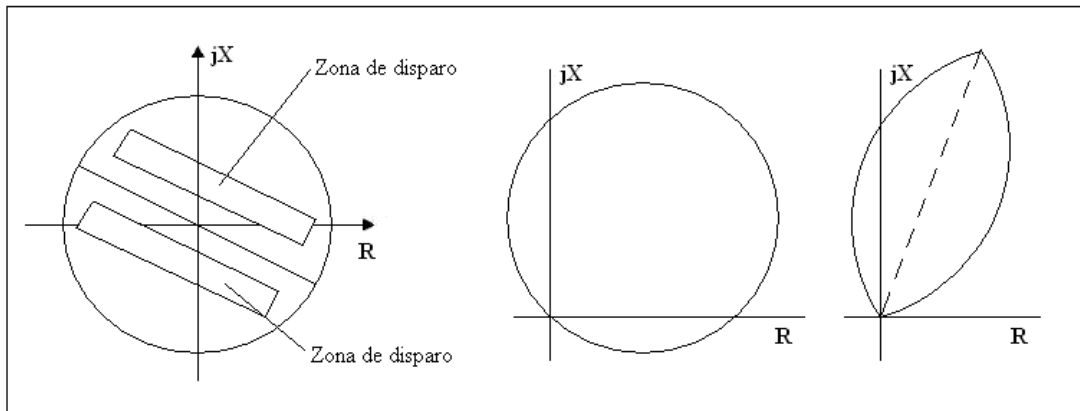


Figura 2.8. Relés con característica Impedancia, Mho y Lenticular.

2.9.4. Característica Cuadrilateral

Esta característica se consigue con una combinación de características de reactancia direccionales con controles de los alcances resistivos. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro del cuadrilátero. ver figura 2.9.

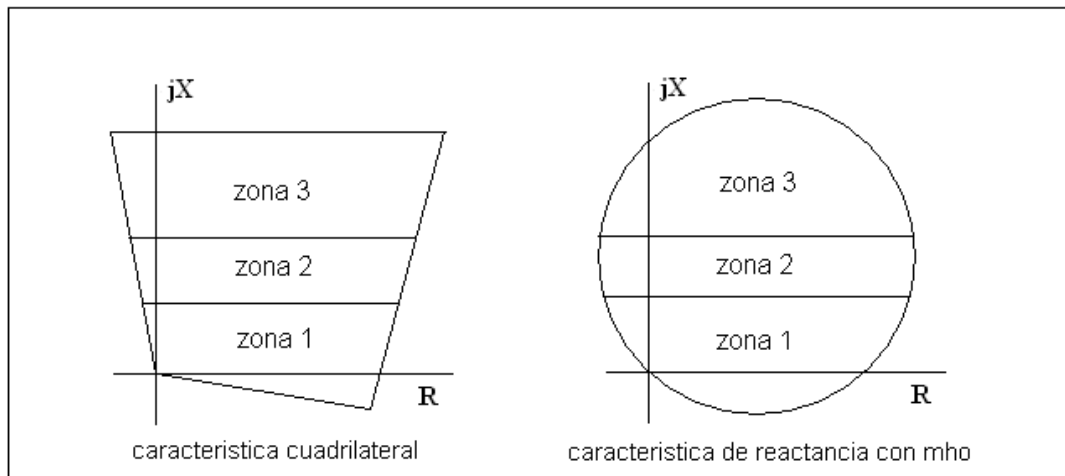


Figura 2.9. Relés de Distancia con Característica de Reactancia.

2.9.5. Característica Reactancia con Mho.

Esta característica se consigue con una combinación de características de reactancia direccionales con un control de característica Mho. Es direccional por naturaleza y opera cuando las impedancias medidas están dentro de este círculo. .

Los relés de distancia operan normalmente siguiendo una secuencia de arranque, medición y selección de fase. Para ello, normalmente cuentan con tres unidades de medida fase-fase independientes en cada zona. Las impedancias fase-tierra pueden ser calculadas según el circuito donde se tiene:

$$V_a = I_a * Z_a - I_E * Z_E \quad (2.10)$$

Donde:

V_a = Tensión de fase a.

I_a = Corriente de fase a.

Z_a = Impedancia de fase a.

I_E = Corriente de retorno por tierra.

Z_E = Impedancia de retorno por tierra.

Luego, la impedancia vista por el relé será:

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a + \left(\frac{Z_E}{Z_a}\right) \cdot I_E} \quad (2.11)$$

Se debe notar que el valor de la impedancia Z_a que se mide en el momento de una falla depende de la longitud de la línea hasta el punto de falla, mientras que la relación de (Z_E/Z_a) no depende de la longitud de la línea sino solo de los parámetros de la línea.

Se debe tomar también que el flujo de potencia por la línea, en condiciones de pre-falla, tiene una influencia en la medida de la impedancia vista por el relé cuando se tiene una falla con alto valor de la resistencia de puesta a tierra. Para ello, se puede considerar el circuito de la figura 2.9.

Durante el cortocircuito se tiene la superposición de la corriente del flujo de potencia de pre-falla con la corriente de falla que fluye por la resistencia de falla y la impedancia vista por el relé que tiene dos componentes:

- La impedancia correspondiente a la longitud de la línea hasta el punto de falla
- La resistencia de falla afectada de un factor que es igual a la relación entre la Corriente de falla y la corriente del relé.

En consecuencia, este segundo componente será puramente resistivo solamente si las corrientes de falla y del rele tienen el mismo ángulo de fase, lo que significa que se puede tener un sobre alcance o un subalcance en la medición total del relé.

2.10. TIPOS DE FILTROS

Existen distintos tipos de clasificación de filtros para la obtención de funciones que tienen sobre su frecuencia natural frecuencias en múltiplos de su frecuencia, estos tipos de filtros son los siguientes:

- Atendiendo a la ganancia:
 - Filtros pasivos: los que atenuarán la señal en mayor o menor grado. Se implementan con componentes pasivos como condensadores, bobinas y resistencias.
 - Filtros activos: son los que pueden presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la de entrada. En su implementación suelen aparecer amplificadores operacionales.
- Atendiendo a su respuesta en frecuencia:
 - Filtro paso bajo: Es aquel que permite el paso de frecuencias bajas, desde frecuencia 0 o continua hasta una determinada. Presentan ceros a alta frecuencia y polos a bajas frecuencia.
 - Filtro paso alto: Es el que permite el paso de frecuencias desde una frecuencia de corte determinada hacia arriba, sin que exista un límite

superior especificado. Presentan ceros a bajas frecuencias y polos a altas frecuencias.

- Filtro paso banda: Son aquellos que permiten el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.
 - Filtro elimina banda: Es el que dificulta el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.
 - Filtro multibanda: Es que presenta varios rangos de frecuencias en los cuales hay un comportamiento diferente
 - Filtro variable: Es aquel que puede cambiar sus márgenes de frecuencia
- Atendiendo al método de diseño: [12]
- Filtro de Butterworth
 - Filtro de Chevyshev I y Filtro de Chevyshev II
 - Filtro de Cauer (elíptico)
 - Filtro de Bessel
- Atendiendo a su aplicación:
- Filtro de red. Este tipo de circuito impide la entrada de ruido externo, además impide que el sistema contamine la red, de tal forma que se pueden utilizar fuentes analógicas y digitales o fuentes PWM que afecten negativamente el resto del equipo. También es posible corregir el factor de potencia ya que el circuito reduce significativamente los picos de corriente generados por el condensador al cargarse. El circuito consiste básicamente en un filtro paso bajo en donde la primera bobina elimina ruido en general (frecuencias altas), junto con los condensadores. El transformador elimina el ruido sobrante, que los condensadores no eliminan. Al transformador se le denomina choque de modo común. Son los utilizados para garantizar la

calidad de la señal de alimentación, éstos tienen como objetivo eliminar ruidos tanto en modo común como en modo diferencial.

➤ Otros tipos:

- Filtros piezoeléctricos. Este filtro aprovecha las propiedades resonantes de determinados materiales como el cuarzo. Este cristal de cuarzo se utiliza como componente de control de la frecuencia de circuitos osciladores convirtiendo las vibraciones mecánicas en voltajes eléctricos a una frecuencia específica. Esto ocurre debido al efecto piezoeléctrico. En un material piezoeléctrico, al aplicar una presión mecánica sobre un eje, dará como consecuencia la creación de una carga eléctrica. En algunos materiales, se encuentra que aplicando un campo eléctrico según un eje, produce una deformación mecánica según otro eje ubicado a un ángulo recto respecto al primero. Por las propiedades mecánicas, eléctricas, y químicas, el cuarzo es el material más apropiado para fabricar dispositivos con frecuencia bien controlada. También existen filtros como el de ferrita que existe en muchos cables. Es normal encontrárselos en las pantallas del computador. Aquí se tiene la propiedad de presentar distintas impedancias a alta y baja frecuencia.

2.10.1. Filtro de Butterworth

El filtro de Butterworth es uno de los filtros electrónicos más básicos, diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte. En otras palabras, la salida se mantiene constante casi hasta la frecuencia de corte, luego disminuye a razón de $20n$ dB por década, donde n es el número de polos del filtro.

El filtro de Butterworth más básico es el típico filtro pasa bajo de primer orden, el cual puede ser modificado a un filtro pasa alto o añadir en serie otros formando un filtro pasa banda o elimina banda y filtros de mayores órdenes.

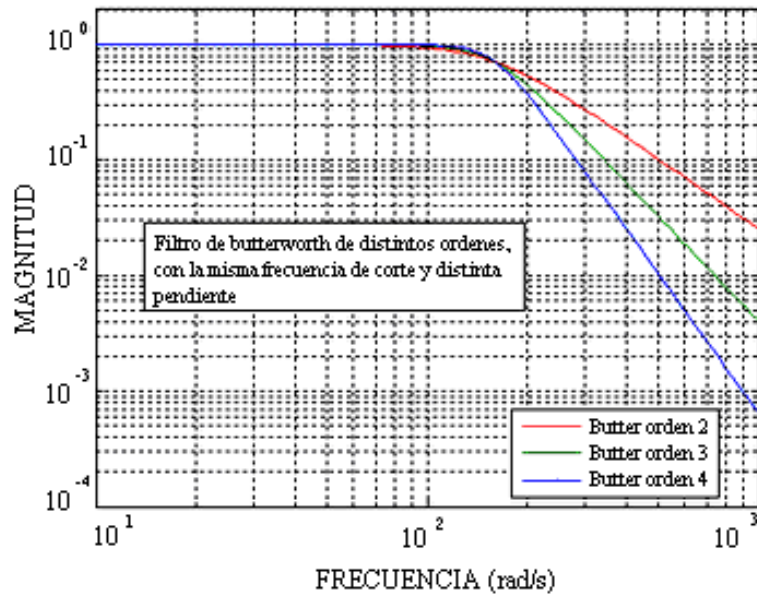


Figura 2.10. *Filtros de Butterworth de varios órdenes.*

Según lo mencionado antes, la respuesta en frecuencia del filtro es máximamente plana (con las mínimas ondulaciones) en la banda pasante. Visto en un diagrama de Bode con escala logarítmica, la respuesta decae linealmente desde la frecuencia de corte hacia menos infinito. Para un filtro de primer orden son -6dB por octava o -20db por década.

El filtro de Butterworth es el único filtro que mantiene su forma para órdenes mayores (sólo con una caída de más pendiente a partir de la frecuencia de corte).

Este tipo de filtros necesita un mayor orden para los mismos requerimientos en comparación con otros.

Modelado Del Sistema de Potencia

3.1. INTRODUCCIÓN.

Para el análisis del algoritmo de la ecuación diferencial es importante conocer los elementos que participan en la transmisión, medición y generación de energía.

El estimado al punto fallado es obtenido con un análisis numérico en Matlab, y los parámetros que intervienen en el desarrollo del corto circuito son obtenidos de los elementos del sistema de potencia del modelo en Atp Draw.

3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

La línea de transmisión es el elemento más común de los que conforman las redes eléctricas. En conjunto, estos elementos constituyen las arterias a través de las cuales fluye la energía eléctrica desde centros de generación hasta centros de consumo.

Toda rama de una red de potencia (sea transmisión o distribución) está constituida por una línea aérea o un cable subterráneo. En este capítulo, veremos algunos aspectos descriptivos relativos a esas ramas y para poder introducir los parámetros correspondientes a las redes.

Dependiendo del nivel de voltaje al cual se realiza la transmisión de energía eléctrica, se tienen clasificadas a las redes en tres categorías:

- Transmisión
- Subtransmisión
- Distribución

3.2.1. Líneas aéreas

Los principales componentes de una línea de transmisión son:

- Conductores.
- Aisladores.
- Estructuras de soporte.

Conductores: Estos son siempre desnudos. Pueden ser hilos de cobre reunidos formando cuerda o hilos de aluminio con refuerzo de acero. Estos últimos se prefieren por ser más livianos y económicos. Si la línea es muy larga, debe tener empalmes, los cuales deben ser de poca resistencia eléctrica y gran resistencia mecánica. Al igual que las placas de un condensador, los conductores de una línea mantienen la carga al desconectar la fuente de tensión; para prevenir accidentes graves, antes de trabajar sobre una línea en vacío, ésta debe ponerse a tierra, por lo cual se colocan interruptores adecuados de puesta a tierra.

Existen tipos de conductores que se utilizan de manera distinta dependiendo de la topografía, grado de contaminación, valor actual de los metales que conforman la aleación del conductor. Los tipos de conductores comerciales que se utilizan son los siguientes:

- Conductor ACSR.- Conductor de Aluminio con Refuerzo de Acero.
- Conductor AAAC.- Conductor de Aluminio con Aleación.
- Conductor ACAR.- Conductor de Aluminio con Refuerzo de Aleación.
- Conductor ACSR/AW.- Conductor de Aluminio con Refuerzo de Acero con Aluminio Soldado.

Para tener en cuenta el material se deben considerar los siguientes tipos de conductores:

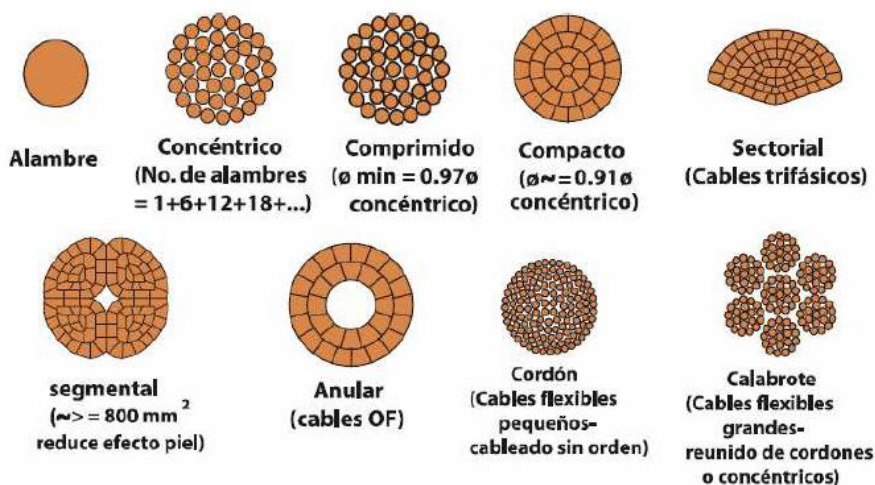


Figura 3.1. Tipos de conductores.

Para estos tipos de materiales se deben consultar las características físicas y constructivas en catálogos de fabricantes de conductores para una información más amplia de conductores, de manera que se identifiquen los diferentes tipos de conductores que se utilizan en líneas aéreas de transmisión, ya que otros tipos de conductores pueden aparecer en el mercado. En el informe debe ir un resumen de esta consulta de características de los materiales de conductores.

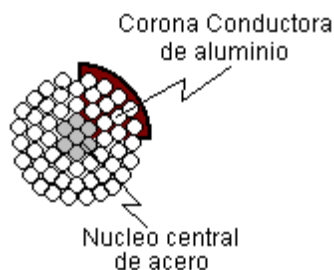


Figura 3.2. Características de construcción de Conductor ACSR.

Aisladores: Sirven de apoyo y soporte a los conductores, al mismo tiempo que los mantienen aislados de tierra. El material más utilizado para los aisladores es la porcelana,

aunque también se emplea el vidrio templado y materiales sintéticos (uno de los más empleados es el “composite”, que es el más adecuado para el vandalismo y para zonas de mucha contaminación, presentando además, la ventaja de ser mucho más liviano y adecuado para líneas provisionales).



Figura 3.3. Aisladores de suspensión de Porcelana.



Figura 3.4. Aisladores de suspensión Vidrio templado.

Bajo el punto de vista eléctrico, los aislantes deben:

- Presentar mucha resistencia ante las corrientes de fuga superficiales.
- Tener suficiente espesor para evitar la perforación ante el fuerte gradiente de tensión que deben soportar.

Para aumentar la resistencia al contacto, se moldean en forma acampanada.

Estructuras de soporte: Estas deben mantener los conductores a suficiente altura sobre tierra y adecuadamente distanciados entre sí.

Para tensiones menores a 70 kV, pueden emplearse postes de madera con una cruceta (madera tratada con creosota o con sales metálicas, para evitar su putrefacción). Para mayores tensiones, se emplean siempre estructuras metálicas formadas por perfiles de acero galvanizado.

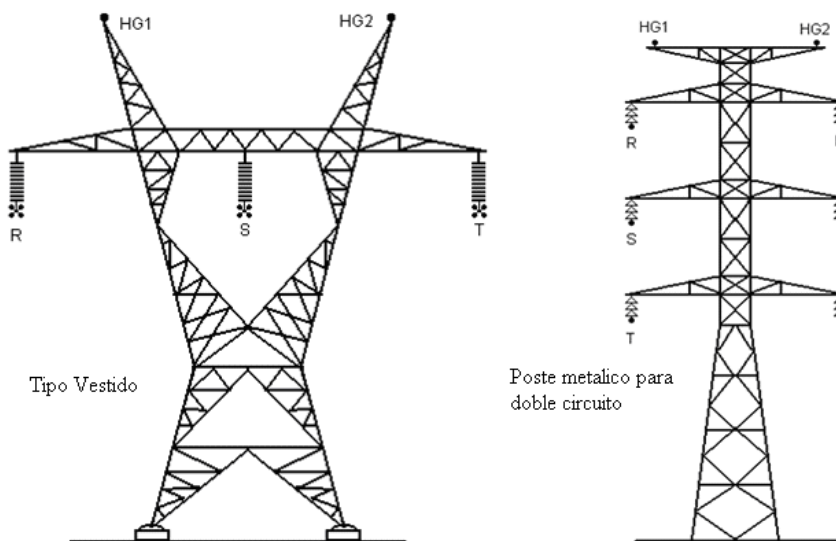


Figura 3.5. Estructuras mas usadas en líneas de transmisión.

La separación entre conductores debe ser suficiente como para evitar la formación de un arco cuando se producen ráfagas de viento. Esa separación es tanto mayor cuanto mayor es la distancia entre torres consecutivas y cuanto mayor es la tensión de servicio.

En todos los casos, las fundaciones representan un papel importante en la seguridad y en el costo de una línea de transmisión, y deben permitir la fácil colocación de las tomas de tierra.

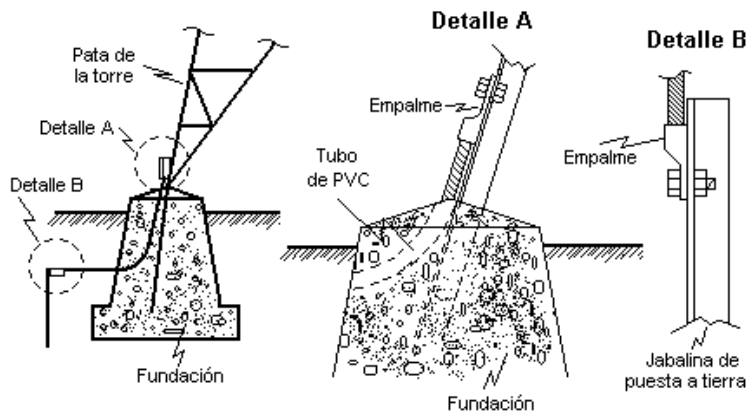


Figura 3.6. Fundaciones de tierra.

3.3. IMPEDANCIA DE LINEAS DE TRANSMISION.

Los dos parámetros serie de la línea de transmisión aérea se analizan en conjunto, aunque previamente se mencionarán algunos conceptos concernientes a la resistencia.

3.3.1 Resistencia de la Línea

La resistencia en conductores de una línea es causa de las pérdidas por transmisión, las cuales están dadas por la expresión I^2R , donde I es la corriente que fluye a través de conductor y R es la resistencia del mismo. Estas pérdidas tienen que ser mínimas, lo cual depende de un diseño adecuado de la línea, tomando en consideración factores como el calibre de conductores, número de los mismos por fase, tipo de material e influencia del medio ambiente, entre otros.

3.3.1.1. Resistencia de Corriente Directa

La resistencia de c.d. se caracteriza por tener una densidad de corriente distribuida uniformemente en toda la sección transversal del conductor, la cual puede calcularse mediante la expresión siguiente:

$$R_0 = \frac{\rho l}{A} \quad \Omega \quad (3.1.)$$

Donde:

ρ = *resistividad del material conductor (Ω -m)*

l = *longitud del conductor (m)*

A = *área efectiva de la sección transversal del conductor (m^2)*

Si se utiliza el sistema inglés, en lugar del métrico decimal, entonces la longitud y área del conductor estarán dadas en ft y ft², respectivamente. Sin embargo, puede usarse cualquier sistema congruente de unidades, de modo que resulte que la unidad de longitud esté dada en kilómetros o millas, que es lo más usual.

3.3.1.2 Efecto de la Temperatura Sobre la Resistencia.

Un cambio en la temperatura causará una variación en la resistencia, en forma prácticamente lineal, dentro del margen normal de utilización de la línea de transmisión. Esta variación está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (3.2.)$$

Donde R_1 y R_2 son las resistencias a las temperaturas t_1 y t_2 , respectivamente. La constante T depende del material conductor y se define como la temperatura a la cual la resistencia del conductor es igual a cero. Puede concluirse que un incremento de temperatura causa un aumento de la resistencia y viceversa

3.3.1.3. Efecto Piel

A partir de la Figura 3.7. Donde se muestra un conductor seccionalizado transversalmente, en el cual se ha dibujado dos filamentos hipotéticos iguales además del centro, se hará el análisis.

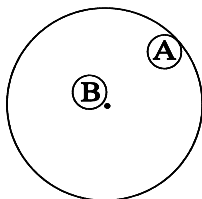


Figura 3.7. Sección transversal de un conductor mostrando dos de sus filamentos.

Las dimensiones del conductor son uniformes, es decir, si se secciona el conductor en diferentes tramos, todas las secciones transversales resultarán ser iguales.

La corriente será la misma para toda la longitud del conductor, esto es, la corriente que entra por un extremo del conductor, será la misma que saldrá por el otro extremo.

Apoyándose en las dos suposiciones anteriores, puede suponerse que cualquier sección transversal del conductor será una superficie equipotencial.

Al medir una caída de tensión en cada uno de los filamentos, ésta será la misma para ambos. En corriente directa, la condición anterior se satisface con la densidad de corriente uniforme que resultará en caídas de tensión por resistencia uniformes. Si se trata de corriente alterna, además de la caída de tensión por resistencia, existirá un voltaje inducido en cada filamento, resultante del campo magnético variante producido por la corriente en el propio conductor. Las líneas de flujo de este campo magnético circularán de acuerdo al eje del conductor y algunas encerrarán al filamento B sin hacerlo con el A, debido a la posición geométrica de ambos. Las reactancias alejadas del centro (como la del filamento A), serán menores que las de los filamentos alrededor del centro del conductor (como el filamento B). Por lo tanto, para producir caídas de tensión iguales, las densidades de corriente deben ser mayores cerca de la periferia del conductor, para compensar la reactancia menor.

El resultado final es que la energía electromagnética no se transmite en el interior del conductor sino que viaja en las regiones que rodean el conductor debido a que la distribución de densidades de corriente a través de la sección transversal del conductor no es uniforme, siendo este fenómeno conocido como efecto piel, el cual causará que la resistencia de c.d. se incremente ligeramente. Esta es la llamada resistencia de c.a. Por otro lado, la inductancia debida al flujo interno en el conductor se verá disminuida.

Si se expresa tales conclusiones mediante fórmulas, se tendrá lo siguiente:

$$R_{ca} = R_{cd} \alpha_R \quad (3.3.)$$

Y para la inductancia interna:

$$(L_i)_{ca} = (L_i)_{cd} \alpha_L \quad (3.4.)$$

Donde α_R y α_L son ligeramente mayor y menor que la unidad, respectivamente.

3.3.1.4 Efecto Corona

Aunque este fenómeno no afecta a la resistencia en una forma directa, sí influye en la eficiencia de operación de la línea de transmisión, debido a que su existencia producirá pérdidas adicionales.

Este efecto está relacionado con la producción de campos eléctricos debidos a altas densidades de carga cuya intensidad es capaz de ionizar el aire circundante a los conductores de fase de la línea de transmisión. Una ionización extrema resultará en la presencia de arcos eléctricos entre conductores. Este efecto puede detectarse audiblemente por el zumbido que produce y visualmente por el aura luminosa que se presenta en cada conductor de fase.

El efecto corona producirá pérdidas e interferencias radiofónicas. Tales pérdidas serán relativamente pequeñas en ambientes secos y tienden a incrementarse en ambientes más húmedos, llegando inclusive a magnitudes 15 veces mayores.

Comúnmente, estas pérdidas se expresan en KW/Km., pero resulta difícil de obtener un modelo analítico que permita calcularlas de manera exacta, debido a la gran cantidad de variables involucradas. Los resultados son obtenidos usando relaciones empíricas y métodos estadísticos. Sin embargo, el efecto corona debe tomarse en cuenta para diseñar adecuadamente las líneas de transmisión.

3.4. ADMITANCIA EN PARALELO DE LINEAS DE TRANSMISION

La admitancia en paralelo de líneas de transmisión está formada básicamente por dos parámetros: conductancia y capacitancia. Sin embargo, el primero de ellos se desprecia por las razones que se describen a continuación.

3.4.1 Conductancia de Líneas de Transmisión

Concretamente, para este parámetro todavía no existe un modelo matemático preciso y con la simplicidad apropiada para poderlo manejar. Este parámetro resulta de la observación de las “corrientes de fuga” describiendo una trayectoria de las fases a tierra. Principalmente, estas corrientes fluyen a través del aislador hacia la torre, siendo función de la eficiencia del aislador, la cual varía significativamente con el calor, humedad atmosférica, contaminación y salinidad del ambiente, entre otros factores. Por esta razón, obtener un modelo matemático representativo de este fenómeno, resulta una tarea compleja. Por otro lado, es común despreciar este el efecto de estas corrientes de fuga, debido a que representan un porcentaje muy pequeño con respecto a las corrientes nominales de la línea.

3.4.2 Capacitancia Monofásica

A partir de la ecuación de teoría de campo eléctrico:

$$\xi = \frac{q}{2\pi \epsilon_0} \quad V / m \quad (3.5.)$$

Donde $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m, q es la carga en Coulombs, D es la distancia de separación en metros. De acuerdo a la Figura 3.8. La diferencia de potencial entre las cargas q_a y q_b está dada por:

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad V \quad (3.6.)$$

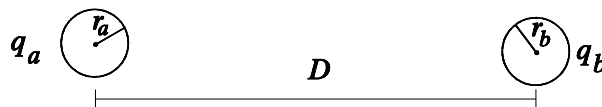


Figura 3.8. Línea monofásica para el análisis de capacitancias.

3.5. TRANSPOSICIÓN DE CONDUCTORES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

Una transposición es una rotación física de los conductores que puede ejecutarse a intervalos regulares o irregulares de la distancia total de la línea. En líneas de transmisión únicamente se observa el efecto de la transposición sobre la impedancia serie. La existencia de acoplamientos mutuos las corrientes de cualquier conductor producirán variaciones de tensión en los conductores adyacentes. Además, estas variaciones de tensión pueden ser diferentes entre sí, aun para corrientes balanceadas, debido a que las impedancias mutuas dependen del arreglo físico de los conductores de la línea.

El método de la transposición permite obtener parámetros de la línea con cualquier número de transposiciones y a cualquier distancia que se desee para cada transposición, tal como muestra la figura 3.9., donde se presenta la transposición completa de la línea consistente en dos rotaciones.

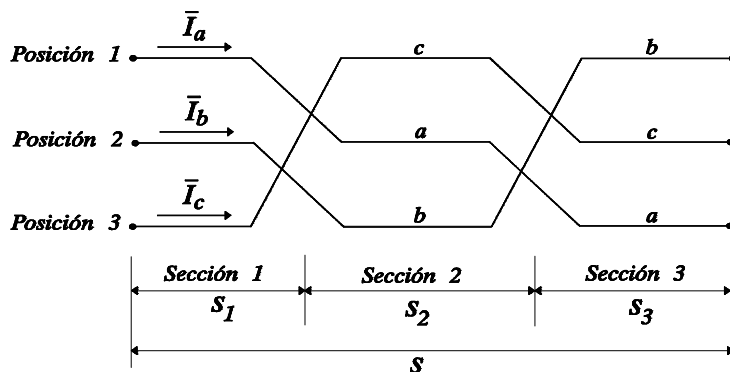


Figura 3.9. Esquema de la transposición completa de una línea de transmisión.

3.6. SOFTWARE ATP

ATP Draw es un gráfico de la ATP-EMTP en la plataforma MS Windows. En el programa el usuario puede construir un circuito eléctrico, seleccionando previamente los componentes de una amplia base de elementos. Sobre la base de la gráfica del dibujo del circuito, la Atp Draw genera archivo en el formato adecuado basado en "lo que ves es lo que obtienes". Todos los tipos de circuito de la edición estándar de las instalaciones (copiar / pegar, agrupar, girar, la exportación / importación) son compatibles. Circuito de nombres

de nodo es administrado por Atp Draw y el usuario sólo tiene que dar el nombre de "clave" nodos. Más de 90 componentes estándar disponibles, y además el usuario puede crear nuevos objetos en base a modelos o Base de Datos Modularización. Atp Draw tiene un diseño estándar de Windows, soporta múltiples documentos y ofrece una gran ayuda del sistema de archivos de Windows, lo que explica las normas más elementales. Otras instalaciones en Atp Draw son: un editor incorporado de Atp-archivo de la edición, el apoyo del Portapapeles de Windows para el mapa de bits, la producción archivos de mapas de bits o archivos PostScript sin limitarse al circuito de tamaño de la ventana, un nuevo módulo para el uso de Línea / Cable constante. [4]

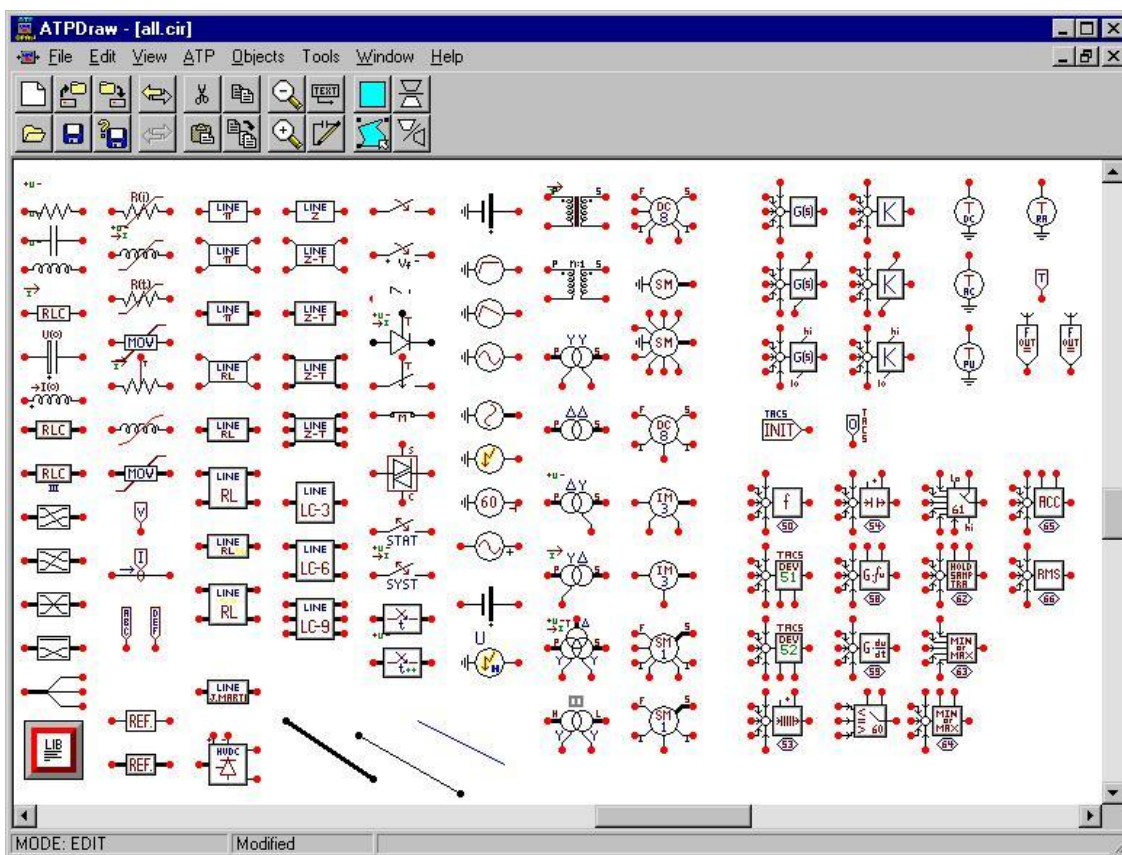


Figura 3.10. ATPDraw ventana que muestra la mayoría de los componentes predefinidos.

ATP_LCC de Línea / Cable Constantes apoyo que se ha escrito en Borland Delphi 1.0. Este programa es un programa de 16 bits en Windows ATP_LCC en el programa el usuario puede especificar la sección transversal de datos y datos de material para una línea aérea o un sistema de cable en ventanas de entrada. La sección transversal especificada se

dibuja en las ventanas principales y zoom y de exportación para el portapapeles de Windows es compatible. Sobre la base de los datos especificados por el usuario correspondiente Atp se genera el archivo listo para ser procesado por la Atp para la creación de datos de salida (tablas y código fuente) o de la matriz de salida (archivo LIS). ATP_LCC El programa consta de dos partes, una para la línea de apoyo y las constantes de un cable Constantes. Estas dos partes se manejan independientemente en el programa con ventanas de entrada separada. El programa ATP_LCC ahora soporta: [5]

1. Línea constante: constante de parámetro (KCLee Clarke y líneas)
 - PI-equivalentes
 - Única frecuencia. Salida
 - Mutuo de acoplamiento de salida
 - Logarítmica de frecuencias de salida

2. Cable Constante: líneas generales
 - Básico unificado para los cables
 - Adjuntando tubería
 - (PI, JMarti, líneas equivalentes y / cables son compatibles).

3.7. LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN BAJO ESTUDIO.

La línea de transmisión a estudiar tiene un nivel de tensión de 400 KV, tiene una longitud de 300 Km. Es una estructura de un circuito de un conductor por fase, completamente transpuesta, el calibre del conductor es 1113 ACSR, el hilo de guarda es Alumoweld 3/8 diámetro, la figura 3.11 muestra la estructura así como la disposición de los conductores.

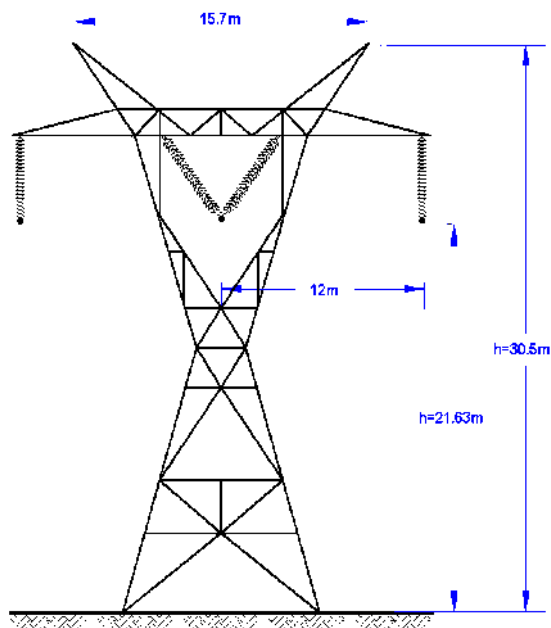


Figura 3.11. Estructura de la línea de transmisión.

3.8. MODELADO DE LA LINEA DE TRANSMISION EN EL PROGRAMA ATP Draw.

Para el modelado de la línea se considera un diagrama unifilar, este diagrama en las ventanas de los elementos correspondientes se introducen los valores de líneas, TCs, TPs, generadores, etc. Para la simulación en el programa se dividió la línea de transmisión en diez partes de 30 Km.

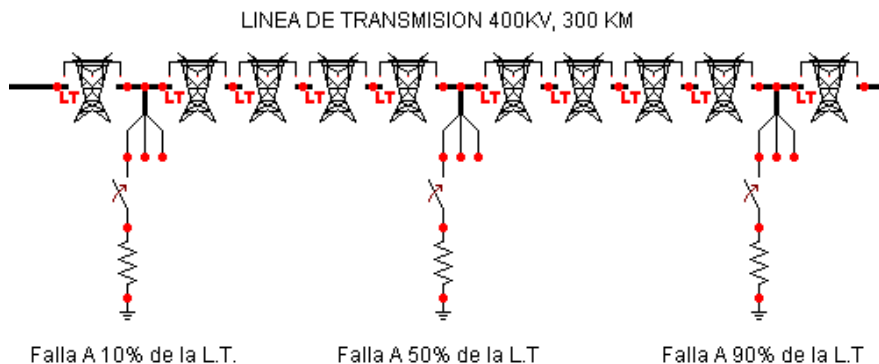


Figura 3.12. Representación de la línea de transmisión.

3.8.1. Datos introducidos al programa.

A continuación se muestra la información y como introducirla al programa ATP para la línea de transmisión. El tipo de sistema seleccionado fue el de línea aérea, el numero de fases es 3 las unidades utilizadas están en el sistema métrico decimal, se considera el efecto skin (o piel), se considera una línea completamente transpuesta selecciona la opción *transposed*, ya que el programa así lo considera al momento de compilarlo, se considera es el modelo jmartí ya que es el equivalente al modelo de parámetros distribuidos, estamos simulando una línea de una longitud de 30 kilómetros, los datos estándar introducidos son la resistividad del conductor que son 100 ohms por metro, la frecuencia del sistema que son 60 Hertz, se considera cada sección en 9 décadas. Y 10 puntos por década.

Figura 3.13. Información del modelo de línea en el programa ATP.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.8	1.6421	0.05214	-12	21.63	9.83	0	0	1
2	2	0.8	1.6421	0.05214	0	21.63	9.83	0	0	1
3	3	0.8	1.6421	0.05214	12	21.63	9.83	0	0	1
4	0	0	0.47625	1.9001	-7.85	30.5	23.2	0	0	0
5	0	0	0.47625	1.9001	7.85	30.5	23.2	0	0	0

Figura 3.14. Información del modelo de los alimentadores en el programa ATP.

Donde:

Ph. no: En esta sección se enumeran las fases de los conductores que están en la línea de transmisión

Rin [cm]: Es el radio interior del conductor, este valor para cada una de las fases es de 0.8 cm. (ver apéndice b)

Rout [cm]: Es el radio exterior del conductor, este valor se obtiene del dato del fabricante, para las fases y para el hilo guarda. (Ver apéndice b)

Resis [ohms/m]: Resistencia del conductor a la corriente directa también se obtiene de los datos que ofrece el fabricante para cables. (Ver apéndice b)

Horiz [m]: Es la distancia horizontal con referencia cero en el centro de la torre de conductores con respecto de una línea vertical este valor se obtiene de la figura (3.11).

Vtower [m]: Es la distancia vertical máxima de la torre en el arreglo del conductor en metros este dato también es obtenidos de la figura (3.11).

Vmid [m]: Distancia vertical del arreglo de conductores en la flecha máxima en metros.

Separ [cm]: Distancia entre los conductores. Como solo es un conductor por fase el valor es 0 (cero).

Alpha: Se refiere a la posición angular de uno de los conductores cuando existen mas conductores por fase respecto a una línea horizontal, como solo existe un conductor por fase este valor es cero.

NB: Numero de conductores por fase, para la línea de transmisión que se va a simular solo es un conductor.

Una vez que la información es introducida se procede a guardar el modelo de línea con el botón Save As y para que el archivo pueda utilizarse para la simulación se tiene que compilar, esta acción se realiza con el botón Run ATP. Y Para poder ver la distribución geométrica de los conductores lo podemos apreciar con el botón View.

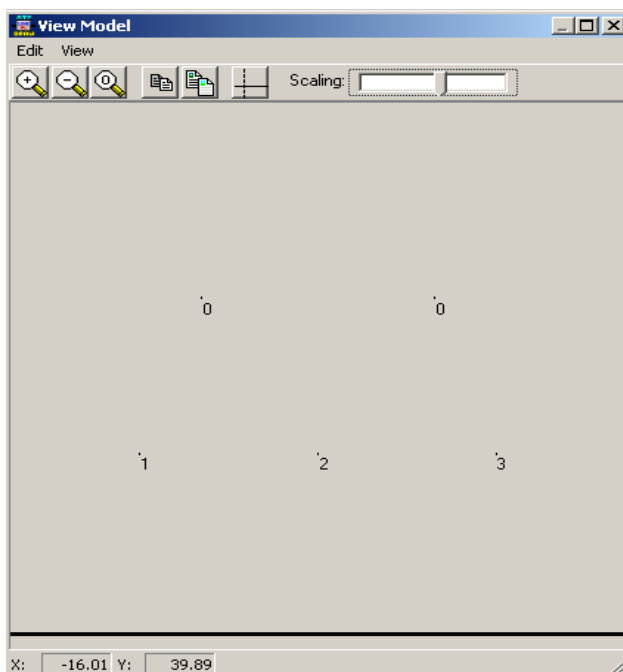


Figura 3.15. Configuración de las fases e hilo de guarda en Atp Draw.

3.9. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO.

Se denomina transformadores de instrumento o de medición, a los que se emplean para alimentar circuitos que tienen instrumentos de medición y/o de protección, el uso de estos transformadores se hace necesario en las redes de alta tensión en donde se requiere reducir los valores de voltaje y de corriente a cantidades admisibles para los instrumentos, ya sea por razones de seguridad o por comodidad.

Los propósitos específicos para los que sirven los transformadores de instrumento son, entre otros, los siguientes:

- a) Aísla a los instrumentos de medición y de protección del circuito primario o de alta tensión, permitiendo así medir altos voltajes y altas corrientes con instrumentos de bajo alcance.
- b) Da mayor seguridad al personal, al no tener contacto con partes de alta tensión.
- c) Permite la normalización de las características de operación de los instrumentos.

3.9.1. Transformadores de Corriente.

Existen básicamente dos tipos de transformadores de instrumento los transformadores de potencial TP que reducen el voltaje y los transformadores de corriente TC que reducen la corriente.

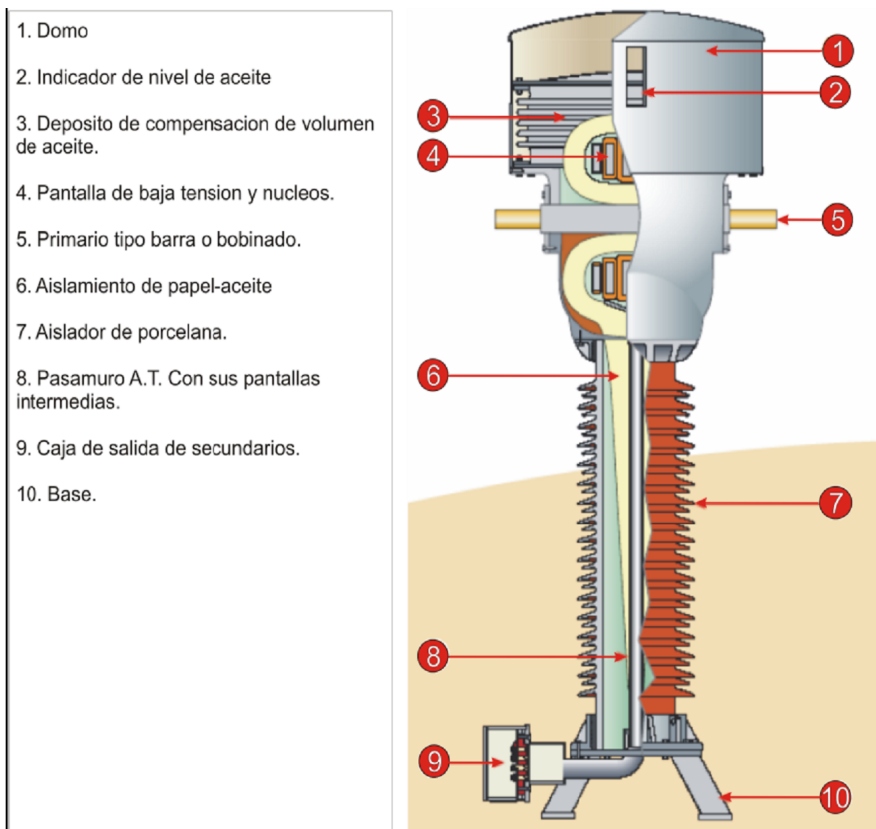


Figura 3.16. Partes de las que esta conformado un transformador de corriente.

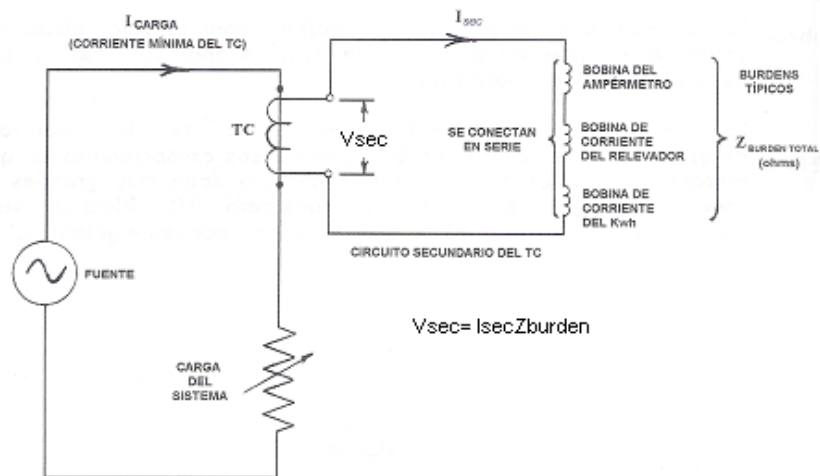


Figura 3.17. Diagrama unifilar simplificado para un transformador de corriente.

3.9.2. Transformadores de potencial.

La función de un Transformador de Potencial, es la de brindar mediante un primario una conexión segura con los circuitos de Alta Tensión, para reducir el voltaje y aislar su lado secundario y conectarse de forma segura con los circuitos de medida en el lado de baja tensión. Generalmente los TP's tienen una potencia nominal muy baja y su único objetivo es suministrar una muestra de voltaje del sistema de potencia.

Además, puesto que el objetivo principal es el muestreo de voltaje deberá ser particularmente preciso como para no distorsionar los valores verdaderos. Se pueden conseguir transformadores de potencial de varios niveles de precisión, dependiendo de que tan precisas deban ser sus lecturas, para cada aplicación especial.

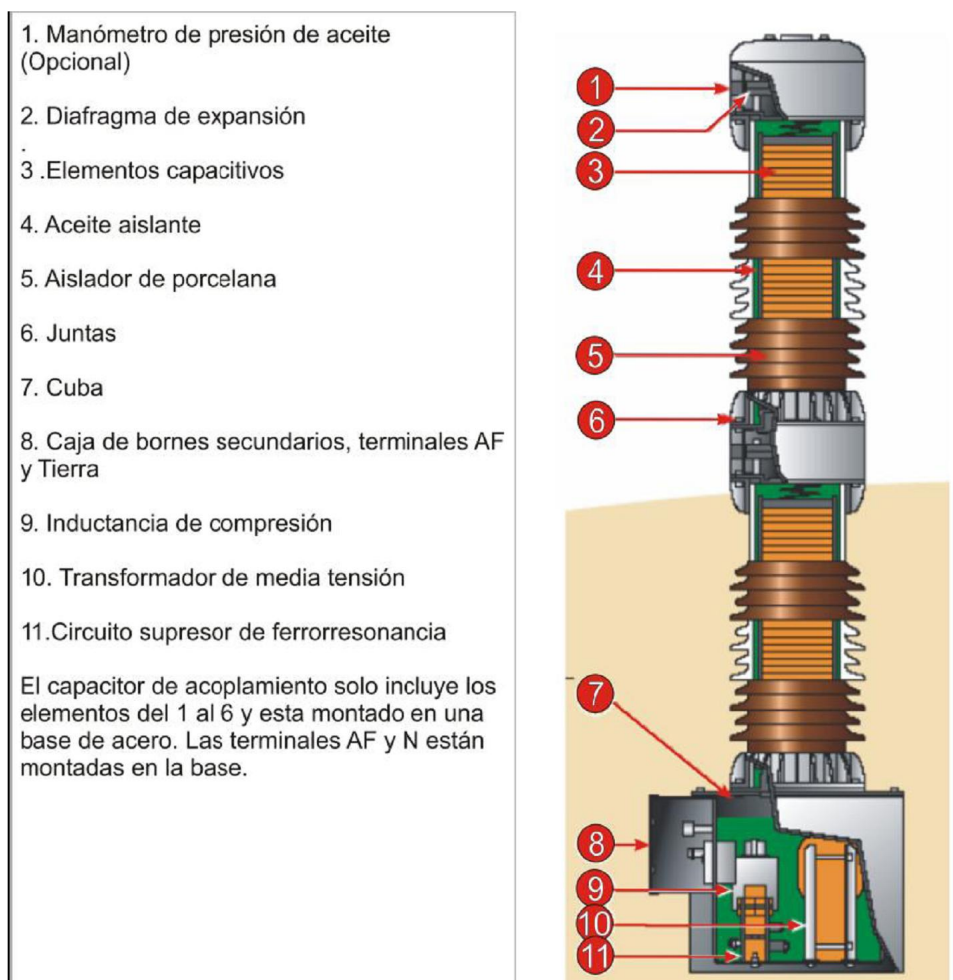


Figura 3.18. Partes de las que esta conformado un transformador de corriente.

3.9.3. Transformadores de potencial con acoplamiento capacitivo.

Los Transformadores de Tensión Capacitivos separan del circuito de alta tensión los instrumentos de medida, contadores, relés, protecciones, etc. y reducen las tensiones a valores manejables y proporcionales a las primarias originales, con la posibilidad de transmitir señales de alta frecuencia a través de las líneas de alta tensión.

Los Condensadores de Acoplamiento sirven como acoplamiento de señales de comunicación de alta frecuencia y corresponden a la parte capacitiva de un transformador de tensión capacitivo. Las Bobinas de Bloqueo sirven para dirigir las señales de comunicación de alta frecuencia por las líneas deseadas bloqueando las demás líneas para evitar pérdidas de señal.

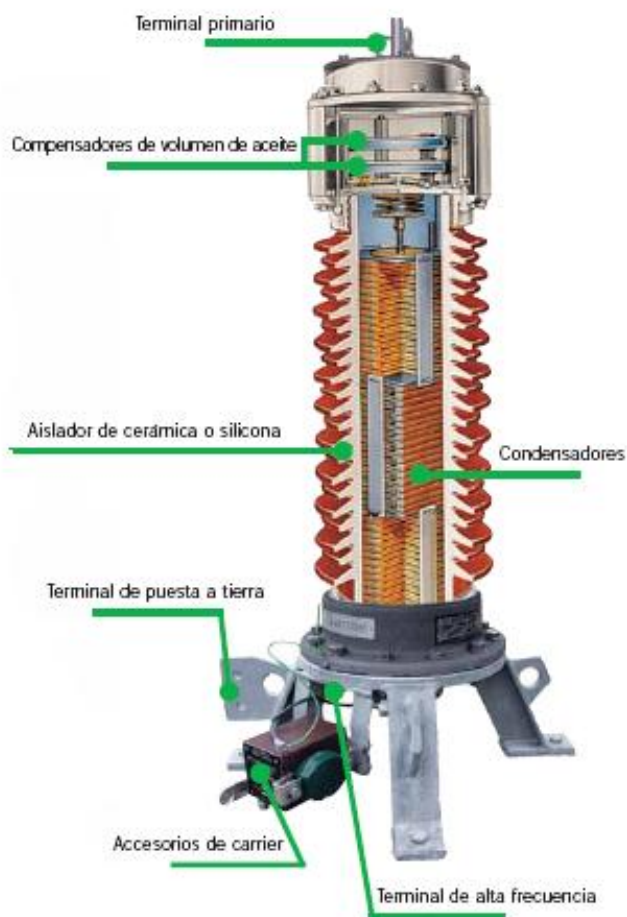


Figura 3.19. Transformadores con capacitor de acoplamiento.

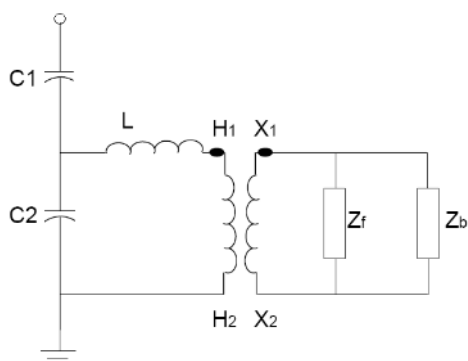


Figura 3.20. Diagrama unifilar simplificado para un transformador de potencial.

Tensión máxima de servicio <i>Highest system voltage</i> (kV)	Tensiones de ensayo Test voltages			Capacidad estándar <i>Standard capacitance</i> (pF)	Alta capacidad <i>High capacitance</i> (pF)	Linea de fuga estándar <i>Standard creepage distance</i> (mm)	Dimensiones <i>Dimensions</i>		Peso <i>Weight</i> (Kg)
	Frecuencia Industrial <i>Power frequency</i> (kV)	Impulso <i>Lightning Impulse (BIL)</i> (kVp)	Maniobra <i>Switching Impulse (S/WL)</i> (kVp)				A (mm)	H (mm)	
72,5	140	325	-	14600	40000	1825	350	1235	115
100	185	450	-	9000	26500	2500	350	1325	120
123	230	550	-	8800	24000	3075	350	1585	145
145	275	650	-	6000	17700	3625	350	1675	150
170	325	750	-	5000	15200	4250	350	1805	170
245	460	1050	-	3600	12400	6125	350	2625	255
300	460	1050	850	4000	10000	7500	350	2945	305
362	510	1175	950	3400	8600	9050	450	3415	345
420	630	1425	1050	2600	7000	10500	450	4335	495
525	680	1550	1175	-	6800	13125	450	5300	890
765	880	1950	1425	-	5200	15300	450	6760	1095

Tabla 3.1. Valores para Condensadores de Acoplamiento.

Tensión máxima de servicio <i>Highest system voltage</i> (kV)	Tensiones de ensayo Test voltages			Capacidad estándar <i>Standard capacitance</i> (pF)	Alta capacidad <i>High capacitance</i> (pF)	Linea de fuga estándar <i>Standard creepage distance</i> (mm)	Dimensiones <i>Dimensions</i>		Peso <i>Weight</i> (Kg)
	Frecuencia Industrial <i>Power frequency</i> (kV)	Impulso <i>Lightning Impulse (BIL)</i> (kVp)	Maniobra <i>Switching Impulse (S/WL)</i> (kVp)				A (mm)	H (mm)	
72,5	140	325	-	14600	40000	1825	450	1510	245
100	185	450	-	9000	26500	2500	450	1600	255
123	230	550	-	8800	24000	3075	450	1830	300
145	275	650	-	6000	17700	3625	450	1920	310
170	325	750	-	5000	15200	4250	450	2065	330
245	460	1050	-	3600	12400	6125	450	2885	450
300	460	1050	850	4000	10000	7500	450	3205	480
362	510	1175	950	3400	8600	9050	450	3675	520
420	630	1425	1050	2600	7000	10500	450	4595	670
525	680	1550	1175	-	6800	13125	450	5560	1065
765	880	1950	1425	-	5200	15300	450	7010	1270

Tabla 3.2. Valores para transformadores de Tensión Capacitivos.

3.10. MODELADO DE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO EN EL PROGRAMA ATP DRAW.

Los transformadores de instrumento ofrecen valores de corriente y voltaje, los modelos de TC's Y TP's son generados a continuación en Atp Draw con los valores reales. Los datos fueron obtenidos de la tesis desarrollada por el Ing. Amado Monsiváis Peña. [6]

3.10.1. Modelado de los transformadores de corriente en el programa Atp Draw.

Para representación de los TC's en el programa Atp Draw, las siguientes figuras muestran la información introducidos dentro de la ventana del modelo de los TC's en el programa, la información fue obtenida de los Transformadores de corriente de 420 kV Marca AREVA Clase de precisión C400 se utilizaron estos últimos ya que se contaba con un modelo desarrollado en ATP Draw.

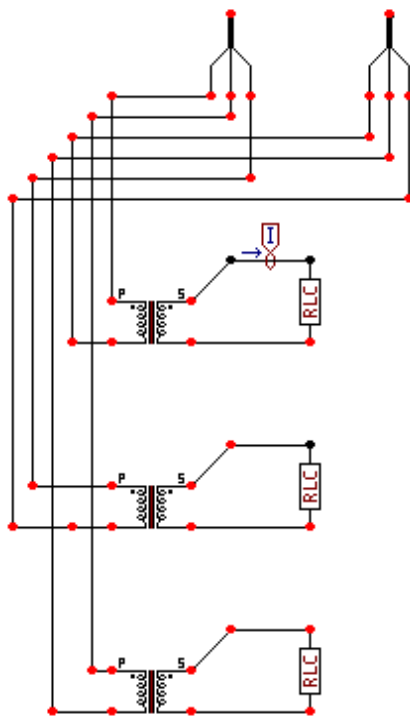


Figura 3.21. Modelado de los TC en el programa Atp Draw.

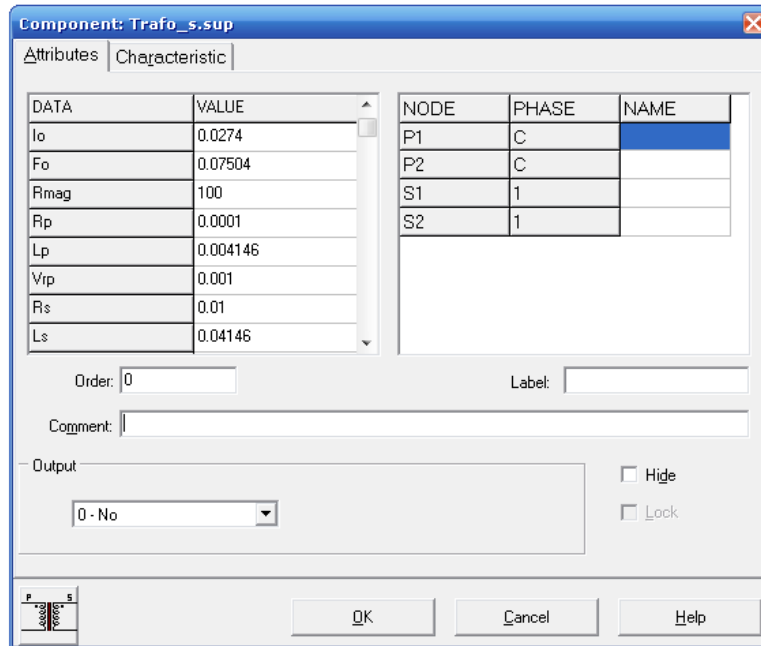


Figura 3.22. Ventana de Datos del Transformador de Corriente en el software ATP Draw.

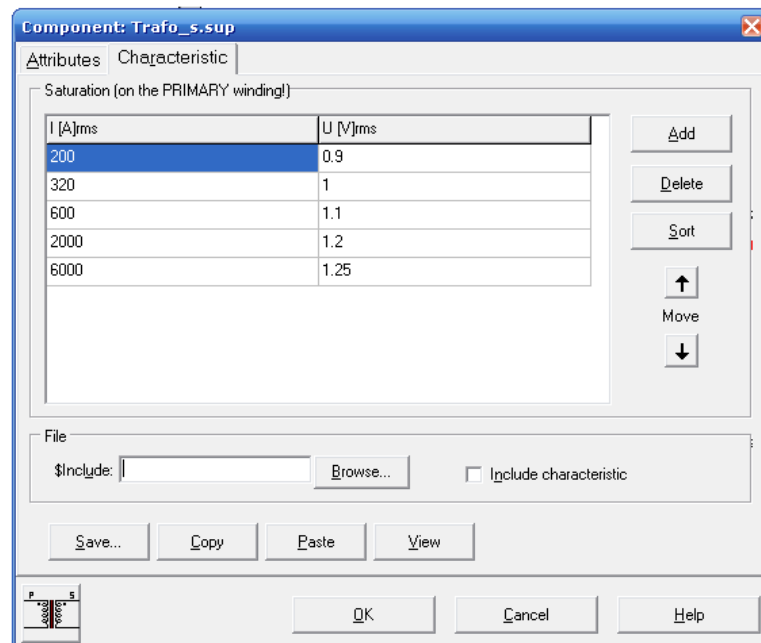


Figura 3.23. Ventana de Datos de la Característica de Saturación del TC.

Donde:

I_o: Corriente de magnetización en estado estable.

F_o: Flujo en estado estable.

R_{mag}: Resistencia de magnetización en ohms.

R_p: Resistencia en el devanado primario en ohms.

L_p: Inductancia en el devanado primario en ohms o en mili henrios.

V_{rp}: Relación de Voltaje en el devanado primario en kilo volts.

R_s: Resistencia en el devanado secundario en ohms.

L_s: Inductancia en el devanado secundario en ohms o en mili henrios.

V_{rs}: Relación de voltaje en el devanado secundario en kilo volts.

RMS: Bandera que nos indica la característica No Lineal.

0 = Característica Corriente / Flujo.

1 = Característica $I [A]_{rms} / U [V]_{rms}$.

CARACRERISTICAS ELECTRICAS				
TIPO	Tensión Máxima de Servicio (kV eff).	Tensión de prueba 1 min 50/60 Hz (kV eff.)	Nivel básico de aislamiento al impulso (1,2/50 BIL) (kV cresta)	Impulso por maniobra (250/2500 μs) (kV cresta)
CTH 72	72.5	140	325	-
CTH	100	185	450	-
100/123	123	230	550	-
CTH	145	230	550	-
145	145	275	650	-
CTH	170	275	650	-
170	170	325	750	-
CTH	245	395	950	-
245	245	460	1050	-
CTH	300	395	950	750
300	300	460	1050	850
CTH	362	460	1050	850
362	362	510 (575)	1175 (1300)	950
CTH	420	570	1300	1050
420	420	630 (680)	1425 (1550)	1050
CTH	525 (550)	630	1425	1050
550	525 (550)	680 (860)	1550 (1800)	1175
CTH	765	880	1950	1425
765	765	975	2100	1550

Tabla 3.3. Características Eléctricas de los TC.

En la siguiente figura se observa los datos de la carga en el transformador de corriente.

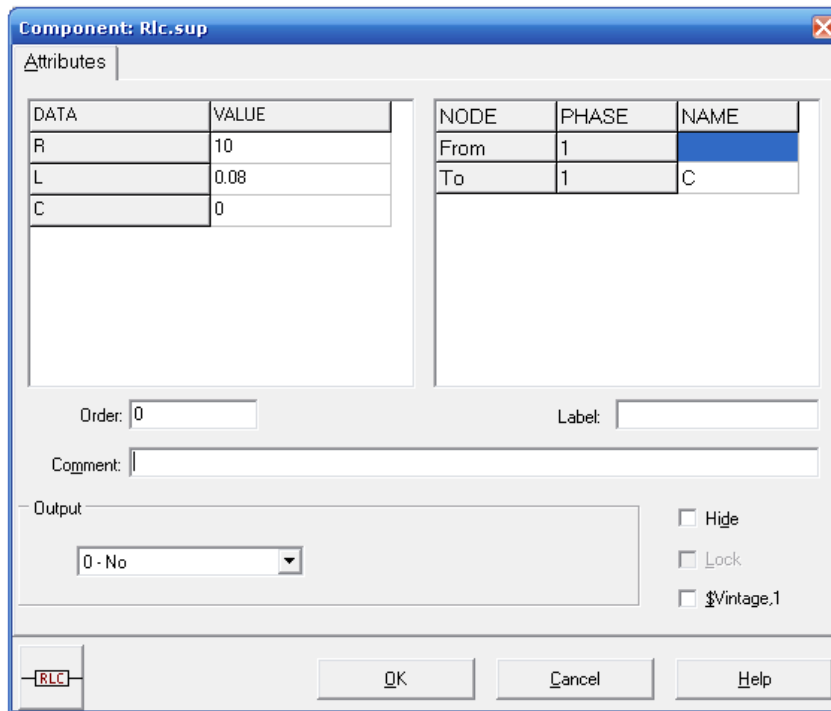


Figura 3.24. Ventana de Datos de la Carga del TC

3.10.2. Modelado De Transformador De Potencial En El Programa Atp Draw.

A continuación se introducen los valores de los transformadores de potencial, para la simulación del corto circuito en Matlab y poder realizar las mediciones correspondientes.

Para representación de los TP's en el programa Atp Draw, las siguientes figuras muestran la información introducidos dentro de la ventana del modelo de los TP's en el programa todos los datos fueron obtenidos a partir de datos de placa de los Transformadores de tensión Capacitivos de 72.5 a 765 KV Marca AREVA.

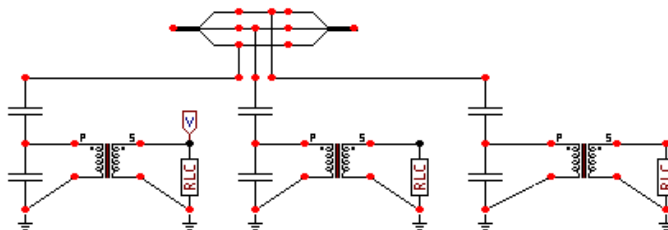


Figura 3.25. Modelado de los Tp's en el programa Atp Draw.

CARACTERISTICAS ELECTRICAS												
>> Tensión máxima del sistema (kV)	IEC	72.5	100	123	145	170	245	300	362	420	525	765
>> Frecuencia nominal	IEC	140	185	230	275	325	460	460	510	630	680	880
>>Tensión de prueba al impulso de rayo (1,2/50µs) (kV)	IEC	325	450	550	650	750	1050	1050	1175	1425	1550	2100
>>Tensión de prueba al impulso de maniobra(kV)	IEC	-	-	-	-	-	-	850	950	1050	1175	1550
>>Tensión primaria nominal	IEC	60 / √3	90 / √3	110 / √3	132 / √3	150 / √3	220 / √3	275 / √3	330 / √3	400 / √3	500 / √3	735 / √3

CAPACITANCIA Pf Cn												
>>Modelo de aislador 12		14000	11000	8800	7200 4400	6200	4400	3600	3200	2400	200	-
>>Modelo de aislador 15		20000	15000	12000	10500 8800	8800	6000	5300	4400	3500 4400	3000	-
>>Modelo de aislador 20		-	-	20000	17000	15000	10000 8800	8500	7200	6800	5000	40000

Tabla 3.4. Características Eléctricas de los TP.

A continuación se muestra la ventana con la información introducida al programa para los transformadores de potencial.

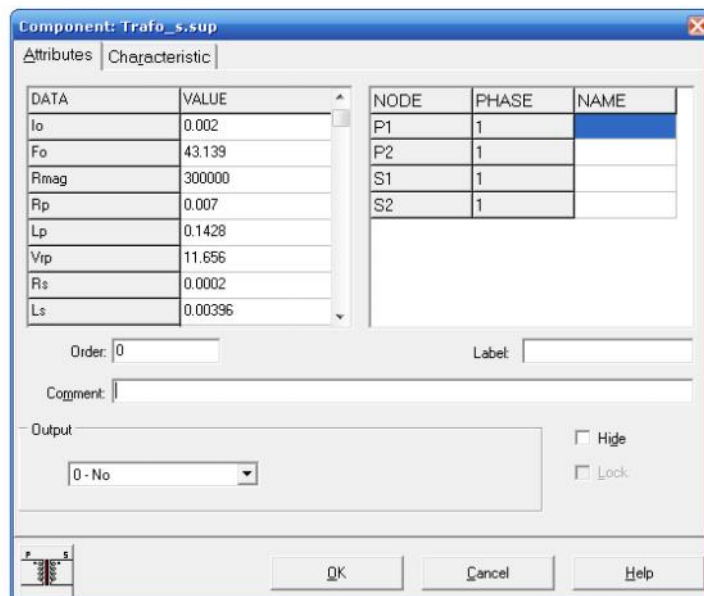


Figura 3.26. Ventana de Datos del Transformador de Corriente en el software Atp Draw.

Donde.

I_o: Corriente de magnetización en estado estable.

F_o: Flujo en estado estable.

R_{mag}: Resistencia de magnetización en ohms.

R_p: Resistencia en el devanado primario en ohms.

L_p: Inductancia en el devanado primario en ohms o en mili henrios.

V_{rp}: Relación de Voltaje en el devanado primario en kilo volts.

R_s: Resistencia en el devanado secundario en ohms.

L_s: Inductancia en el devanado secundario en ohms o en mili henrios.

V_{rs}: Relación de voltaje en el devanado secundario en kilo volts.

En la figura 3.27 y 3.28 se muestran los datos introducidos al programa, valores reales obtenidos de los datos de placa de los equipos instalados.

DATA	VALUE
C	8.8
Ks	0

NODE	PHASE	NAME
From	C	
To	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide
 Lock
 \$Vintage,1

Figura 3.27. Ventana de Datos del Capacitor 1 del Transformador de Potencial en el software ATP Draw.

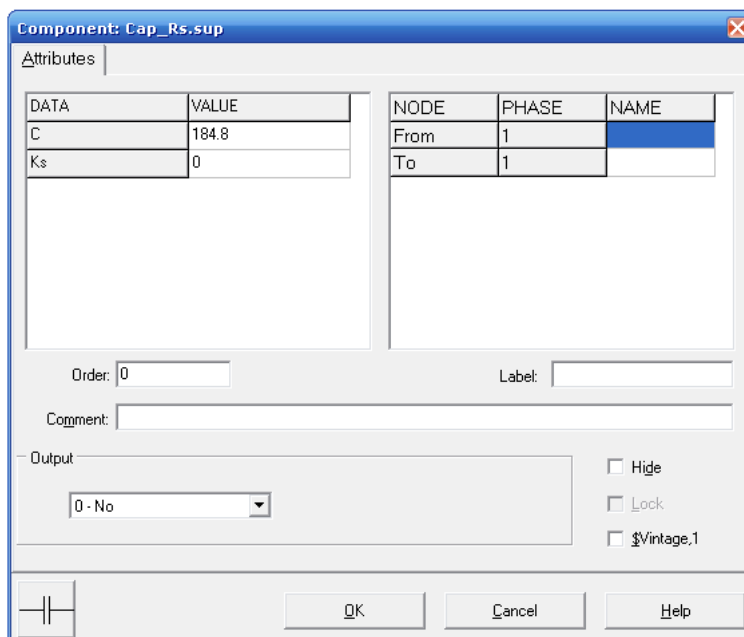


Figura 3.28. Ventana de Datos del capacitor 2 del Transformador de Potencial en el software ATP Draw

En la siguiente figura se observa los datos de la carga en el lado secundario del transformador de potencial introducida al programa, dicho, este valor fue proporcionado por el departamento de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad.

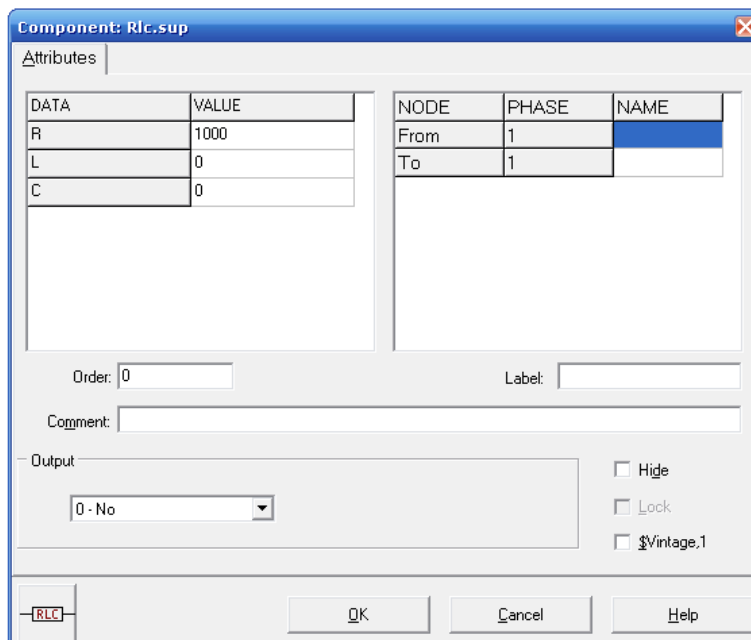


Figura 3.29. Ventana de Datos de la Carga en el secundario del Transformador de Potencial en el software ATPDraw

3.11. MODELADO DE LA CARGA EN EL PROGRAMA ATP DRAW.

A continuación se muestra la carga del sistema de potencia mostrada en el lado más cercano al generador 2, así como los valores introducidos en el programa para la simulación del corto circuito y de esta manera realizar el análisis del sistema de potencia con y sin carga.

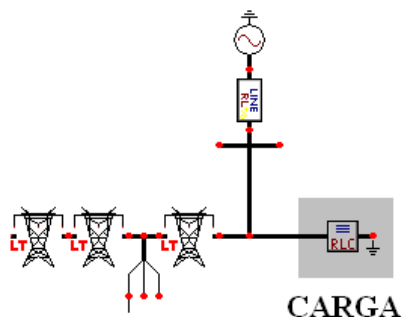


Figura 3.30. Modelo de la carga en el software Atp Draw

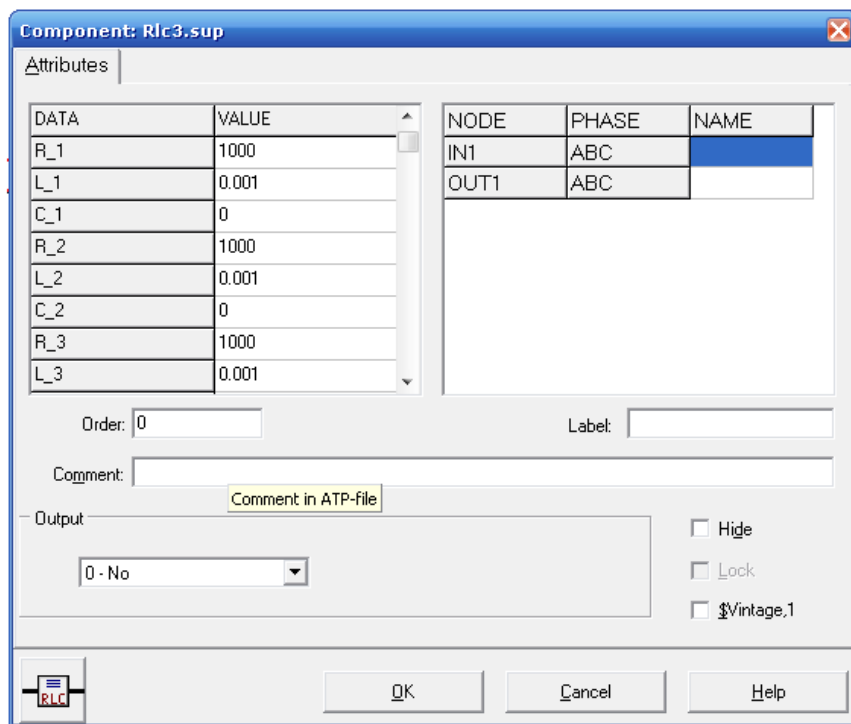


Figura 3.31. Ventana de datos para la carga en el software Atp Draw.

Donde:

R_1 = Resistencia en la fase 1

L_1 = Inductancia en la fase 1

C_1 = Capacitancia en la fase 1

R_2 = Resistencia en la fase 2

L_2 = Inductancia en la fase 2

C_2 = Capacitancia en la fase 2

R_3 = Resistencia en la fase 3

L_3 = Inductancia en la fase 3

C_3 = Capacitancia en la fase 3

Resistencia en [Ohm]

Inductancia en [Ohm] si $X_{opt.}$ = frecuencia Si no en [mH]. Capacitancia en [uMho]

si $C_{opt.}$ = frecuencia Si no en [uF].

3.12. MODELADO DE LOS EQUIVALENTES DE SISTEMA DE POTENCIA EL PROGRAMA ATP DRAW.

A continuación se muestra la ubicación del equivalente de cortocircuito 1 y se introducen los valores en la ventana del elemento en Atp Draw.

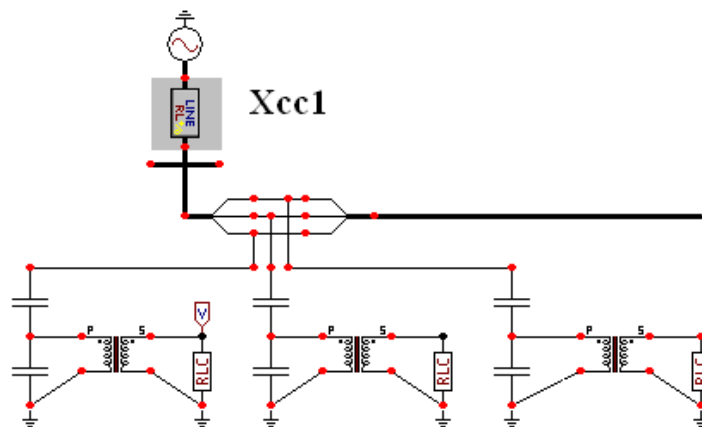


Figura 3.32. Modelo de equivalente de corto circuito 1 en el software ATP Draw

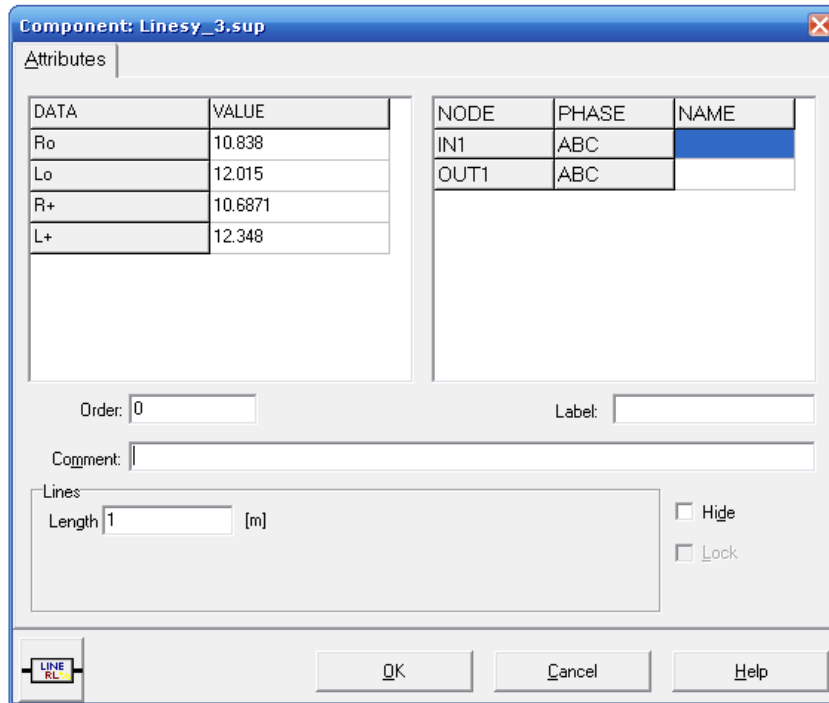


Figura 3.33. Ventana de datos para el equivalente de cortocircuito 1 en el software Atp Draw.

En la siguiente figura se muestra la ubicación del equivalente de cortocircuito y se introducen los valores en la ventana del elemento en Atp Draw.

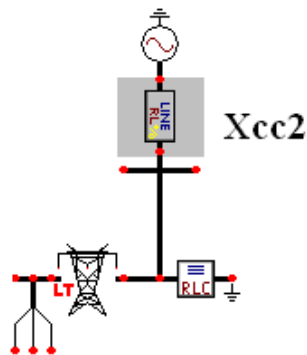


Figura 3.34. Modelo de equivalente de corto circuito 2 en el software ATP Draw

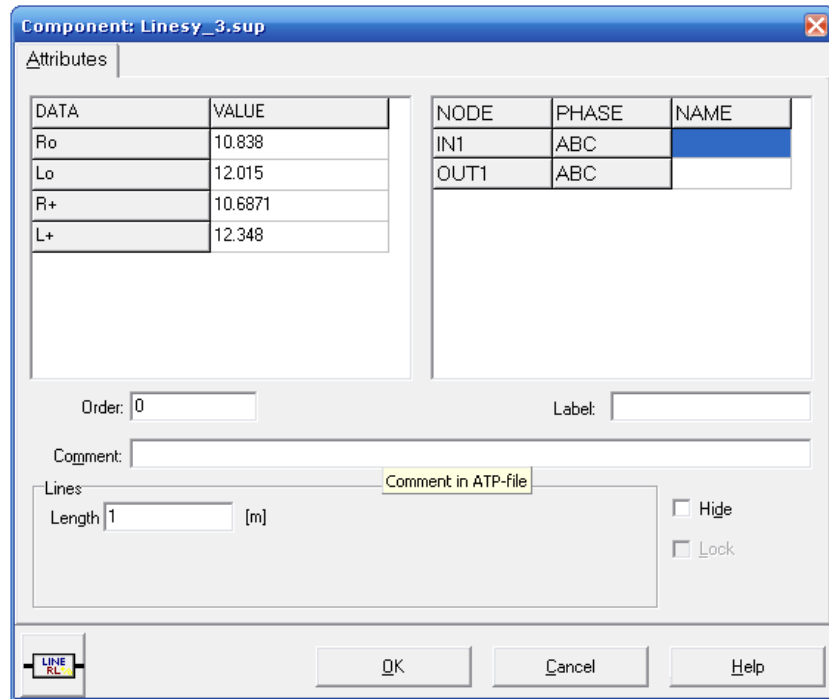


Figura 3.35. Ventana de datos para el equivalente de corto circuito 2 en el software Atp Draw.

3.13. MODELADO DE LOS GENERADORES DEL SISTEMA DE POTENCIA EL PROGRAMA ATP DRAW.

A continuación se procede a modelar por medio del software Atp Draw, la parte de generación de nuestro sistema de potencia, dos generadores son conectados en los extremos de la línea de transmisión. En la siguiente figura se muestra la ubicación del generador 1 modelado en Atp Draw.

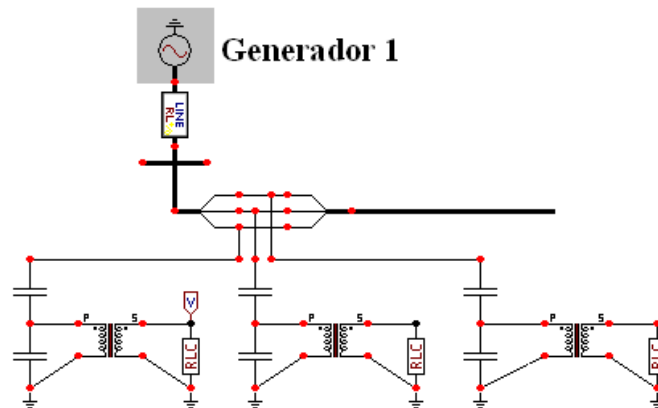


Figura 3.36. Modelo del generador 1 en el software ATP Draw.

La siguiente figura muestra los valores del generador 1 introducidos dentro de la ventana del software Atp Draw.

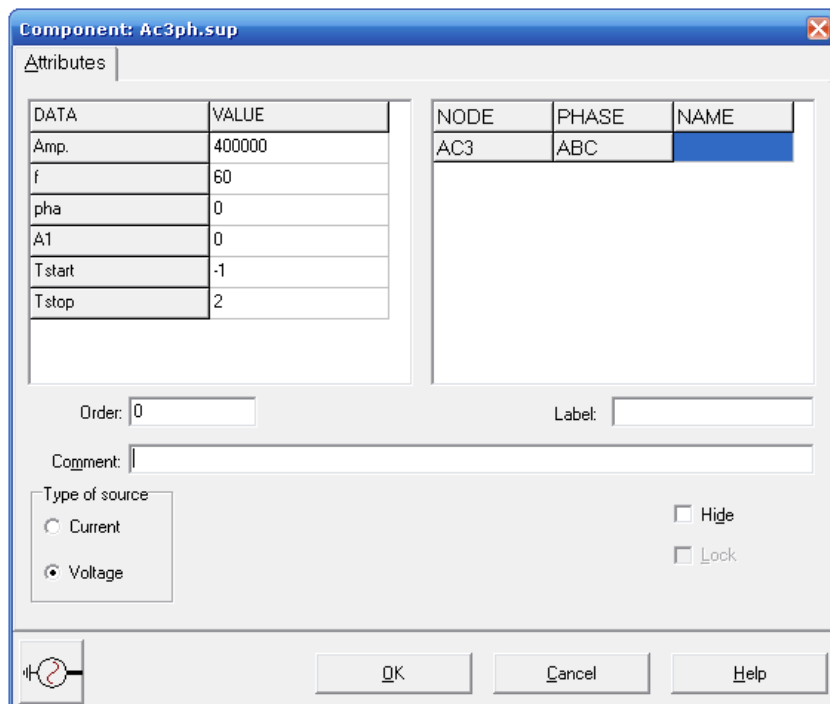


Figura 3.37. Ventana de datos para el generador 1 en el software Atp Draw.

A continuación se muestra la ubicación del generador 2 modelado en el software Atp Draw.

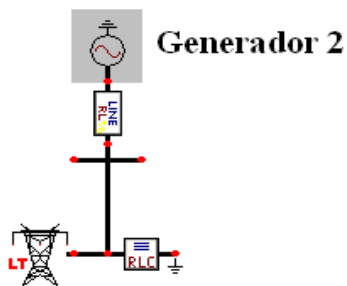


Figura 3.38. Modelo del generador 2 en el software ATP Draw.

La siguiente figura muestra los valores del generador 2 introducidos dentro de la ventana del software Atp Draw.

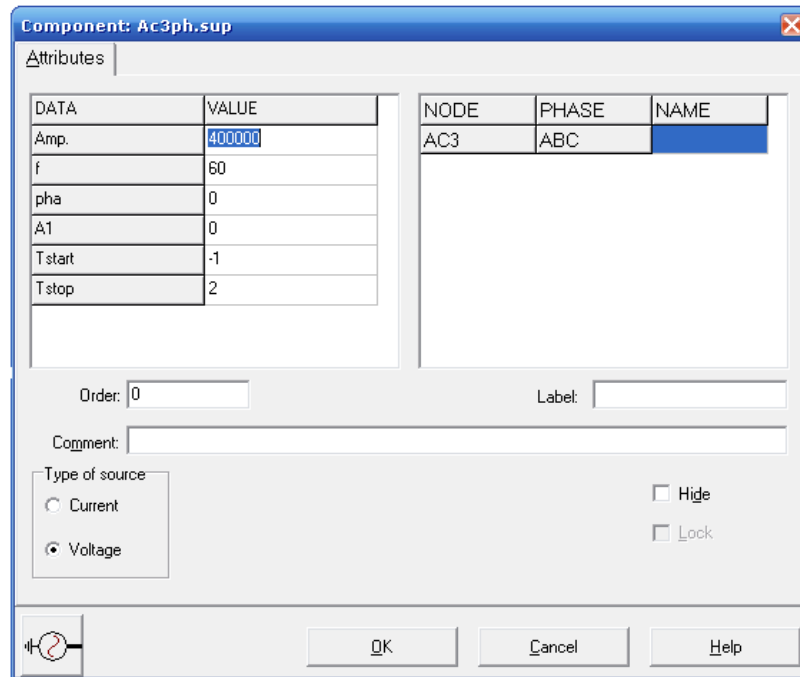


Figura 3.39. Ventana de datos para el generador 2 en el software *Atp Draw*.

Donde:

Amp = Es el valor pico en [A] o [V] de la función.

f= Frecuencia en [Hz].

pha= Fase en grados o segundos dependiendo de **A1**

A1= 0:

pha en grados >0: **pha** en segundos.

3.14. SIMULACION DE FALLA A TIERRA DE LA LINEA DE TRANSMISION BAJO ESTUDIO.

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en un régimen de operación crítico requieren de sistema de protección y control que actúen de forma inmediata de tal manera que pueda conservarse el sincronismo del sistema, que mantenga también una operación de calidad, continua y reduciendo a un mínimo los daños causados por las fallas [11].

Las fallas monofásicas a tierra pueden generar corrientes de falla cuya magnitud pueden superar a la corriente de falla trifásica. Sin embargo, esto es más frecuente que ocurra en sistemas de transmisión o de distribución en media tensión, sobre todo cuando la falla se ubica cerca de la subestación. Es poco frecuente que la corriente de falla

monofásica supere en amplitud la corriente generada por una falla trifásica. La magnitud de la falla monofásica puede superar a la generada por una falla trifásica en el mismo punto,

A continuación se realizan las simulaciones de cortocircuito monofásico en una línea de transmisión de 300 KM. la simulación del cortocircuito es realizada en diferentes instantes de la senoidal.

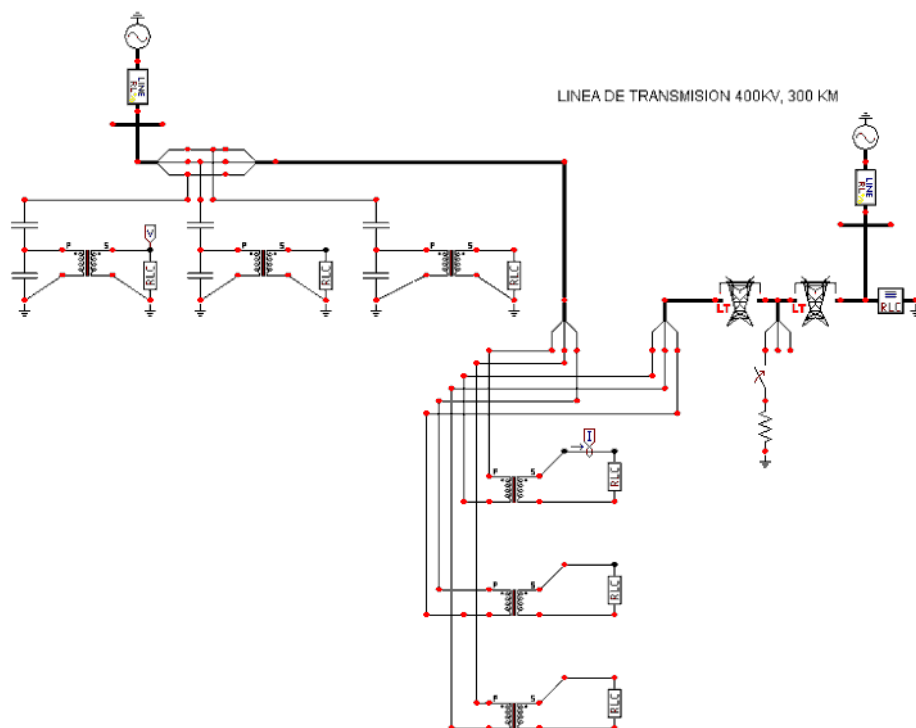


Figura 3.40. Modelo de la línea de transmisión con falla monofásica a 30 KM.

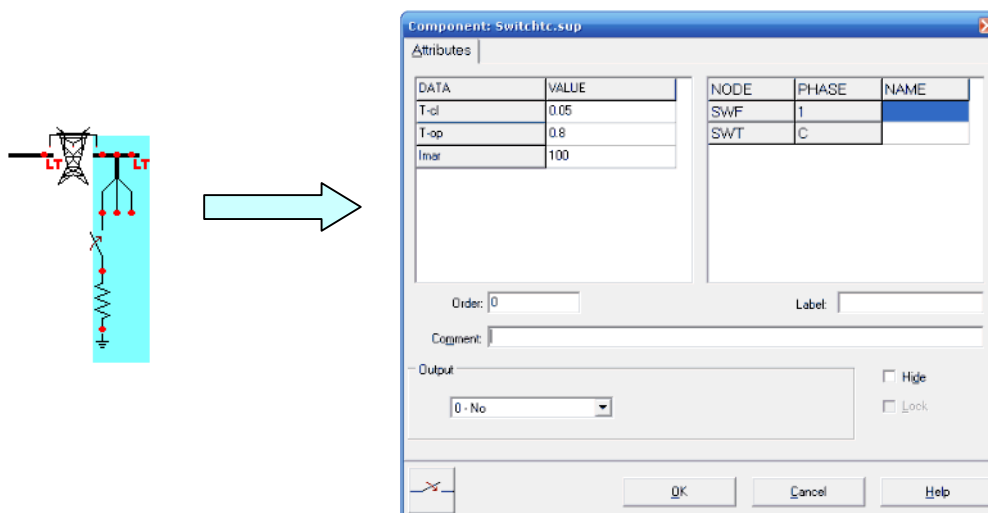


Figura 3.41. Ventana de datos para la cuchilla de puesta a tierra en el software Atp Draw.

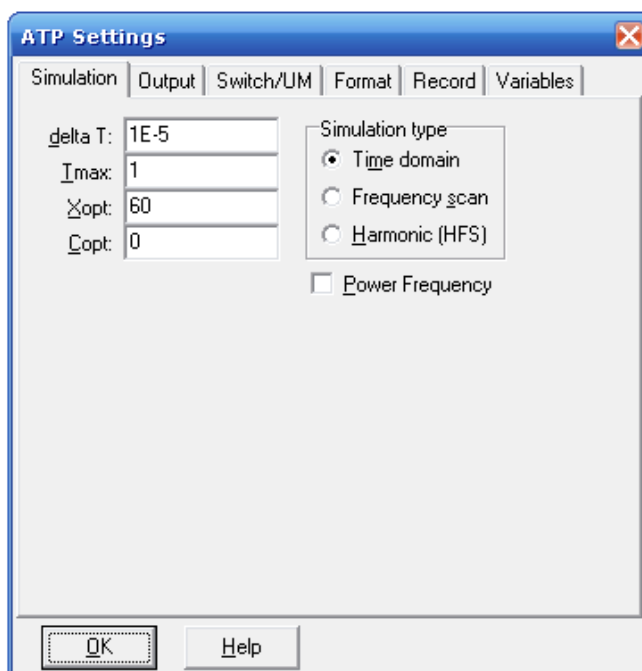


Figura 3.42. Ventana de datos para la configuración del tiempo de simulación y muestras por segundo en Atp Draw.

Las siguientes graficas muestran el comportamiento del voltaje y la corriente para una falla en el sistema eléctrico de potencia. Los valores del sistema de potencia son los mostrados en las ventanas de datos correspondientes a cada elemento se realiza la simulación para una falla monofásica. Los valores de voltaje y corriente son los obtenidos por los transformadores de instrumento.

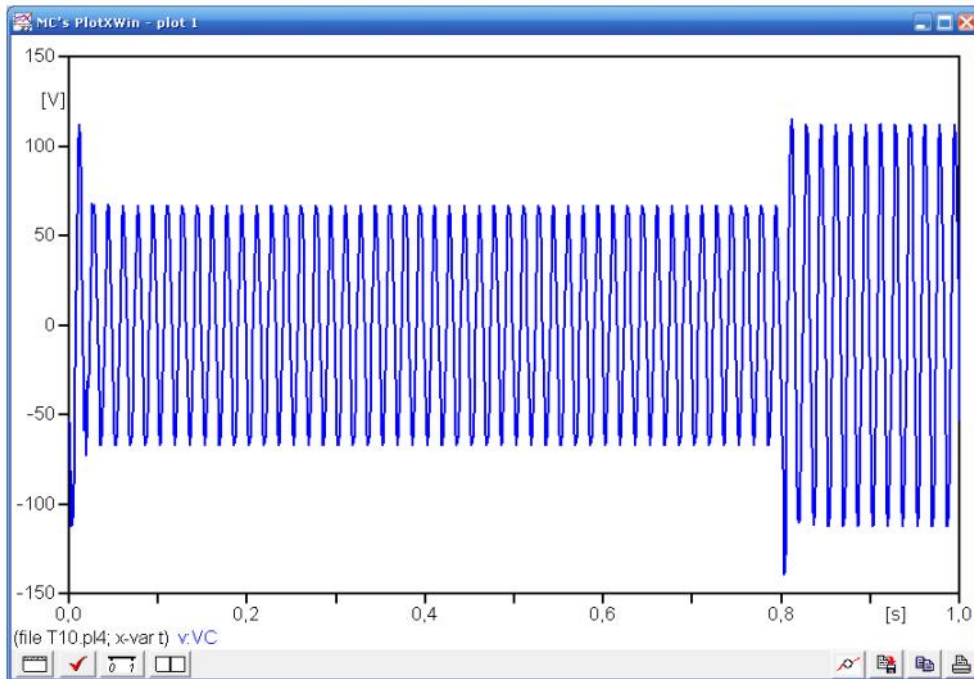


Figura 3.43. Voltaje para la falla monofásica en Atp Draw.

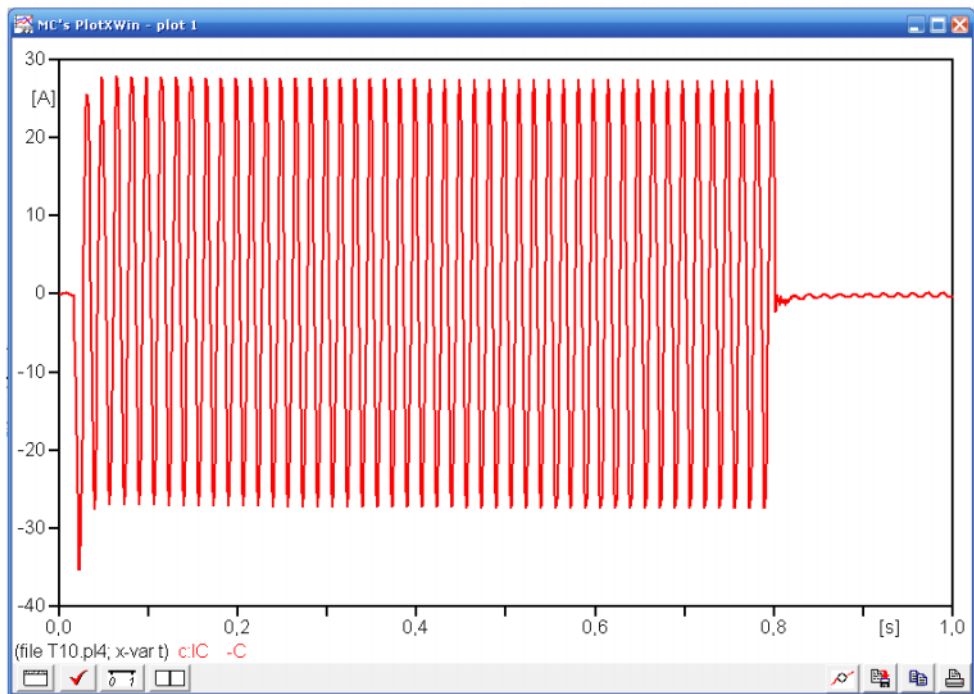


Figura 3.44. Corriente para la falla monofásica en Atp Draw.

Los valores de corriente y de voltaje obtenidos de la falla monofásica son los que se utilizan para el cálculo del estimado al punto fallado con la conversión de las graficas en extensión *.pl4* a *.mat*.

Desarrollo Del Algoritmo De La Ecuación Diferencial

4.1. INTRODUCCION.

Al representar la línea mediante un circuito R-L El algoritmo de protección a distancia determina la localización de una falla en función de los valores de la resistencia y reactancia de la línea de transmisión que existe en el momento de su ocurrencia resolviendo una ecuación diferencial.

4.2. SOLUCIÓN DEL MODELO MONOFÁSICO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.

El algoritmo de la ecuación diferencial consiste en modelar un sistema de potencia en lugar de considerar el modelo de la señal, para el desarrollo del algoritmo se considera el equivalente monofasico de una línea en falla mostrado en la figura 4.1

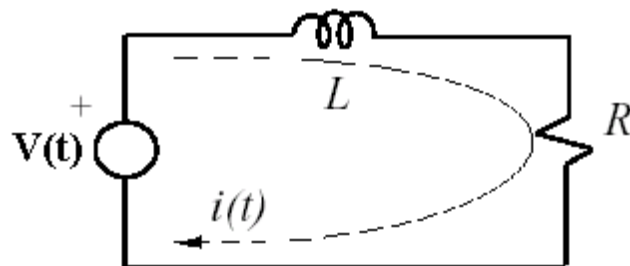


Figura 4.1. Modelo de un circuito serie R-L de una línea de transmisión

$$R I_1(t) + L \frac{di_1}{dt} = V_1(t) \quad (4.1)$$

Si se considera que la falla ocurre a una distancia determinada, es posible expresar la ecuación diferencial de la siguiente forma.

$$\kappa_R R \mathbf{I}(t) + \kappa_L L \mathbf{d}i/dt = \mathbf{V}(t) \quad (4.2)$$

Donde κ_R y κ_L son los valores que representan los estimados en por unidad de la línea de transmisión, las magnitudes de voltaje $\mathbf{V}(t)$ y corriente $\mathbf{I}(t)$ son determinadas por las magnitudes medidas por los transformadores de corriente y potencial y los valores R y L son conocidos y dependientes de la línea por lo tanto es posible estimar la distancia a la falla resolviendo una ecuación diferencial en términos de los estimados a la longitud del punto fallado.

Al representar la línea mediante en circuito R-L supone que el modelo es exacto para líneas cortas aunque evidentemente el modelo implica otras aproximaciones que son: los TCs y TPs son ideales en el rango de frecuencia de 50 a 300 Hz, la resistencia de falla es pequeña y la línea se considera perfectamente transpuesta.

Para el análisis del problema se consideran un instante n y $n+1$ para el caso del instante n corresponde 1 y para $n+1$ corresponde 2, esto aplica para la subíndices de los elementos dependientes del tiempo, esto con el fin de facilitar el calculo. Y ahora tenemos la misma ecuación pero para dos instantes diferentes.

$$\kappa_R R \mathbf{I}_1(t) + \kappa_L L \mathbf{d}i_1/dt = \mathbf{V}_1(t) \quad (4.3)$$

$$\kappa_R R \mathbf{I}_2(t) + \kappa_L L \mathbf{d}i_2/dt = \mathbf{V}_2(t) \quad (4.4)$$

Despejando R de (4.2) tenemos:

$$R = \frac{\mathbf{V}_2(t) - \kappa_L L \mathbf{d}i_2/dt}{\kappa_R \mathbf{I}_2(t)} \quad (4.5)$$

Sustituyendo (4.5) en (4.3) tenemos:

$$\frac{\mathbf{I}_1 \mathbf{V}_2(t) - \mathbf{I}_1 \kappa_L L \mathbf{d}i_2/dt + \kappa_L L \mathbf{d}i_1/dt}{\mathbf{I}_2(t)} = \mathbf{V}_1(t) \quad (4.6)$$

$$\frac{\mathbf{I}_1 \mathbf{V}_2(t) - \mathbf{I}_1 \kappa_{\ell} \mathbf{L} \frac{d\lambda_2}{dt}}{\mathbf{I}_2(t)} = \mathbf{V}_1(t) - \kappa_{\ell} \mathbf{L} \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (4.7)$$

Ahora se despeja $\kappa_{\ell} \mathbf{L}$:

$$\mathbf{I}_1 \mathbf{V}_2(t) - \mathbf{I}_1 \kappa_{\ell} \mathbf{L} \frac{d\lambda_2}{dt} = \mathbf{I}_2(t) \mathbf{V}_1(t) - \mathbf{I}_2(t) \kappa_{\ell} \mathbf{L} \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (4.8)$$

$$\kappa_{\ell} \mathbf{L} = \frac{\mathbf{I}_1 \mathbf{V}_2(t) - \mathbf{I}_1 \kappa_{\ell} \mathbf{L} \frac{d\lambda_2}{dt}}{\mathbf{I}_2(t) \mathbf{V}_1(t) - \mathbf{I}_2(t) \kappa_{\ell} \mathbf{L} \frac{d\lambda_1}{dt}} \quad (4.9)$$

Analizando cada elemento de la ecuación, y por medio de la integración trapezoidal para obtener la solución de la ecuación diferencial. [7]

$$\kappa_{\mathbb{R}} \int_t^{t_1} \mathbf{I}(t) + \kappa_{\ell} \mathbf{L} \int_t^{t_1} \frac{d\lambda}{dt} = \int_t^{t_1} \mathbf{V}(t) \quad (4.10)$$

$$\kappa_{\mathbb{R}} \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{I}(t) + \kappa_{\ell} \mathbf{L} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\lambda}{dt} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{V}(t) \quad (4.11)$$

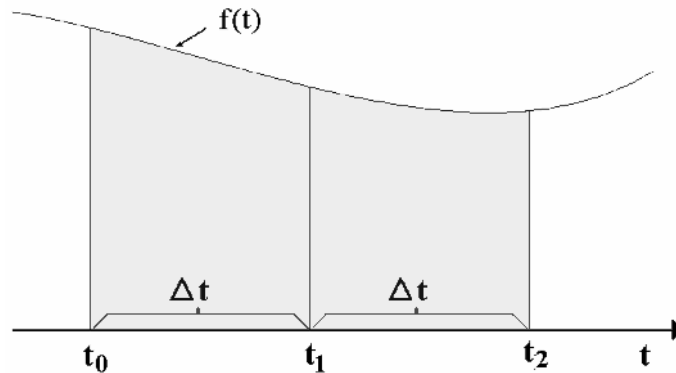


Figura 4.2. Análisis de una función para la solución de la ecuación diferencial

$$\kappa_{\mathbb{R}} \int_t^{t_1} \mathbf{I}(t) dt + \kappa_{\ell} \mathbf{L} \{ \lambda(t_1) - \lambda(t) \} = \int_t^{t_1} \mathbf{V}(t) dt \quad (4.12)$$

$$\int_t^{t_1} \mathbf{V}(t) dt = \left(\frac{t_1 - t}{2} \right) \{ v(t) + v(t_1) \} \implies \int_t^{t_1} \mathbf{V}(t) dt = \left(\frac{t_1 - t}{2} \right) (v + v_1) \quad (4.13)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{V}(t)dt = (t/2)(v(t_1)+v(t_2)) \Rightarrow \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{V}_2 = (t/2)(v_1+v_2) \quad (4.14)$$

$$\int_t^{t_1} d\lambda = \lambda(t_1) - \lambda(t) \Rightarrow \int_t^{t_1} d\lambda_1/dt = \lambda_1 - \lambda \quad (4.15)$$

$$d\lambda = \lambda(t_2) - \lambda(t_1) \Rightarrow \int_{t_1}^{t_2} d\lambda_2/dt = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (4.16)$$

$$\int_t^{t_1} \mathbf{I}(t)dt = (t/2)(\lambda(t) + \lambda(t_1)) \Rightarrow \int_t^{t_1} \mathbf{I}_1 = (t/2)(\lambda_1 + \lambda) \quad (4.17)$$

$$\int_t^{t_1} \mathbf{I}(t)dt = (t/2)(\lambda(t_2) + \lambda(t_1)) \Rightarrow \int_t^{t_1} \mathbf{I}_2 = (t/2)(\lambda_2 + \lambda_1) \quad (4.18)$$

$$\mathcal{L}_I L = \frac{(t/2)(\lambda_1 + \lambda)(t/2)(v_2 + v_1) - (t/2)(\lambda_2 + \lambda_1)(t/2)(v_1 + v)}{(t/2)(\lambda_1 + \lambda)(\lambda_2 - \lambda_1) - (t/2)(\lambda_2 + \lambda_1)(\lambda_1 - \lambda)} \quad (4.19)$$

$$\mathcal{L}_I L = \frac{t}{2} \frac{(\lambda_1 + \lambda)(v_2 + v_1) - (\lambda_2 + \lambda_1)(v_1 + v)}{(\lambda_1 + \lambda)(\lambda_2 - \lambda_1) - (\lambda_2 + \lambda_1)(\lambda_1 - \lambda)} \quad (4.20)$$

$\mathcal{L}_I L = \mathcal{L}_L$ como $\mathcal{L}_R R = \mathcal{L}_R$ en por unidad de la longitud de la línea de transmisión con una base de 100% de la zona a proteger. A continuación se escribe la expresión en términos de una señal de tiempo discreto, en tiempos de muestra $k+2, k+1, k$. [13]

$$\mathcal{L}_L = \frac{t}{2} \frac{(\lambda_{k+1} + \lambda_k)(v_{k+2} + v_{k+1}) - (\lambda_{k+2} + \lambda_{k+1})(v_{k+1} + v_k)}{(\lambda_{k+1} + \lambda_k)(\lambda_{k+2} - \lambda_{k+1}) - (\lambda_{k+2} + \lambda_{k+1})(\lambda_{k+1} - \lambda_k)} \quad (4.21)$$

$$\mathcal{L}_R R \mathbf{I}_1(t) + \mathcal{L}_I L \frac{d\lambda_1}{dt} = \mathbf{V}_1(t) \quad (4.22)$$

$$L = \mathbf{V}_1(t) - \mathcal{L}_R R \mathbf{I}_1(t) \quad (4.23)$$

$$\kappa_{\ell} \mathbf{d}\lambda_1/\mathbf{d}\mathbf{t}$$

$$\kappa_{\mathbb{R}} \mathbf{I}_2(\mathbf{t}) + \kappa_{\ell}(\mathbf{V}_1(\mathbf{t}) - \kappa_{\mathbb{R}} \mathbf{I}_1(\mathbf{t})) \frac{\mathbf{d}\lambda_2/\mathbf{d}\mathbf{t}}{\kappa_{\ell} \mathbf{d}\lambda_1/\mathbf{d}\mathbf{t}} = \mathbf{V}_2(\mathbf{t}) \quad (4.24)$$

$$\frac{\kappa_{\mathbb{R}} - \mathbf{V}_1(\mathbf{t}) \mathbf{d}\lambda_2/\mathbf{d}\mathbf{t} - \mathbf{V}_2(\mathbf{t}) \mathbf{d}\lambda_1/\mathbf{d}\mathbf{t}}{\mathbf{I}_1(\mathbf{t}) \mathbf{d}\lambda_2/\mathbf{d}\mathbf{t} - \mathbf{I}_2(\mathbf{t}) \kappa_{\ell} \mathbf{d}\lambda_1/\mathbf{d}\mathbf{t}} \quad (4.25)$$

$$\kappa_{\mathbb{R}} = \frac{(\nu_{k+1} + \nu_k) (\lambda_{k+2} - \lambda_{k+1}) - (\nu_{k+2} - \nu_{k+1}) (\lambda_{k+1} - \lambda_k)}{(\lambda_{k+1} + \lambda_k) (\lambda_{k+2} - \lambda_{k+1}) - (\lambda_{k+2} + \lambda_{k+1}) (\lambda_{k+1} - \lambda_k)} \quad (4.26)$$

4.3. SOFTWARE MATLAB

MATLAB es un ambiente de cómputo, de alta ejecución numérica y de visualización. MATLAB integra el análisis numérico, calculo de matrices, procesamiento de señales, y graficación, en un ambiente sencillo de utilizar, donde los problemas y sus soluciones son expresados justamente como están escritas; a diferencia de la programación tradicional

El nombre de MATLAB surge de *matrix laboratory*, dado que el elemento básico de dato es una matriz, la cual no requiere de dimensionamiento, lo que permite resolver problemas en una fracción de tiempo, del que nos tomaría al escribir un programa en cualquier lenguaje como, Pascal, Fortran, C, etc. [9]

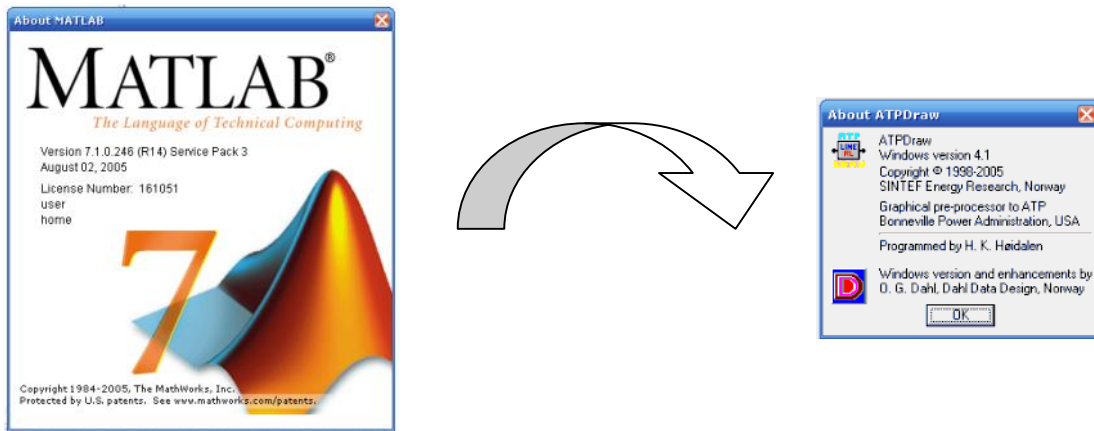
MATLAB, también cuenta con varias familias de soluciones para aplicaciones específicas llamadas *toolboxes*, que son colecciones de funciones utilizadas para resolver alguna clase particular de problema. Las áreas en donde los *toolboxes* están disponibles incluyen el procesamiento de señales, diseño de sistemas de control, la simulación de sistemas dinámicos, la identificación de sistemas, redes neuronales y otros.

4.3.1. Conversión .pl4 a .mat para análisis numérico del algoritmo en Matlab.

El algoritmo de la ecuación diferencial en Matlab es básicamente un análisis numérico de suma, resta, multiplicación y división de matices obtenidas de la solución del

modelo de la ecuación diferencial, estos parámetros son obtenidos de la simulación del modelo de la línea de transmisión en el programa ATP Draw.

En programa ATP Draw las graficas obtenidas de la simulación, tienen una extensión que funciona únicamente con el ejecutable *PLOTXY* de ATP Draw que viene incluido en la instalación de ATP Draw. Las graficas obtenidas en la simulación tiene la extensión *.pl4* mientras que las graficas que genera Matlab tienen la extensión *.mat*.



En las siguientes líneas de comandos en la ventana de Matlab se muestra como importar los archivos desde la dirección de ATP Draw hasta la carpeta de Matlab ya con la extensión *.mat*.

```

Command Window
Warning: MATLAB Toolbox Path Cache is out of date and is not being used.
Type 'help toolbox_path_cache' for more info.

To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

>> !copy c:\atpgnu\T100.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
!P142mat4.exe T100.pl4 T100.mat;
    1 archivos copiados.
>> !copy c:\atpgnu\T10.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
!P142mat4.exe T10.pl4 T10.mat;
    1 archivos copiados.
>>

```

Figura 4.3. Código en Matlab para importar graficas de *.pl4* a *.mat*,

La simulación de un corto circuito es realizada del siguiente modelo que incluye un punto de medición de corriente y voltaje además una línea de 300 Km. En secciones de 30 Km. para simulaciones posteriores.

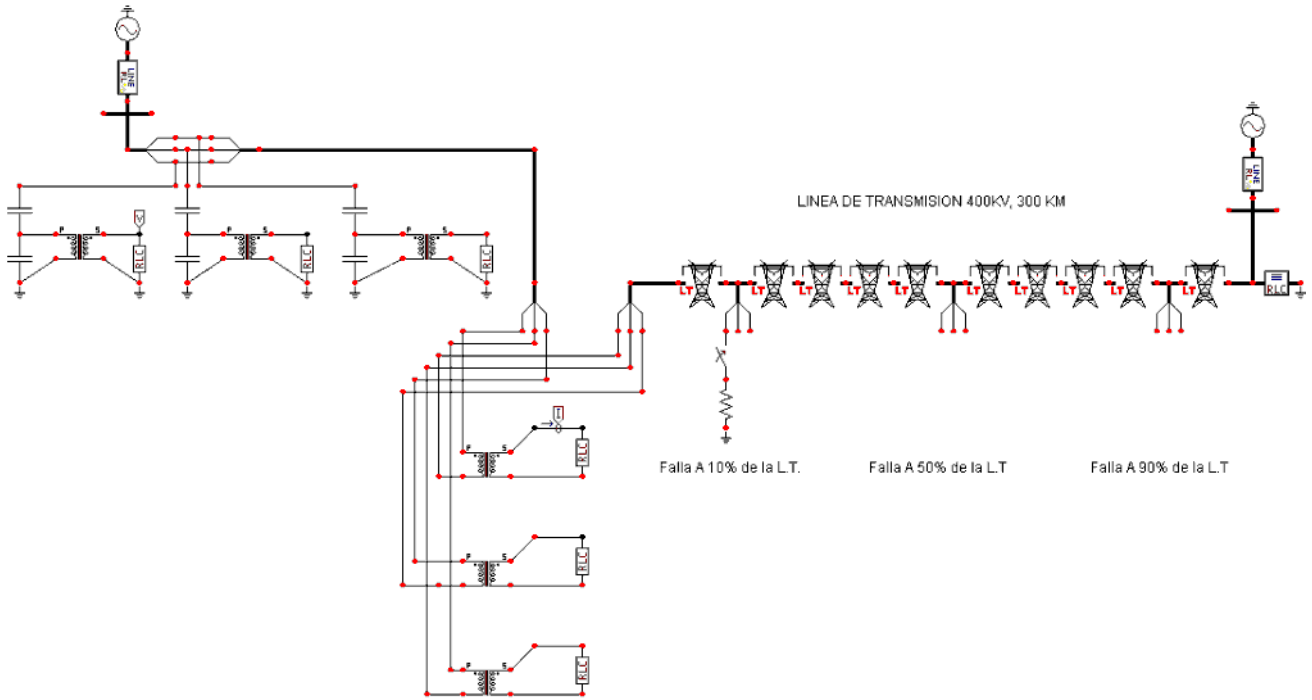


Figura 4.4. Modelo de la línea de transmisión con unidades medición de corriente y voltaje para análisis con carga.

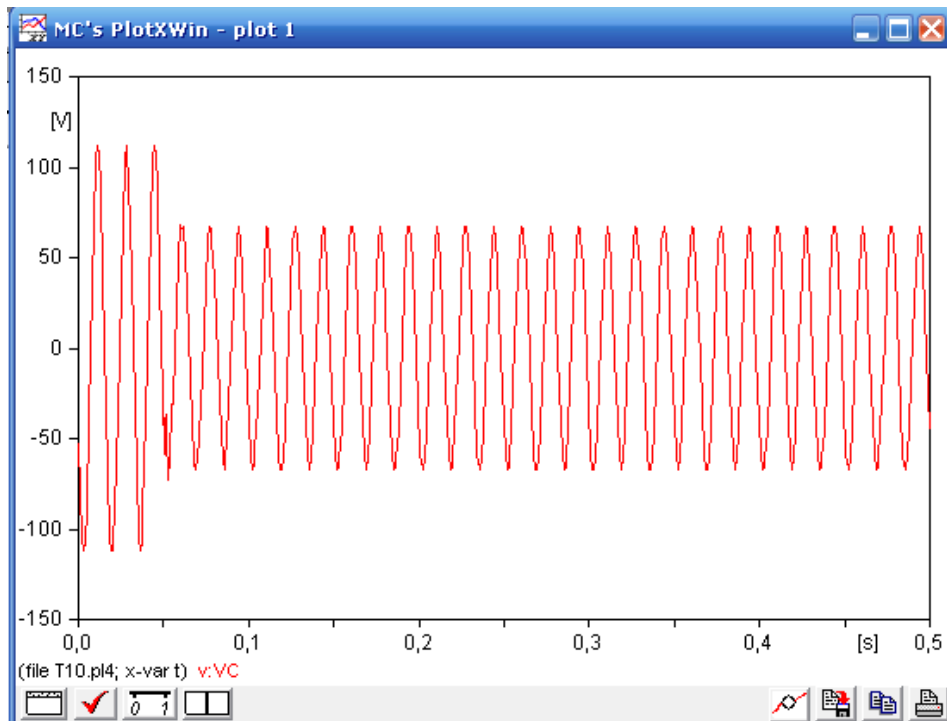


Figura 4.5. Voltaje obtenido de la línea de transmisión en la simulación en ATP Draw.

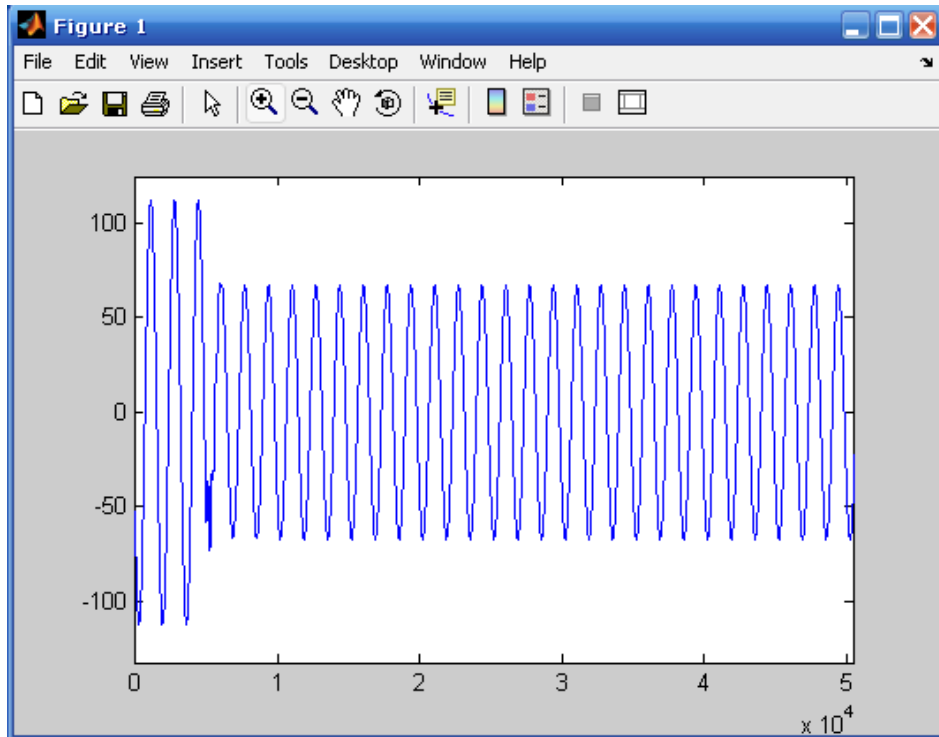


Figura 4.6. Voltaje obtenido de la línea de transmisión en el programa Matlab.

4.4. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL EN MATLAB.

Para la solución y obtención de los parámetros base a utilizar para tener el valor en por unidad del estimado al punto de falla utilizamos la solución de la ecuación para la solución de k_l y obtener el valor de referencia para la longitud total de la línea de transmisión.

```
%-----
% Desarrollo Del Algoritmo De La Ecuación Diferencial
%-----
%Para calcular el valor base para  $k_l$  tenemos
>> !copy c:\atpgnu\T100.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
!PI42mat4.exe T100.pl4 T100.mat;
```



```
!copy c:\atpgnu\T10.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
!PI42mat4.exe T10.pl4 T10.mat;
clear all
load 'T100.mat';
load 'T10.mat';
load 'filtrobutterworth.mat';
%Calculo De Parámetros Base Para El Coeficiente kl De La Ec. Diferencial
k=1;
n=80001;
IIk=iIcCc(k:n-2);
IIk2=iIcCc(k+2:n);
VVk1=vVcc(k+1:n-1);
IIk1=iIcCc(k+1:n-1);
VVk2=vVcc(k+2:n);
VVk=vVcc(k:n-2);
NB=0.000005*((VVk2+VVk1).*(IIk1+IIk)-(IIk2+IIk1).*(VVk1+VVk));
DB=(IIk1+IIk).*(IIk2-IIk1)-(IIk2+IIk1).*(IIk1-IIk);
KB=NB./DB;
KBF=filter(Hd,KB);
plot (KBF);
%-----
%-----
```

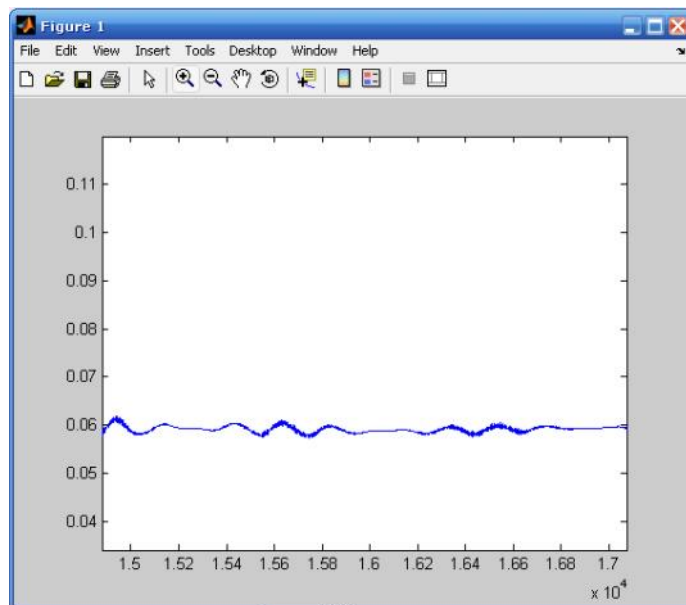


Figura 4.7. Valor base obtenido del la ecuación diferencial para el coeficiente kl.

Para la solución y obtención de los parámetros base que utilizamos para tener el valor en por unidad del estimado al punto de falla para kr utilizamos la solución del la ecuación diferencial obtener el valor de referencia para la longitud total de la línea de transmisión pero para este caso del elemento resistivo.

```
%-----
% Desarrollo Del Algoritmo De La Ecuación Diferencial
%-----
```

```

>> !copy c:\atpgnu\T100.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
!PI42mat4.exe T100.pl4 T100.mat;
!copy c:\atpgnu\T10.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
!PI42mat4.exe T10.pl4 T10.mat;
clear all
load 'T100.mat';
load 'T10.mat';
load 'filtrobutterworth.mat';
% Elementos para el calculo De Parámetros Base Para El Coeficiente Kr De La Ec. Diferencial
k=1;
n=80001;
IIk=ilcCc(k:n-2);
IIk2=ilcCc(k+2:n);
VVk1=vVcc(k+1:n-1);
IIk1=iIcCc(k+1:n-1);
VVk2=vVcc(k+2:n);
VVk=vVcc(k:n-2);
% Calculo de parametros base kr
NBR=((VVk1+VVk).*(IIk2-IIk1))-((IIk1-IIk).*(VVk2-VVk1));
DBR=(IIk1+IIk).*(IIk2-IIk1)-(IIk2+IIk1).*(IIk1-IIk);
KBR=NBR./DBR;
KBRF=filter(Hd,KBR);
plot (KBRF);
%-----

```

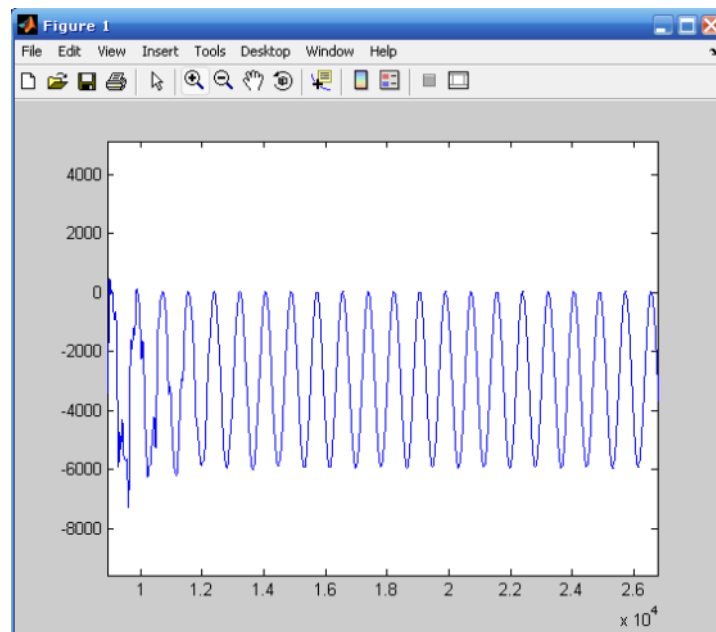


Figura 4.8. Valor base obtenido de la ecuación diferencial para el coeficiente kr .

4.4.1. Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión con carga y sin filtrado.

Ya obtenidos los valores base para la referencia de la línea de transmisión se realiza el cálculos para una falla al 10 % de la longitud de la línea sin filtro ante una falla monofásica.

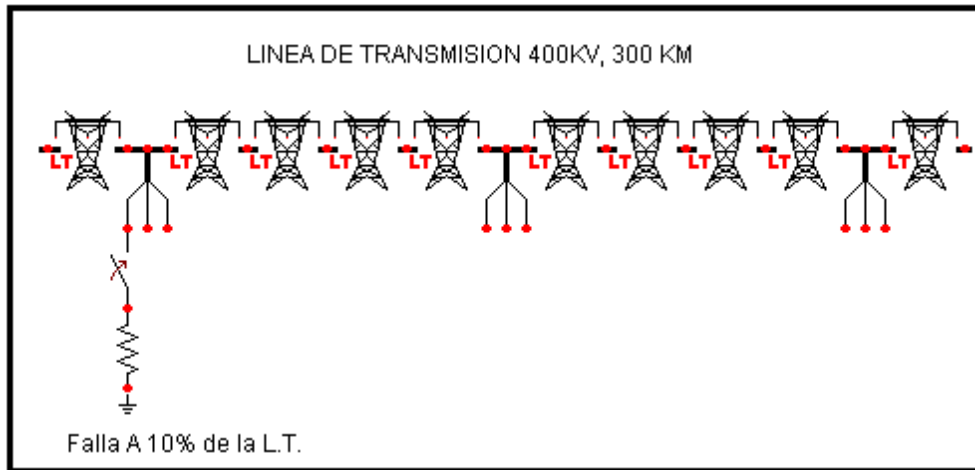


Figura 4.9. Modelo del corto circuito al 10% de la línea de transmisión.

Línea de comandos en Matlab para una falla monofásica sin filtro de Butterworth, este análisis es realizado con carga.

```
%-----
% Desarrollo Del Algoritmo De La Ecuación Diferencial
%-----
>> !copy c:\atpgnu\T100.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
>> !Pl42mat4.exe T100.pl4 T100.mat;
>> !copy c:\atpgnu\T10.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
>> !Pl42mat4.exe T10.pl4 T10.mat;
>> clear all
>> load 'T100.mat';
load 'T10.mat';
%Calculo de parámetros base
k=1;
n=30001;
T=t(k:n-2);
Ik=iIcCc(k:n-2);
Ik2=iIcCc(k+2:n);
VVk1=vVcc(k+1:n-1);
Ik1=iIcCc(k+1:n-1);
```

```

VVk2=vVcc(k+2:n);
VVk=vVcc(k:n-2);
NB=0.000005*((VVk2+VVk1).*(IIk1+IIk)-(IIk2+IIk1).*(VVk1+VVk));
DB=(IIk1+IIk).*(IIk2-IIk1)-(IIk2+IIk1).*(IIk1-IIk);
KB=NB./DB;
Ik=iIcC(k:n-2);
Ik1=iIcC(k+1:n-1);
Ik2=iIcC(k+2:n);
Vk=vVc(k:n-2);
Vk1=vVc(k+1:n-1);
Vk2=vVc(k+2:n);
N=0.000005*((Vk2+Vk1).*(Ik1+Ik)-(Ik2+Ik1).*(Vk1+Vk));
D=(Ik1+Ik).*(Ik2-Ik1)-(Ik2+Ik1).*(Ik1-Ik);
K=N./D;
KL=300*K./KB;
NBR=((VVk1+VVk).*(IIk2-IIk1)-(IIk1-IIk).*(VVk2-VVk1));
DBR=(IIk1+IIk).*(IIk2-IIk1)-(IIk2+IIk1).*(IIk1-IIk);
KBR=NBR./DBR;
NR=(Vk1+Vk).*(Ik2-Ik1)-(Ik1-Ik).*(Vk2-Vk1);
DR=(Ik1+Ik).*(Ik2-Ik1)-(Ik2+Ik1).*(Ik1-Ik);
KR=NR./DR;
Kr=300*KR./KBR;
figure
subplot(2,1,1); plot(T,Kr);
title('Simulación de KR. ');
subplot(2,1,2); plot(T,KL);
title('Simulación de KL. ');
%-----

```

Del resultado de la simulación aplicando el análisis y cálculos correspondientes para las señales sin filtro y operaciones matriciales tenemos:

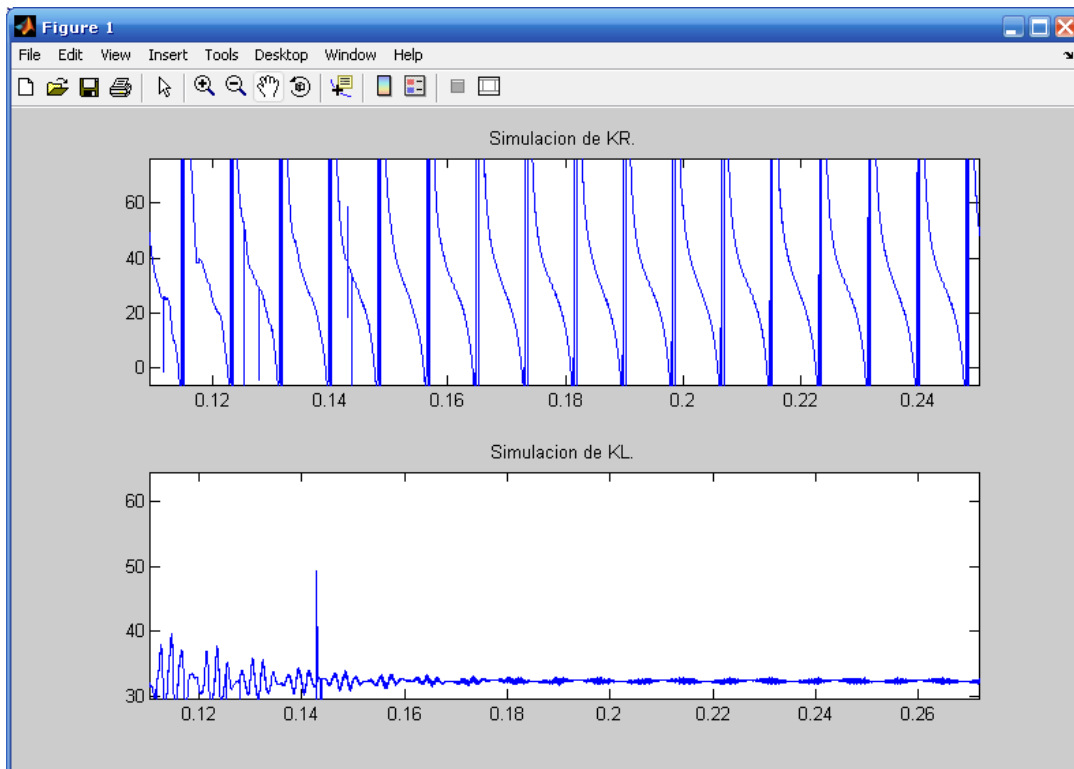


Figura 4.10. Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro.

Se puede apreciar que el resultado del algoritmo en cuanto al estimado al punto fallado el elemento resistivo no se puede ver claramente la distancia donde se encuentra el corto circuito, mientras que para el elemento inductivo se puede apreciar la longitud al punto fallado con un error de aproximadamente 1% de la longitud total de la línea de transmisión. Este resultado se puede ver en los 3 primeros ciclos considerando la frecuencia de comisión federal de electricidad.

También obtenidos los resultados en ATP Draw para la línea de transmisión se realizan los cálculos para una falla al 50 % de la longitud de la línea sin filtro ante una falla monofásica.

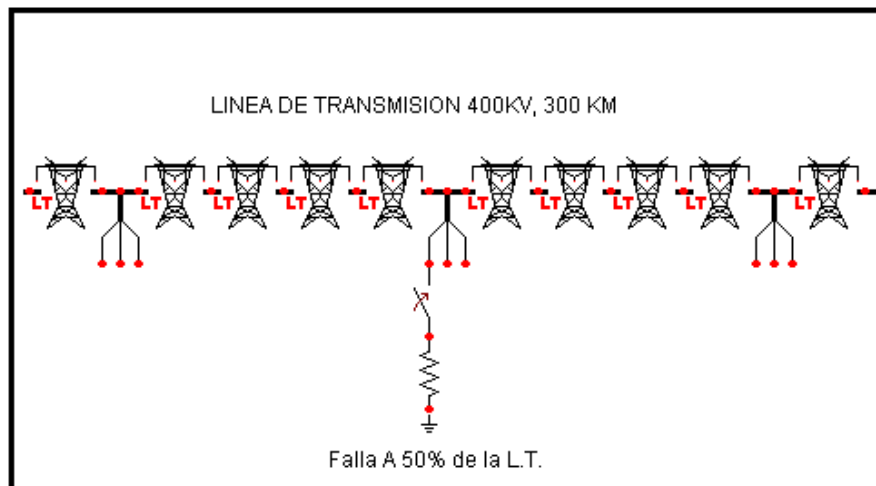


Figura 4.11. Modelo del corto circuito al 50% de la línea de transmisión.

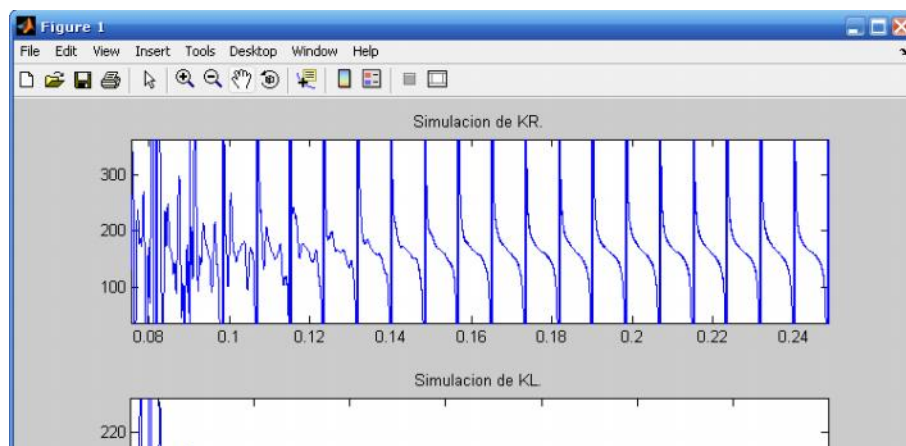


Figura 4.12. Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión sin filtro.

De la misma manera que para la falla el 10% tenemos el mismo comportamiento para el elemento resistivo y un error del 4% del total de la línea de transmisión para el elemento inductivo.

Ahora para la falla al 10% y 50% de la longitud de la línea y obtenidos los valores base para la referencia de la línea de transmisión se realiza el cálculos para una falla al 90 % de la longitud de la línea sin filtro ante una falla monofásica.

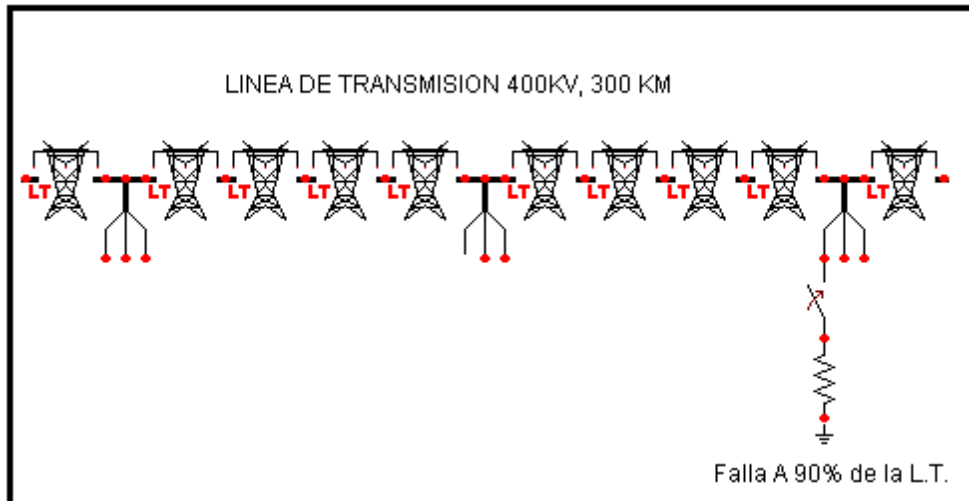


Figura 4.13. Modelo del corto circuito al 90% de la línea de transmisión.

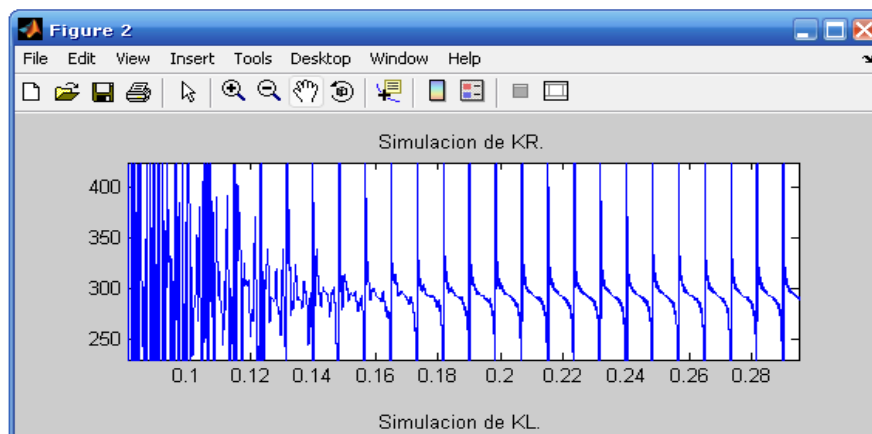


Figura 4.14. *Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión sin filtro.*

4.4.2. Diseño del filtro de Butterworth para el algoritmo de la ecuación diferencial en Matlab.

A continuación se demuestra como generar un código para un filtro de Butterworth de 5o. Orden, la frecuencia de corte para esta filtro es relativamente baja a un rango de muestras, permitiendo al filtro hacerlo de su dificultad natural hacerlo mas practico.

Si se tiene una frecuencia de muestreo 30 Khz. y una frecuencia de corte de 500 Hz. primero, crear el objeto para el diseño del filtro que en este caso es para el análisis numérico de una línea de transmisión, entonces se creara un filtro de doble precisión. Convirtiéndolo a una estructura DF1SOS implícita en la configuración de filtros en el comando “filtDES” de Matlab. Finalmente, examinaremos la respuesta a la frecuencia utilizando la herramienta “fvtool” de Matlab.

Tenemos las siguientes constantes a declarar en el programa:

$$F_s = 30001;$$

$$F_n = F_s/2;$$

$$F_{co} = 500;$$

Donde:

F_s = frecuencia de muestreo

F_n = frecuencia de la señal muestreada

F_{co} = frecuencia de corte

Línea de instrucciones para el filtro de Butterworth.

```

filtDES = fdesign.lowpass('n,fc', 5, Fco, Fs);
Hd = butter(filtDES);
Hd = convert(Hd, 'df1sos');
fvtool(Hd, 'Fs', Fs, 'FrequencyScale', 'log');

```

La forma de utilizar este comando en la ventana de Matlab es la siguiente línea:

```
y = filter(Hd, userstim).
```

De este comando “y” es la señal ya filtrada por el comando “Hd” que contiene las instrucciones para las características de filtrado como son tipo de filtro, frecuencia de corte, orden del filtro, frecuencia de muestreo el análisis numérico de los comandos “fvtool”, “filtDES” y “fdesign.lowpass”. “userstim” es el nombre que corresponde al gráfico a filtrar.

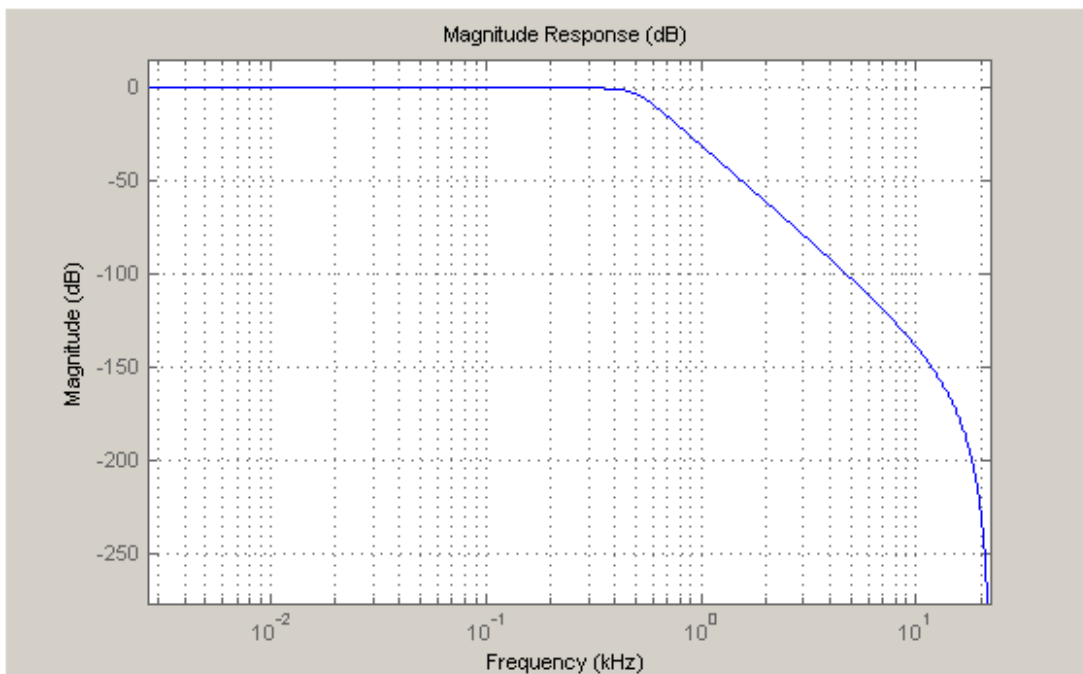


Figura 4.15. Filtro de butterworth de orden 5.

4.4.3. Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión con carga con filtro de Butterworth

Para el desarrollo del algoritmo de la ecuación diferencial se introduce dentro de las líneas de comandos en Matlab filter para los elementos de k_l y k_r . Para una falla al 10 % de la longitud de la línea con filtro con una frecuencia de corte de 500 Hz. Ante una falla monofásica las líneas de comandos son las siguientes:

```

%-----
% Desarrollo Del Algoritmo De La Ecuación Diferencial
%-----
% "DEA" Algoritmo de Proteccion de Distancia
>> !copy c:\atpgnu\T100.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
>> !Pl42mat4.exe T100.pl4 T100.mat;
>> !copy c:\atpgnu\P.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
>> !Pl42mat4.exe P.pl4 P.mat;
>> !copy c:\atpgnu\T10.pl4 "C:\Archivos de programa\MATLAB71\work"
>> !Pl42mat4.exe T10.pl4 T10.mat;
>> %Por medio del programa Pl42mat4.exe pasamos el PL4 a un formato
>> %compatible con MATLAB en este caso .mat
>> clear all
load 'T10.mat';
load 'T100.mat';
load 'P.mat';
load 'filtrobutterworth.mat';
%Para el calculo de calculo de parametros base tenemos:
k=1;% Pertenece a la dimension de la matriz
n=30001;% Pertenece a la dimension de la matriz
T=t(k:n-2);
KB=vKb(k+2:n);
%CALCULO DE PARAMETROS BASE
Iks=iIcC(k:n-2);
Ik=filter(Hd,Iks);
Ik1s=iIcC(k+1:n-1);
Ik1=filter(Hd,Ik1s);
Ik2s=iIcC(k+2:n);
Ik2=filter(Hd,Ik2s);
Vks=vVc(k:n-2);
Vk=filter(Hd,Vks);
Vk1s=vVc(k+1:n-1);
Vk1=filter(Hd,Vk1s);
Vk2s=vVc(k+2:n);
Vk2=filter(Hd,Vk2s);
% numerador y denominador
N=0.000005*((Vk2+Vk1).*(Ik1+Ik)-(Ik2+Ik1).*(Vk1+Vk));
D=(Ik1+Ik).*(Ik2-Ik1)-(Ik2+Ik1).*(Ik1-Ik);
%-----
% Filtrado del numerador y denominador
NF=filter(Hd,N);
DF=filter(Hd,D);
K=NF./DF;
KL=K./KB;
KLF=filter(Hd,KL);
kl=KLF;
kl=300*KLF;

```

```

%-----
%Corresponde al calculo de kr
IIk=iIcCc(k:n-2);
IIk2=iIcCc(k+2:n);
VVk1=vVcc(k+1:n-1);
IIk1=iIcCc(k+1:n-1);
VVk2=vVcc(k+2:n);
VVk=vVcc(k:n-2);
NBR=((VVk1+VVk).*(IIk2-IIk1)-(IIk1-IIk).*(VVk2-VVk1));
DBR=(IIk1+IIk).*(IIk2-IIk1)-(IIk2+IIk1).*(IIk1-IIk);
%-----
% Filtrado del numerador y denominador para obtener kr
NBRF=filter(Hd,NBR);
DBRF=filter(Hd,DBR);
KBR=NBRF/DBRF;
NR=((Vk1+Vk).*(Ik2-Ik1)-(Ik1-Ik).*(Vk2-Vk1));
DR=(Ik1+Ik).*(Ik2-Ik1)-(Ik2+Ik1).*(Ik1-Ik);
NRF=filter(Hd,NR);
DRF=filter(Hd,DR);
KR=NRF/DRF;
Kr=KR./KBR;
KrF=filter(Hd,*Kr);
kr=300*KrF;
%-----
% Para la obtención de la grafica de kr y kl
figure
grid;
hold on
subplot(2,1,1); plot(T,kr);
title('Simulacion con filtro de Butterworth kr. ');
subplot(2,1,2); plot(T,kl);
title('Simulación con filtro de Butterworth kl. ');
%-----
%-----

```

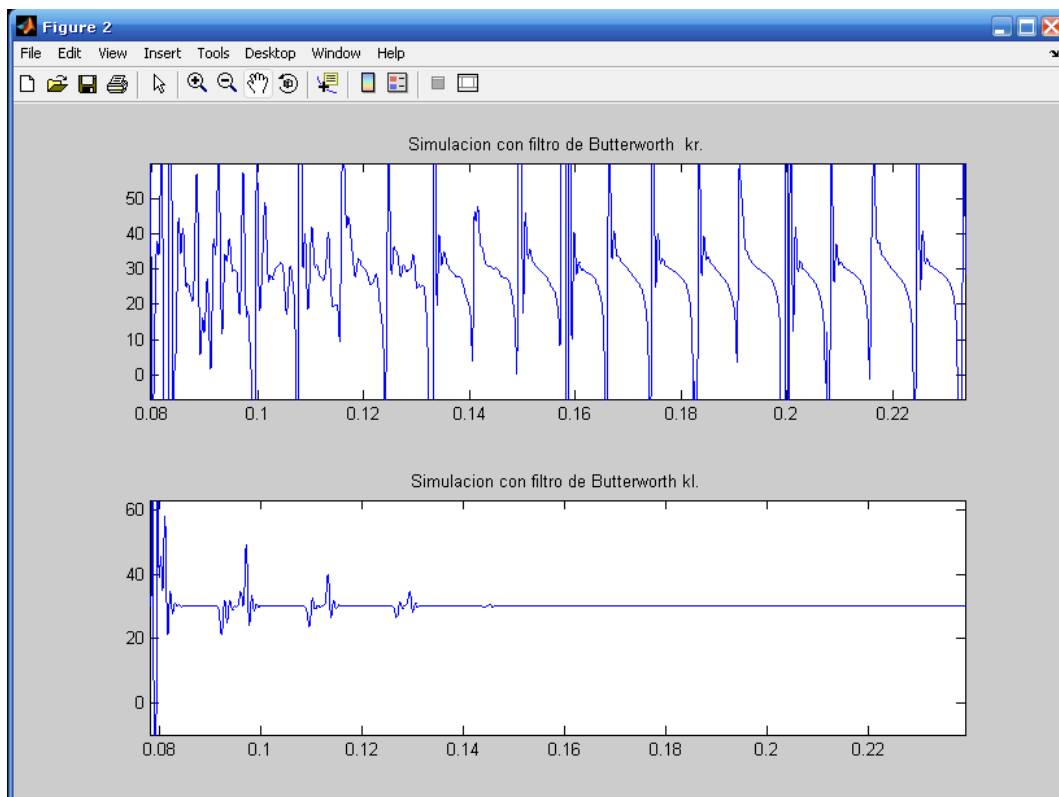


Figura 4.16. *Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth.*

Ahora la señal obtenida de la simulación realizada en el programa ATP Draw podemos claramente apreciar la exactitud del estimado al punto fallado. En el caso del elemento resistivo se puede ver zonas en la curva donde tiene una característica a la altura de los 30 Km. la grafica tiende a mantenerse en ese valor como en el elemento inductivo. El valor del estimado al punto fallado en el elemento inductivo tiene un error de menos del 0.5% de la longitud total de la línea de transmisión. E incluso antes de los tres ciclos ya se puede apreciar la distancia al punto fallado. Como se aprecia en la siguiente figura.

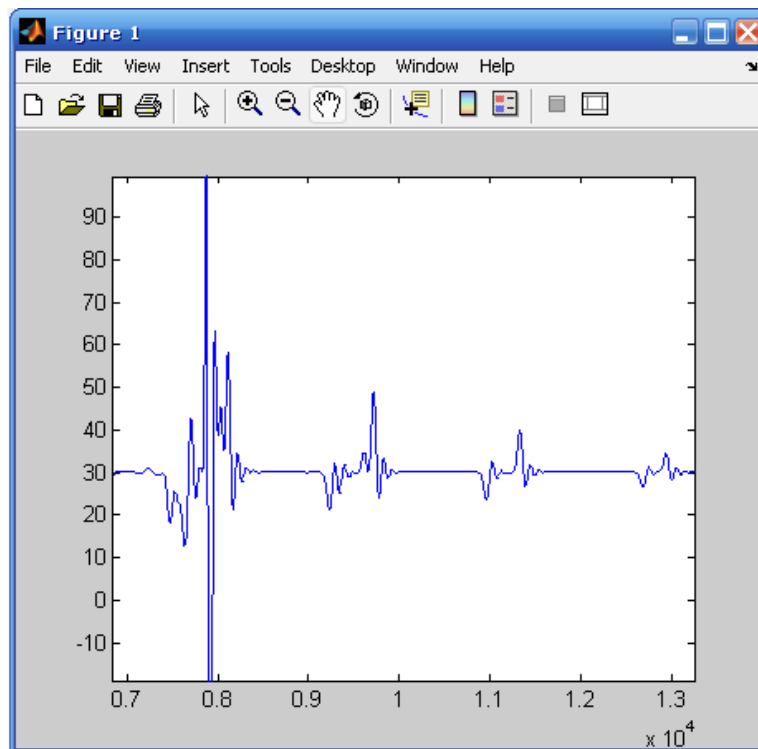


Figura 4.17. *Estimado kl de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth.*

Como ya se menciona en el elemento inductivo claramente se muestra la distancia al punto fallado, para este caso se realizo la simulación de un corto circuito monofásico a 30 Km. en una líneas de transmisión de 300 Km.

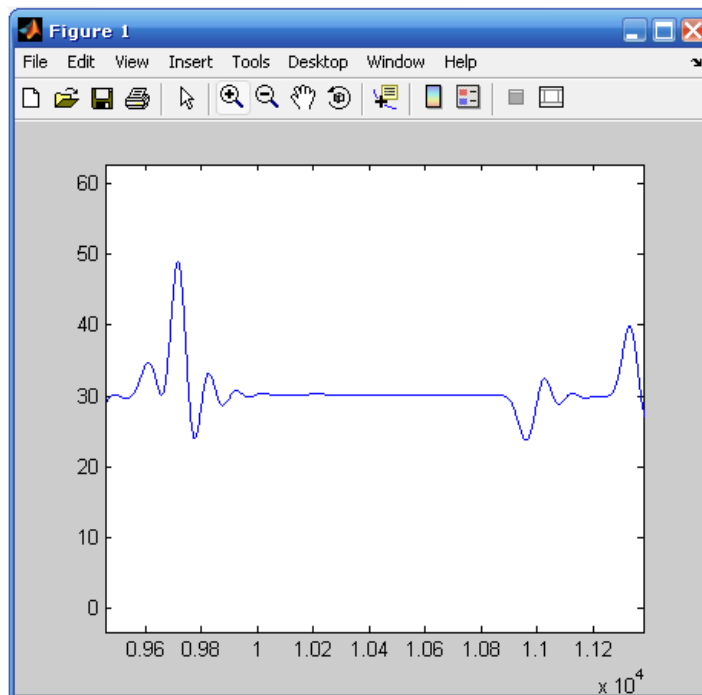


Figura 4.18. *Estimado kl de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth en los tres ciclos después de la falla.*

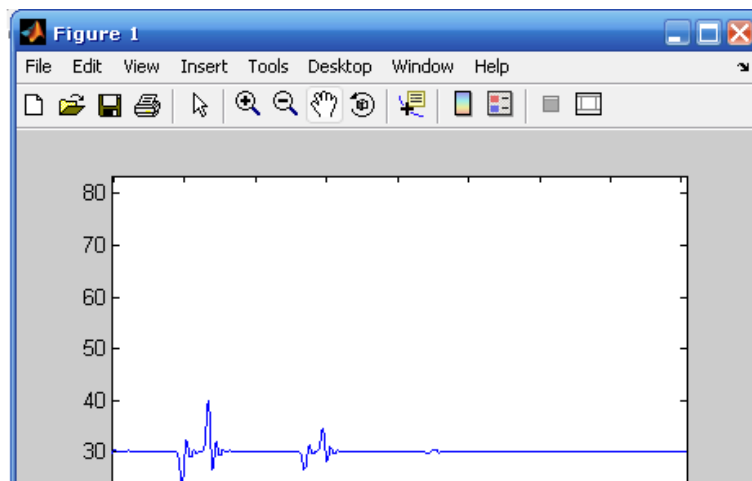


Figura 4.19. Estimado k_l de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth después de tres ciclos de ocurrida la falla.

Falla al 50 % de la longitud de la línea con filtro con una frecuencia de corte de 500 Hz. Con una falla monofásica.

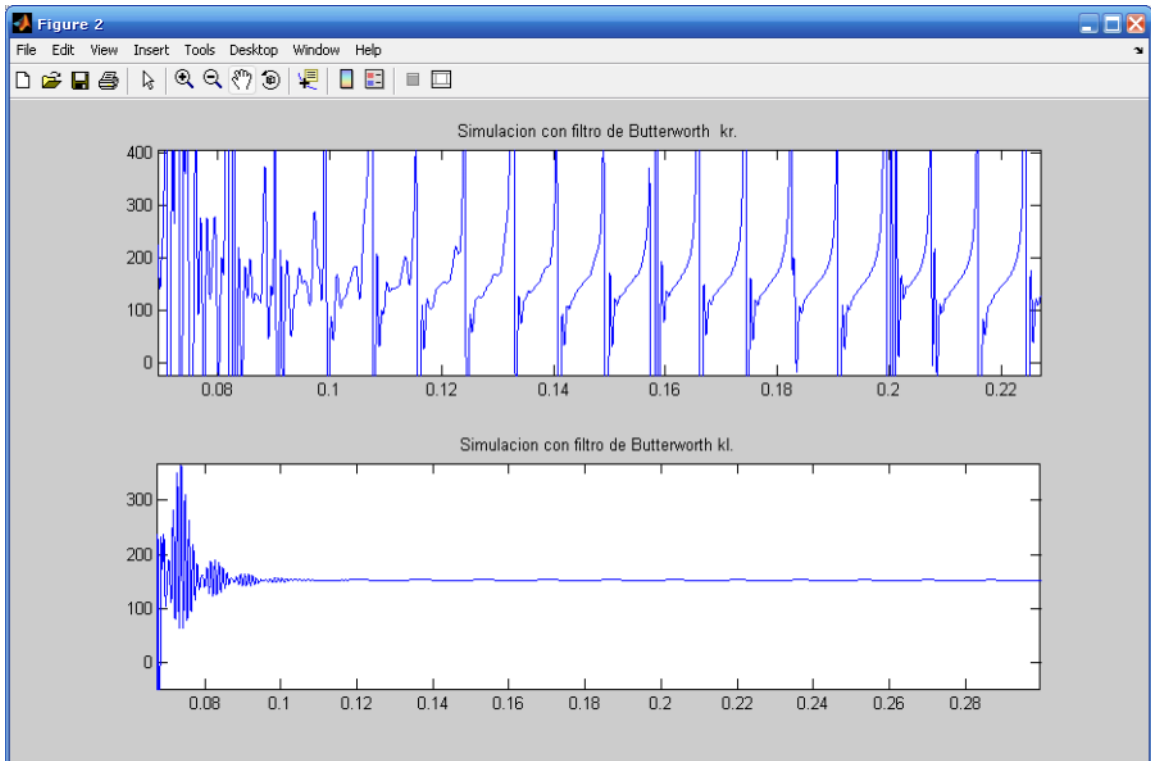


Figura 4.20. Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión filtro de Butterworth.

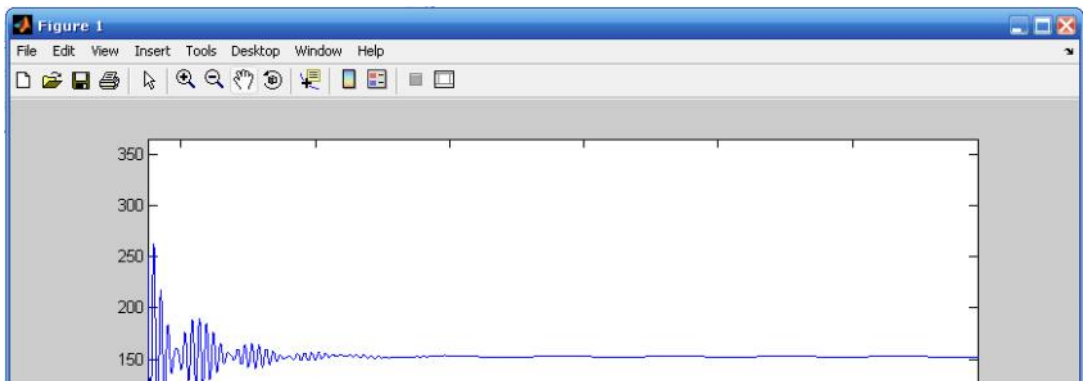


Figura 4.21. *Estimado kl de la distancia al 50% de la línea de transmisión filtro de Butterworth con menos de tres ciclos de ocurrida la falla.*

Falla al 90 % de la longitud de la línea con filtro con una frecuencia de corte de 500 Hz. Con una falla monofásica.

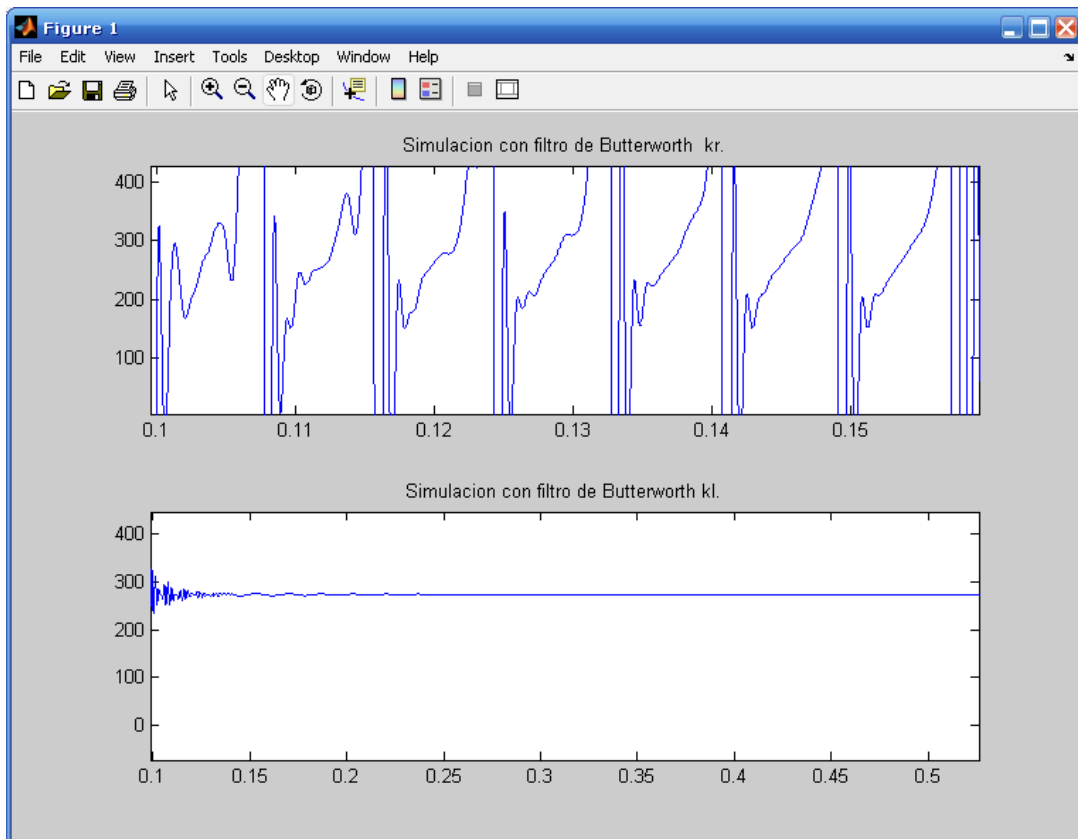


Figura 4.22. *Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión filtro de Butterworth.*

4.4.4. Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión sin carga, sin filtrado.

Para la simulación de la línea de transmisión es utilizado el mismo modelo bajo estudio, solo que la carga que alimentaba el sistema de potencia se elimina y se realizan las simulaciones para el corto circuito monofásico para las distancias del 10%, 50% y 90% de la longitud de la línea de transmisión.

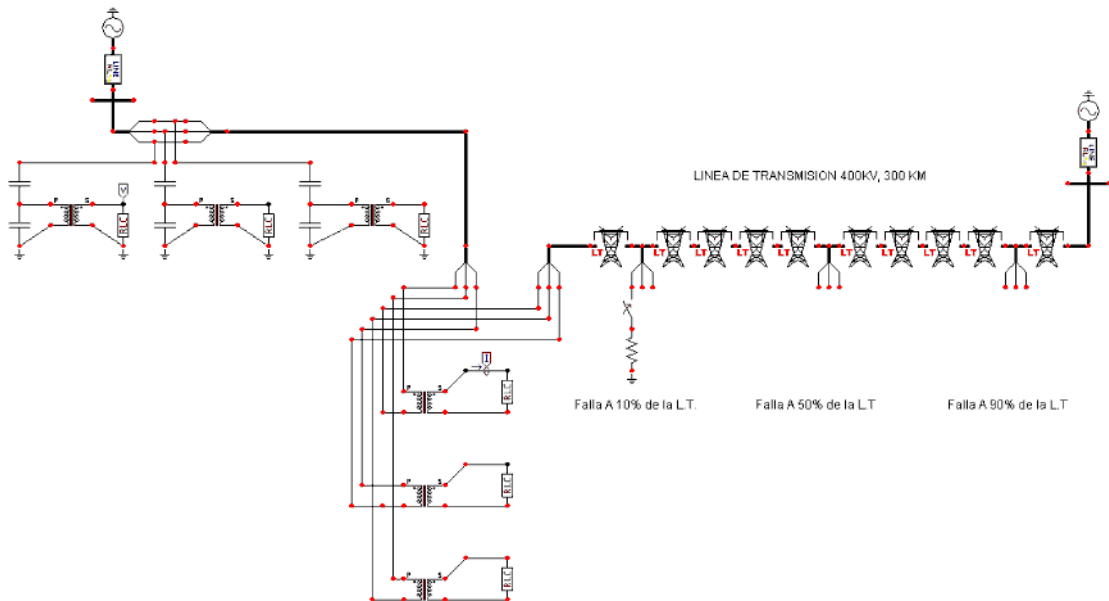


Figura 4.23. Modelo de la línea de transmisión con unidades medición de corriente y voltaje para análisis con carga.

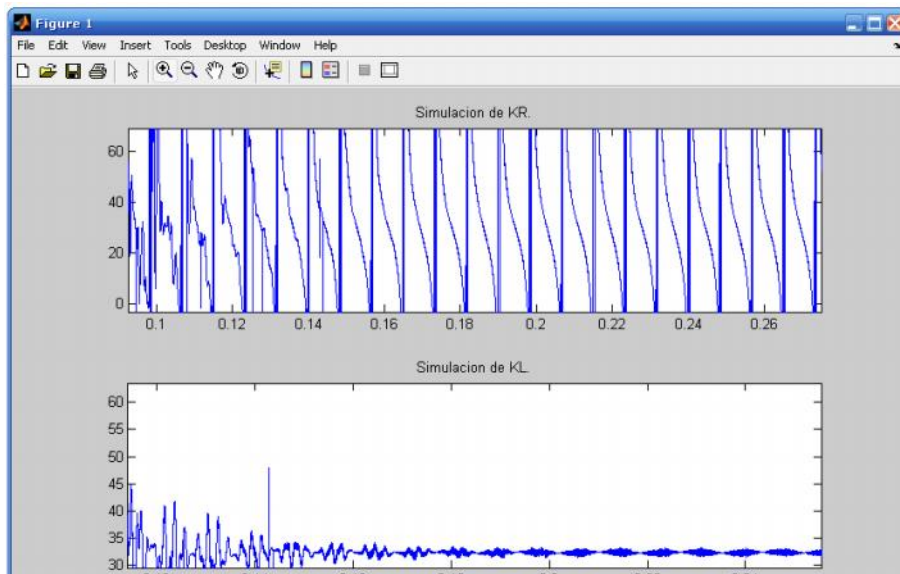


Figura 4.24. Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro.

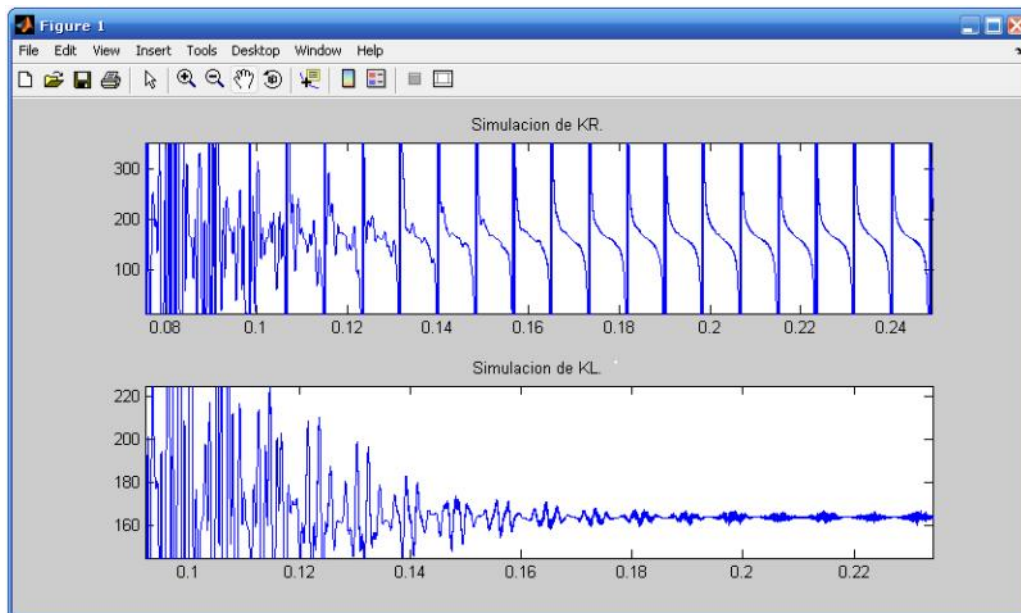


Figura 4.25. Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro.

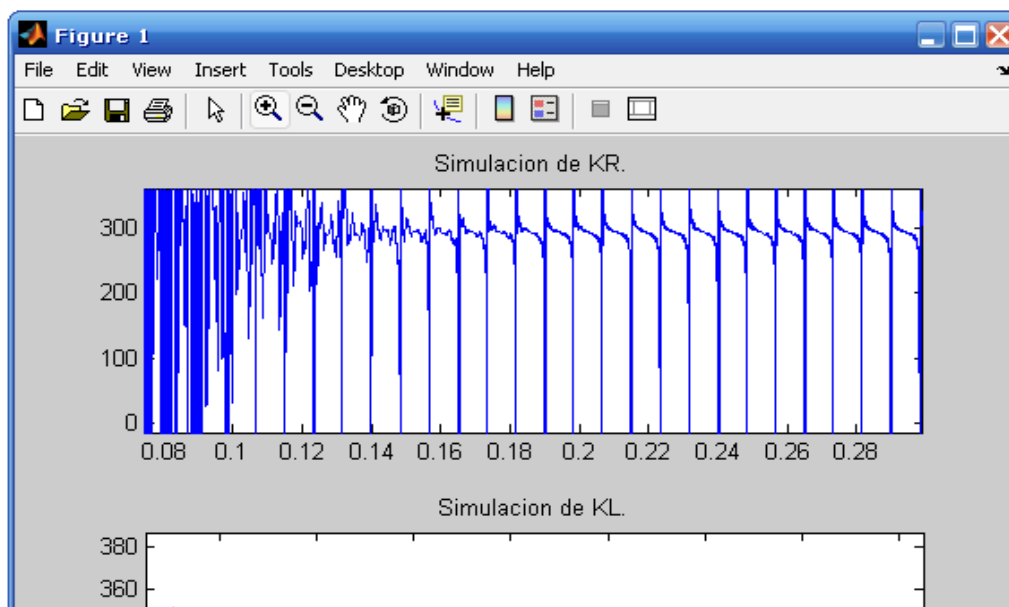


Figura 4.26. *Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro.*

4.4.5. Desarrollo del Algoritmo de la Ecuación Diferencial con una línea de transmisión sin carga con filtro de Butterworth.

Para el desarrollo del algoritmo sin carga se utiliza la misma línea de comandos en Matlab para la obtención del estimado al punto fallado así como para la obtención del filtrado del numerador y denominador para k_l y k_r .

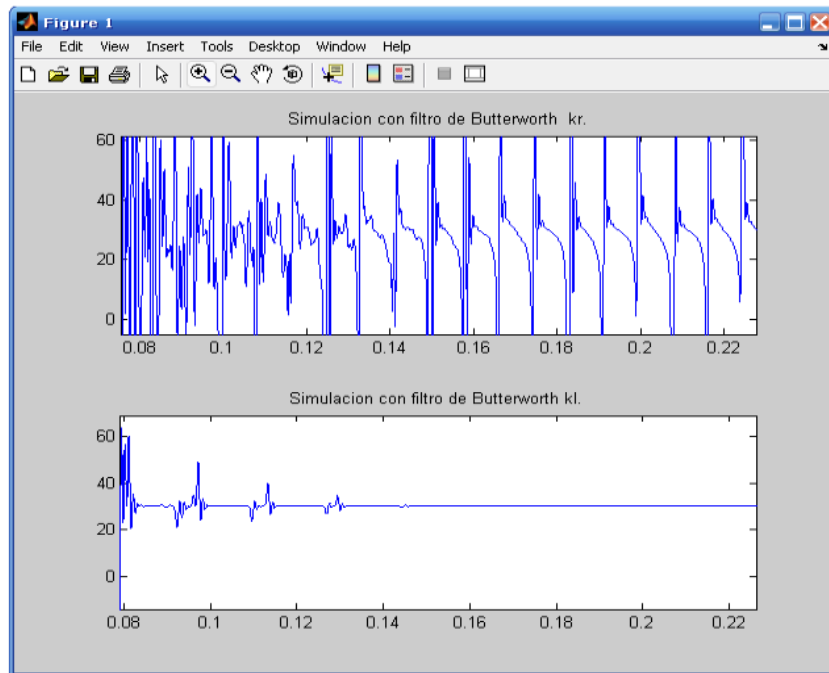


Figura 4.27. *Estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth sin carga.*

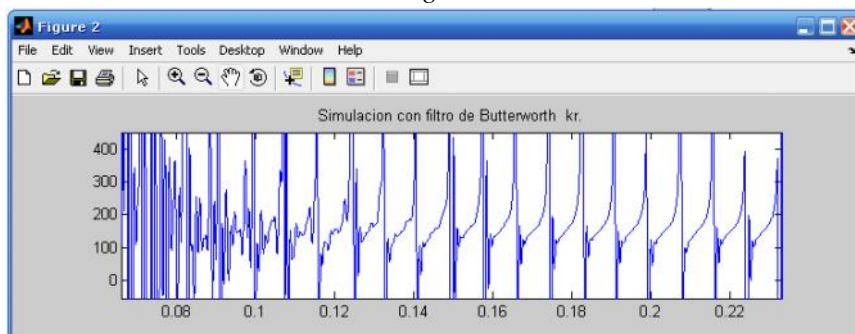


Figura 4.28. Estimado de la distancia al 50% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth

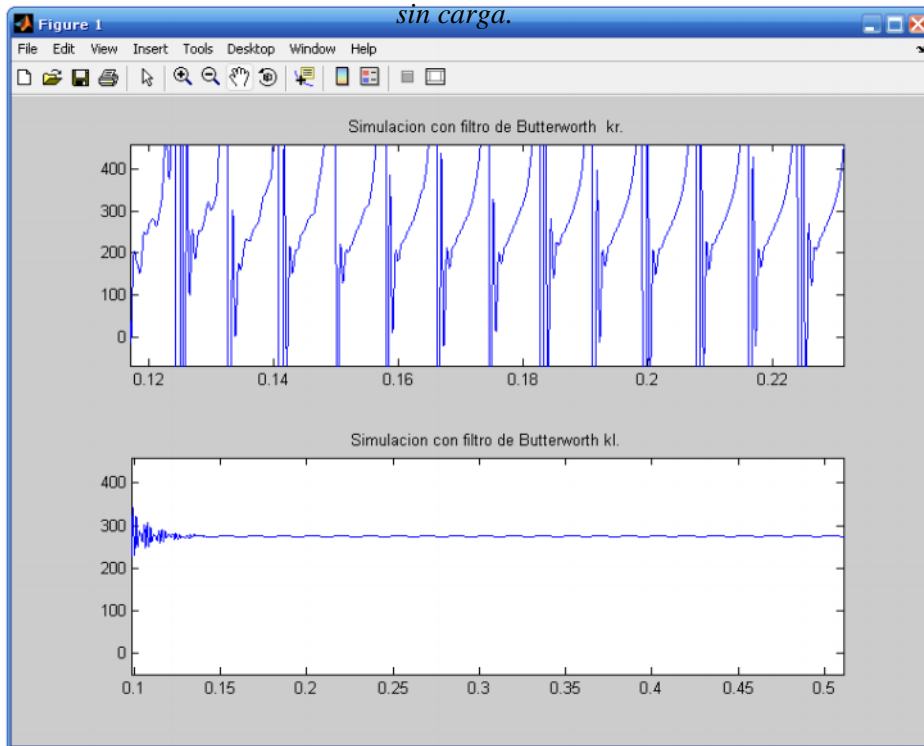


Figura 4.29. Estimado de la distancia al 90% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth sin carga.

Las graficas para el estimado al punto fallado para el sistema sin carga son obtenidas por el mismo algoritmo en Matlab para el sistema con carga. En la siguiente figura se muestra la diferencia entre la simulación con y sin filtro de Butterworth.

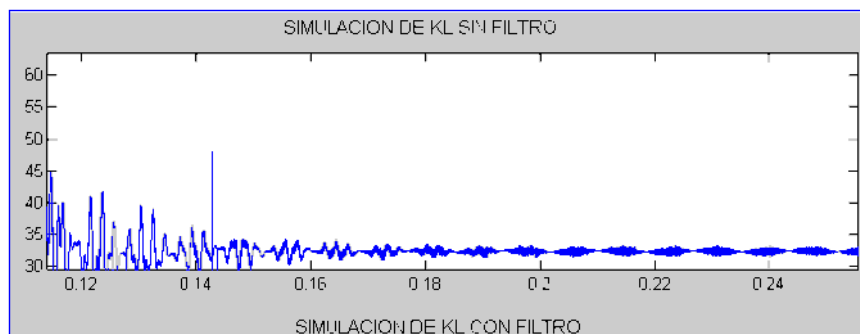


Figura 4.30. *Comparación de la simulación con y sin filtro de Butterworth.*

Análisis De Resultados

5.1. INTRODUCCION

En el capítulo anterior se observó el comportamiento del estimado al punto fallado con y sin carga, así como las ventajas que ofrece el filtrado de la señal con un filtro de Butterworth orden 5.

A continuación se analiza con detalle la distancia al punto fallado y el comportamiento característico de la respuesta al corto circuito monofásico con el uso del algoritmo de la ecuación diferencial.

5.2 ANALISIS DE LA FALLA AL 10% DE LA LINEA DE TRANSMISION SIN FILTRO DE BUTTERWORTH.

Para el estimado al punto fallado el elemento resistivo no aporta información significativa de la distancia al punto fallado. La siguiente figura muestra los 3 primeros ciclos de haber ocurrido la falla.

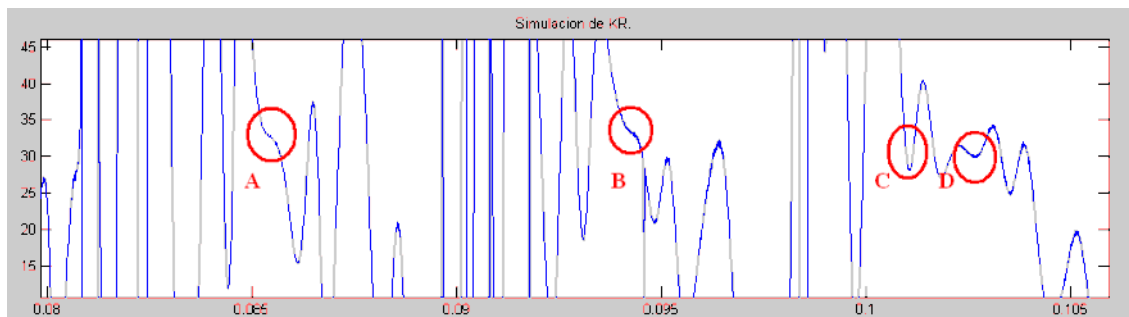


Figura 5.1. Análisis del estimado KR al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

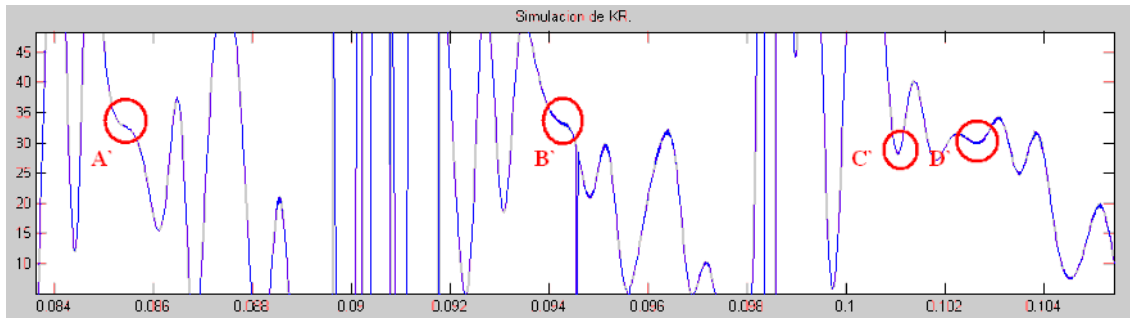


Figura 5.2. Análisis del estimado KR al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

La falla fue simulada a 30 Km. Se aprecia como la grafica del estimado al punto fallado con y sin carga tiende a mantenerse aproximadamente en 33 KM. Y como la respuesta de la magnitud y frecuencia no se altera con y sin carga. Se llama A, B, C, Y D. a los instantes del la localización de la falla con carga, y se llama A`, B`, C`, Y D`. A los instantes del la localización de la falla sin carga. El instante A es el mismo que A` al igual que $B = B`$, $C = C`$ y $D = D`$.

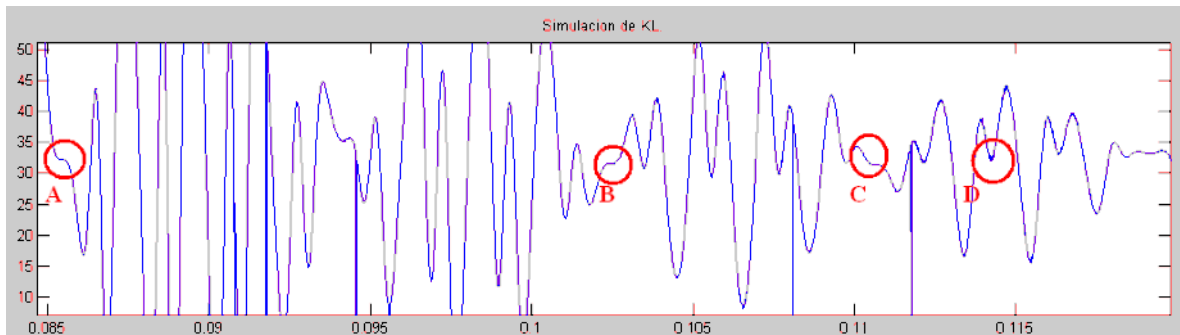


Figura 5.3. Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

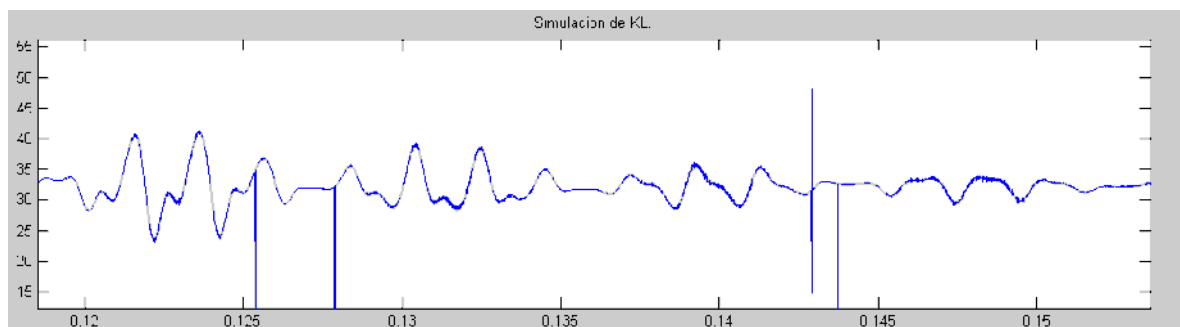


Figura 5.4. Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 6 primeros ciclos de falla.

El elemento inductivo para la falla muestra más puntos en la cual se puede apreciar la distancia al punto fallado. Aproximadamente 33 Km.

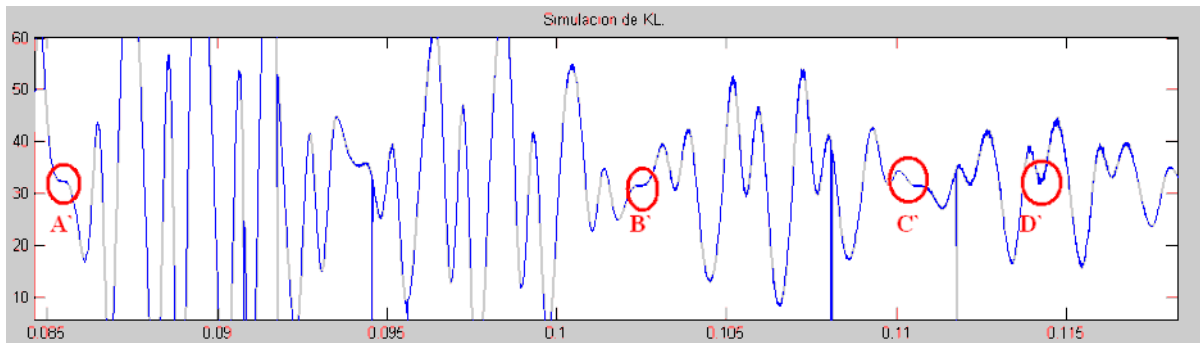


Figura 5.5. Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

Al igual que en el elemento resistivo la falla con carga y sin carga no tiene aportaciones significativas en el estimado al punto fallado.

Para la falla monofásica sin filtro en los 3 primeros ciclos aporta poca información al punto fallado, entre el tercer y sexto ciclo la información al punto fallado ya es mas clara y se puede obtener una buena aproximación al lugar de la falla.

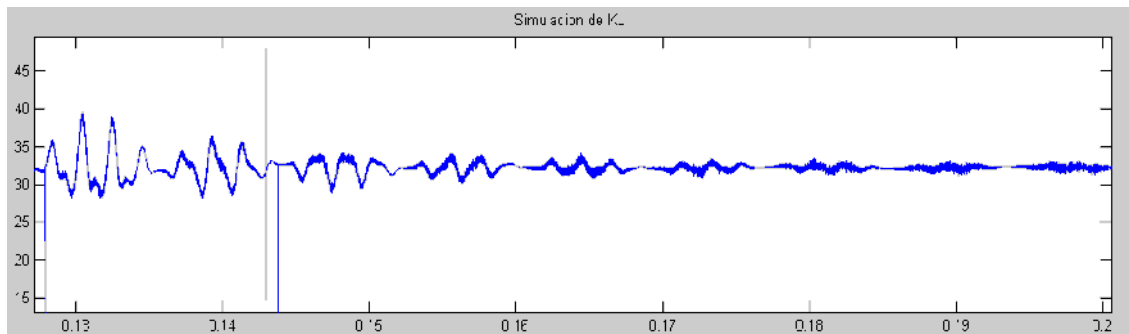


Figura 5.6. Análisis del estimado KL al 10% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 6 primeros ciclos de falla.

5.3 ANALISIS DE LA FALLA AL 50% DE LA LINEA DE TRANSMISION SIN FILTRO DE BUTTERWORTH.

Para el estimado al punto fallado en el elemento resistivo la siguiente figura muestra los 3 primeros ciclo de haber ocurrido la falla.

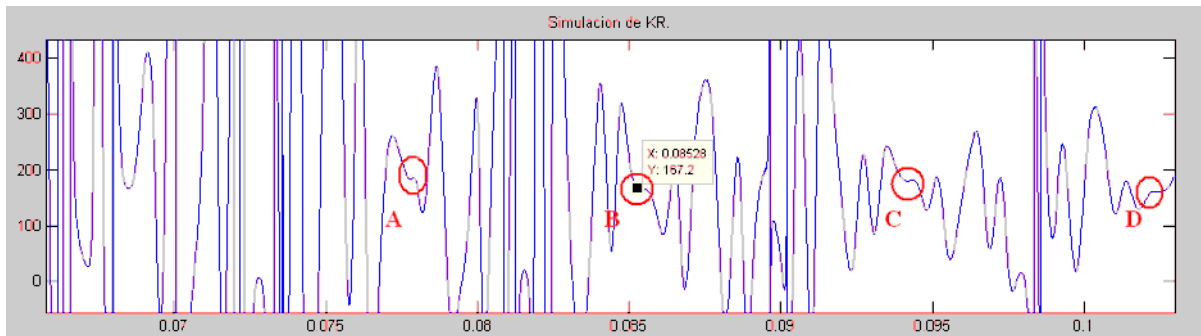


Figura 5.7. *Análisis del estimado KR al 50% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.*

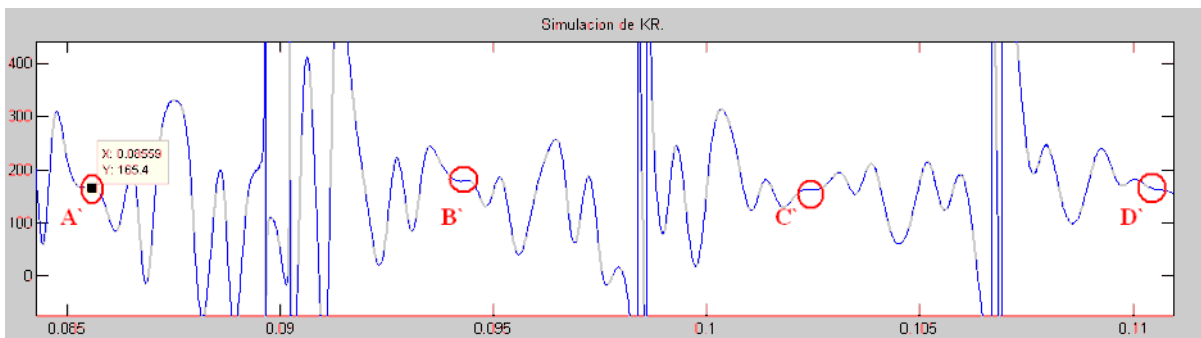


Figura 5.8. *Análisis del estimado KR al 50% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.*

Se llama A, B, C, Y D. a los instantes de la localización de la falla con carga a los instantes de la localización de la falla sin carga. A', B', C', Y D'. El instante A es el mismo que A' al igual que B = B', C = C' y D = D'. La falla esta aproximadamente a 165 Km.

Para el elemento inductivo a continuación se muestran las siguientes figuras para el estimado al punto fallado.

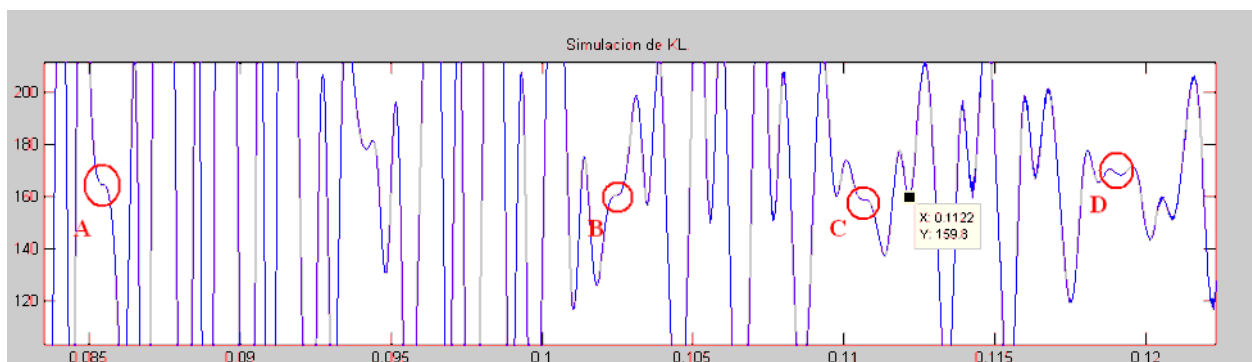


Figura 5.9. *Análisis del estimado KL al 50% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.*

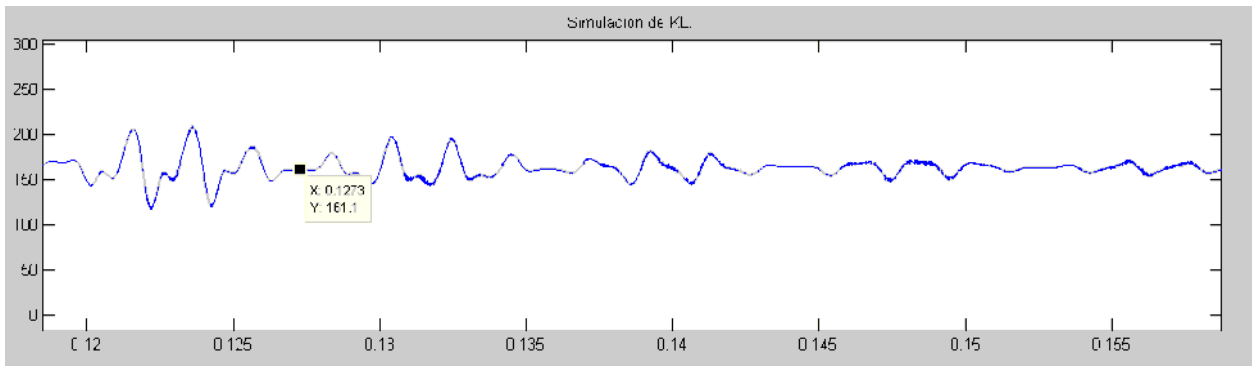


Figura 5.10. Análisis del estimado KL al 50% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 6 primeros ciclos de falla.

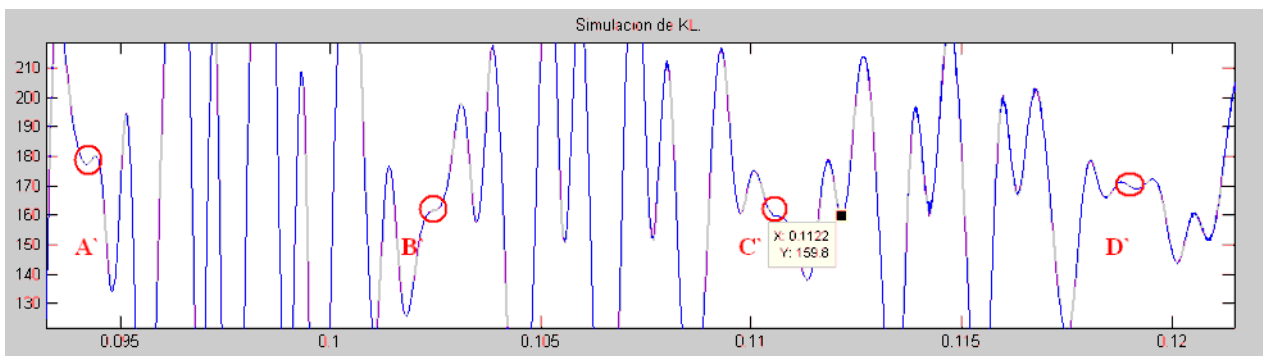


Figura 5.11. Análisis del estimado KL al 50% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

En el análisis con carga se aprecia que no hay cambio el estimado al punto fallado en el mismo instante de la falla sin carga, claramente se puede apreciar que la magnitud de la señal y la frecuencia no se afecta. La falla esta localizada a aproximadamente a 165 Km.

5.4 ANALISIS DE LA FALLA AL 90% DE LA LINEA DE TRANSMISION SIN FILTRO DE BUTTERWORTH.

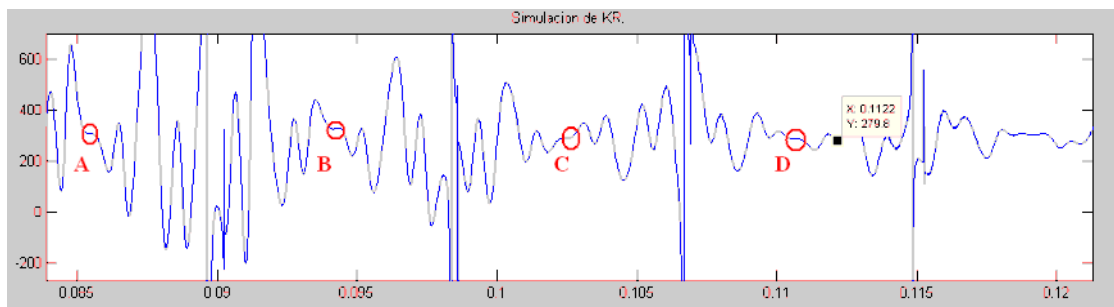


Figura 5.12. Análisis del estimado KR al 90% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

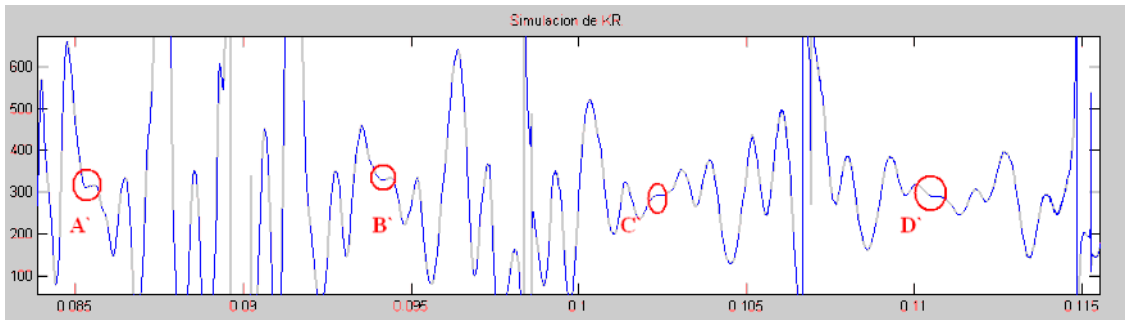


Figura 5.13. Análisis del estimado KR al 90% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

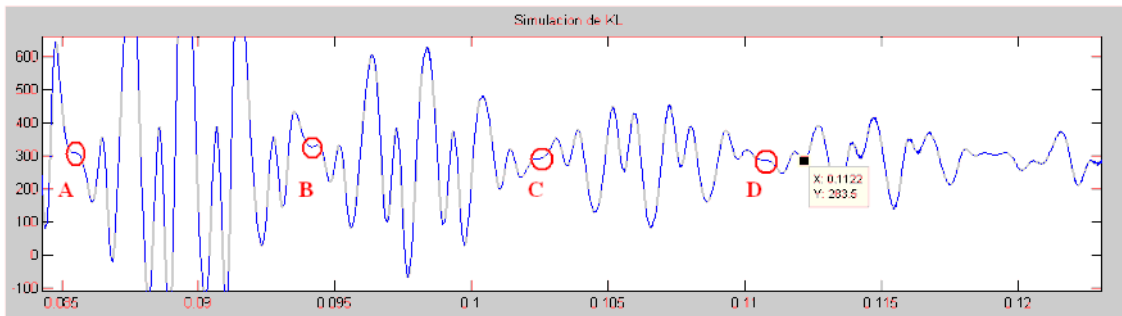


Figura 5.14. Análisis del estimado KL al 90% de la línea de transmisión con carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

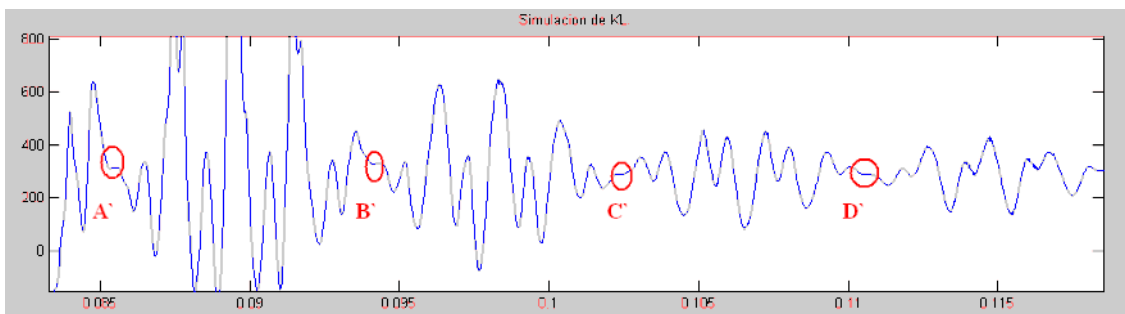


Figura 5.15. Análisis del estimado KL al 90% de la línea de transmisión sin carga y sin filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

Al igual que para la falla al 10% y 50% el estimado al punto fallado sin filtro de Butterworth con carga y sin carga para los elementos KL Y KR no tiene una buena aproximación al punto fallado ya que la distancia al punto fallado es de 300 Km. Ante una falla al 90% de la longitud total de la línea

5.5 ANALISIS DE LA FALLA AL 10% DE LA LINEA DE TRANSMISION CON DE FILTRO DE BUTTERWORTH.

De los resultados obtenidos para la falla al 10% de la línea de transmisión en la siguiente figura se puede apreciar la respuesta del algoritmo en los 3 y 6 primeros ciclos de la falla monofásica con filtro de Butterworth.

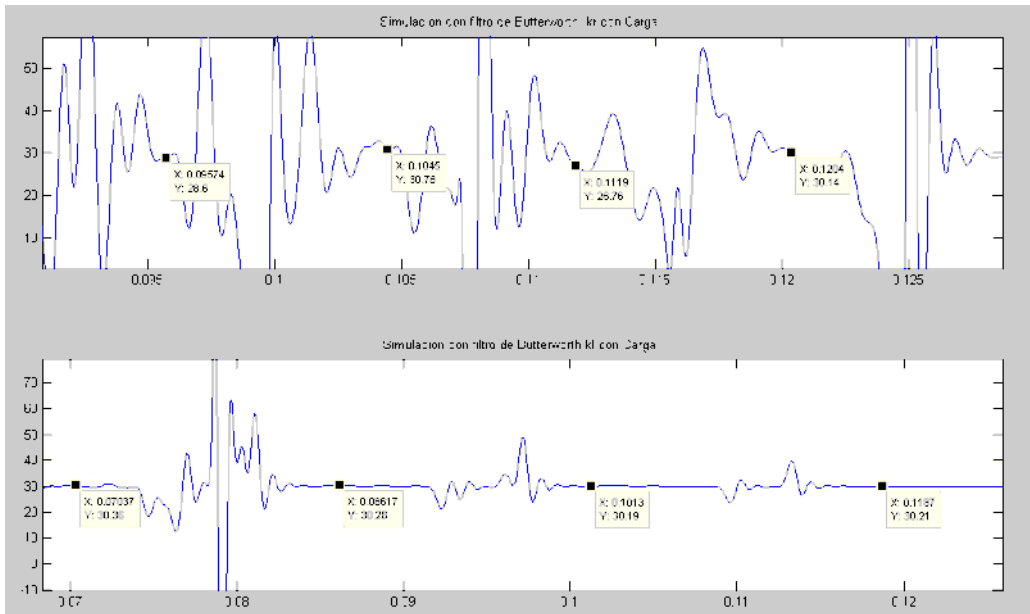


Figura 5.16. Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

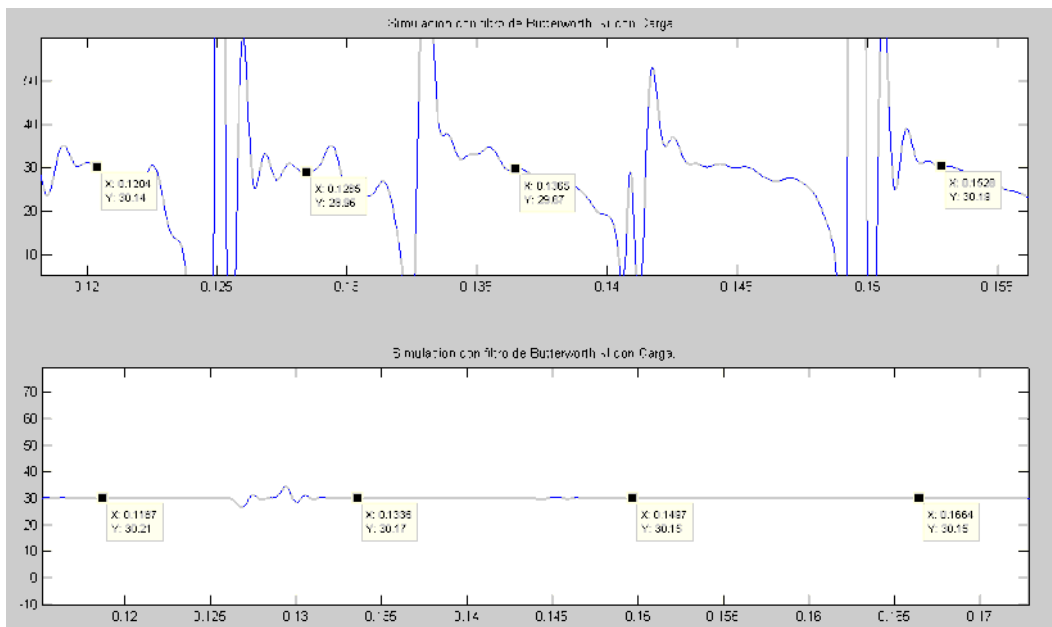


Figura 5.17. Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 primeros ciclos de falla.

Para la falla monofásica con carga y sin carga, el estimado al punto fallado es el mismo, en la ventana del elemento inductivo la información es mas confiable ya que la curva del estimado tiende a mantenerse en una distancia y en un tiempo un poco mas corto de haber ocurrido la falla.

La distancia al punto fallado en el elemento resistivo para la falla al 10% muestra una localización de 30 Km. Aunque comparando el elemento inductivo contra el elemento resistivo tiene mucho más precisión y es mucho más rápido el elemento inductivo, la distancia aproximada al punto fallado para kl es de 30 Km. y en el ciclo 4,5,y 6 se mantiene por un estimado constante de 30.15 Km.

5.6 ANALISIS DE LA FALLA AL 50% DE LA LINEA DE TRANSMISION CON DE FILTRO DE BUTTERWORTH.

La falla monofásica con carga y sin carga, el estimado al punto fallado tiene el mismo comportamiento en la simulación hecha en Matlab y Atp Draw, ya que en la ventana del elemento resistivo es mas confiable la distancia de localización de falla, pero es mas rápido que con la simulación sin filtro ya que la curva del estimado tiende a mantenerse en una distancia y la información para obtener el punto fallado se obtiene en los 3 primeros ciclos.

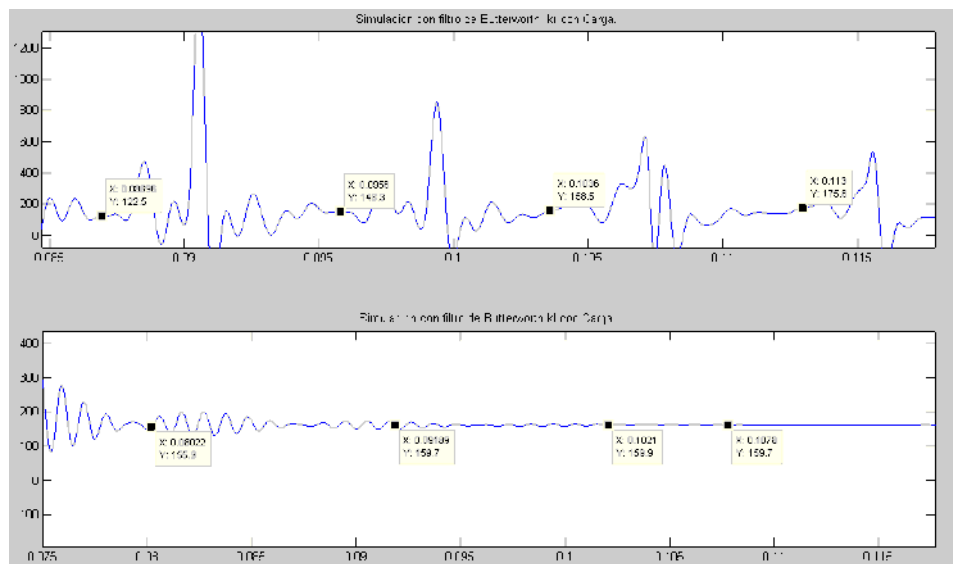


Figura 5.18. Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

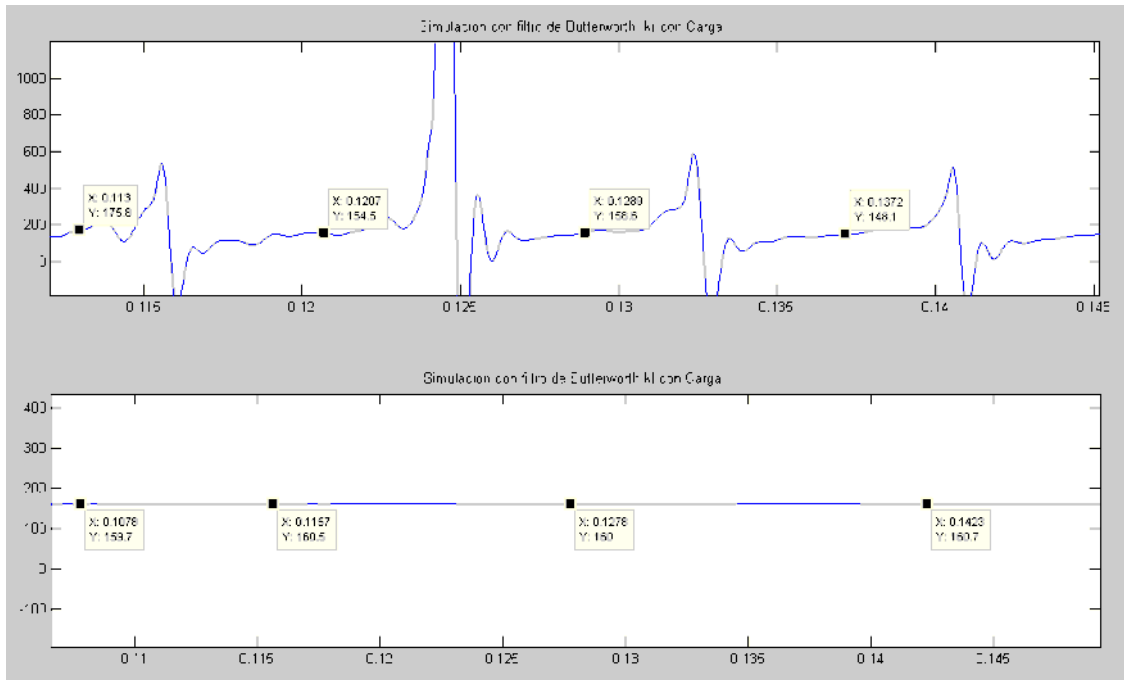


Figura 5.19. Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla.

El punto fallado en el elemento resistivo, para la falla al 50% muestra una distancia de localización de 159 Km. comparando el elemento inductivo contra el elemento resistivo tiene mucho más información y es mucho más rápido el elemento inductivo, la distancia aproximada al punto fallado para kl es de 159 Km. y en el ciclo 4, 5, y 6 se mantiene ya un estimado constante de 160 Km.

5.7 ANALISIS DE LA FALLA AL 90% DE LA LINEA DE TRANSMISION CON DE FILTRO DE BUTTERWORTH.

En la falla al 90% de la línea de transmisión, el estimado al punto fallado tiene el mismo comportamiento en la simulación hecha en Matlab y Atp Draw que la falla al 10% y 50%, ahora en la ventana del elemento resistivo muestra la distancia a la localización de falla, pero es un mas rápido que con la simulación sin filtro, la curva del estimado tiende a mantenerse en una distancia y la información para la distancia de falla.

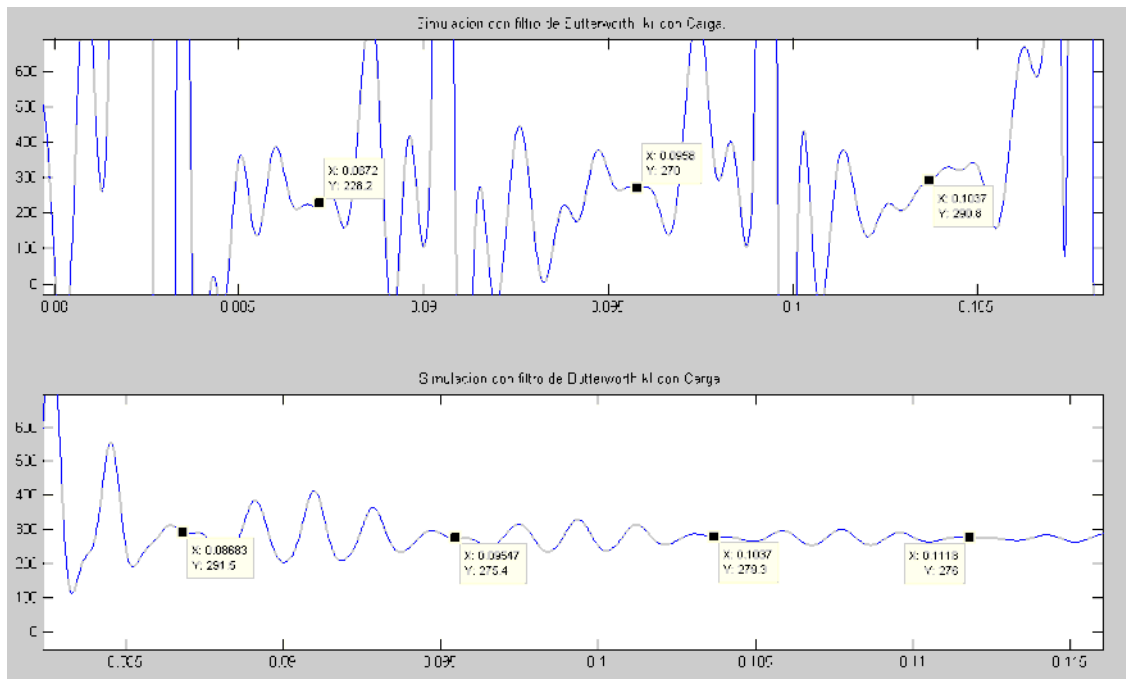


Figura 5.20. Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 3 primeros ciclos de falla.

La localización de falla en el elemento resistivo para el 90% muestra una distancia de localización aproximada de 277 Km. comparando el elemento inductivo contra el elemento resistivo tiene mucho más información y es mucho más rápido el elemento inductivo. Para la falla al 90% el algoritmo ya no es tan rápido comparado con la falla al 10% y 50%, sigue mostrando información significativa en los 3 primeros ciclos.

5.8 ANALISIS DE LA FALLA OCURRIDA EN DIFERENTES MAGNITUDES DE VOLTAJE CON DE FILTRO DE BUTTERWORTH.

En el análisis del cortocircuito para el voltaje en diferentes puntos de la senoidal, las simulaciones son realizadas a 15° , 30° , 90° , 140° , 270° , 360° . Esto para analizar la respuesta del algoritmo ante diferentes magnitudes de voltaje.

Al realizar las simulaciones con carga y sin carga no reflejan cambios en la localización de la falla, ni cambios en la frecuencia ni en la magnitud de la distancia con y sin el uso del filtro de Butterworth.

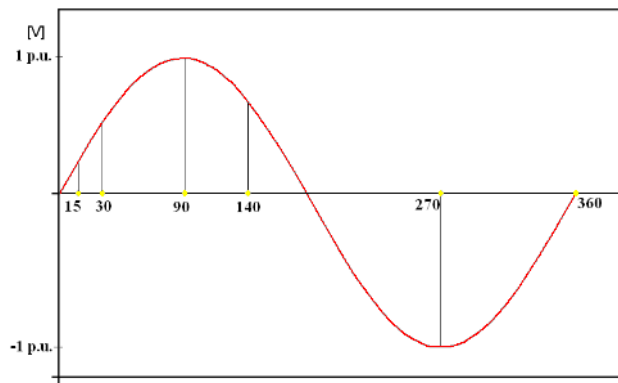


Figura 5.21. Análisis del algoritmo en diferentes instantes de la magnitud de voltaje.

Grados	p.u. V	Voltaje kv
15	0.2588	103.52
30	0.5	200
90	1	400
140	0.6427	257.08
270	-1	-400
360	0	0

Tabla 5.1. Instantes de la magnitud de voltaje.

En las simulaciones realizadas para el elemento inductivo y el elemento resistivo para los instantes a 15° , 30° , 90° , 140° , 270° el comportamiento es el mismo para estos instantes al 10%, 50% y 90% con carga y sin carga ya que la magnitud y la frecuencia del estimado al punto fallado es el mismo. Para la falla monofásica en el cruce por cero tenemos:

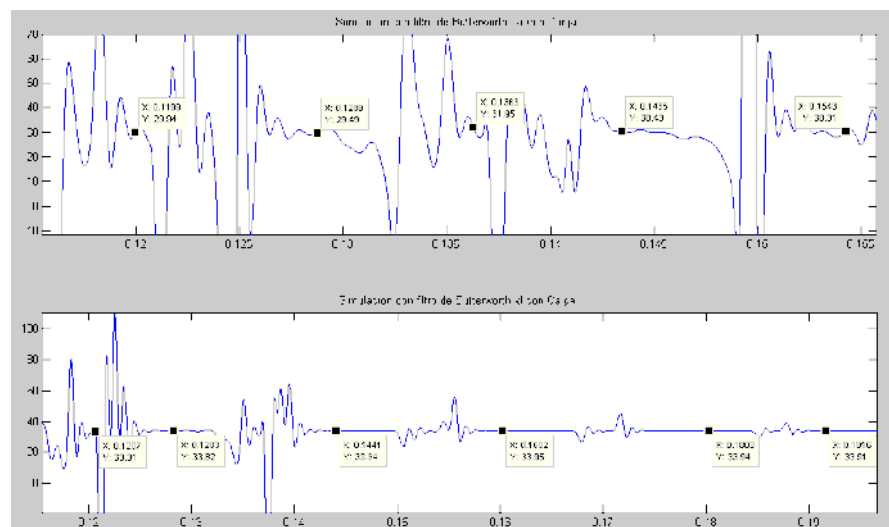


Figura 5.22. Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla en el cruce por cero.

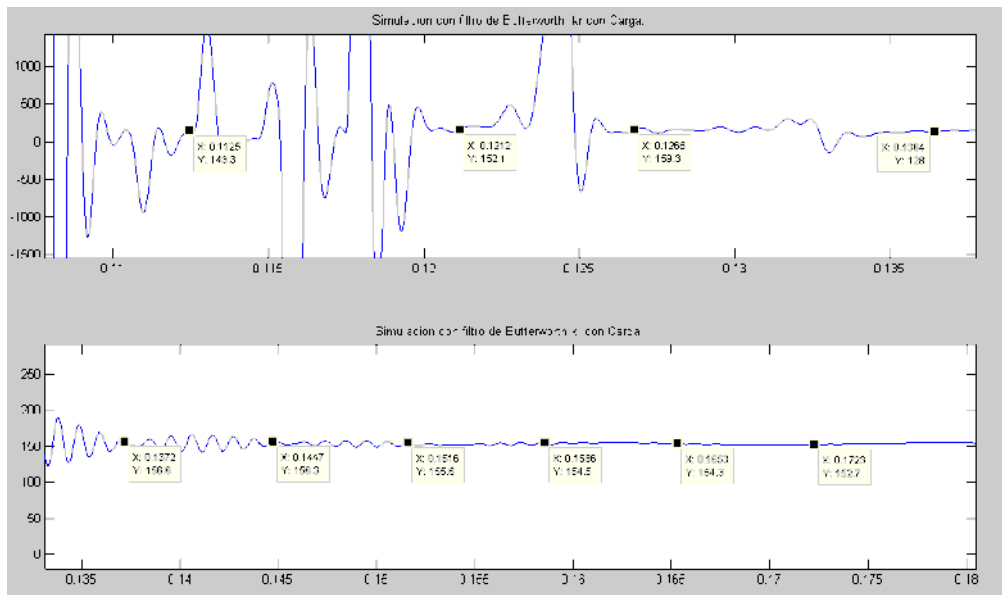


Figura 5.23. Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla en el cruce por cero.

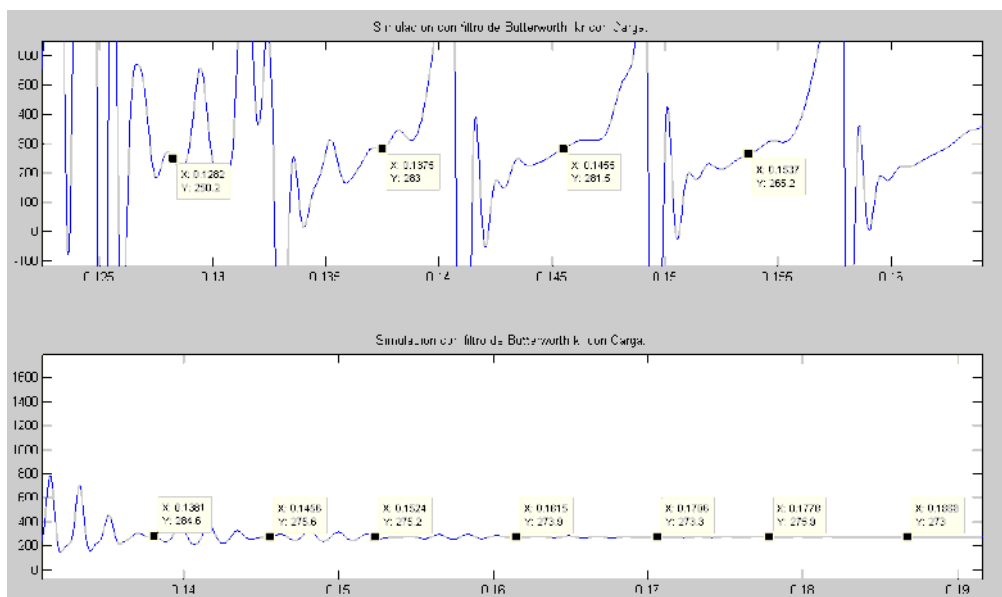


Figura 5.24. Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga y con filtro en los 6 ciclos de falla en el cruce por cero.

En la falla monofásica para el instante cero de la magnitud de voltaje, el error aumenta conforme se acerca a los transformadores de instrumento. Comportamiento inverso para los instantes diferentes de cero, entre más cerca este de los transformadores de instrumento el estimado al punto fallado disminuye.

5.9 ANALISIS DE LA FALLA AL 10% CON FILTRO DE BUTTERWORTH CON CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE FALLA.

A continuación se realizan cambios en los valores de impedancia de falla para el análisis y los límites de actuación ante una falla monofásica. Los valores de impedancia para la falla monofásica son 25 , 50 y 75 .

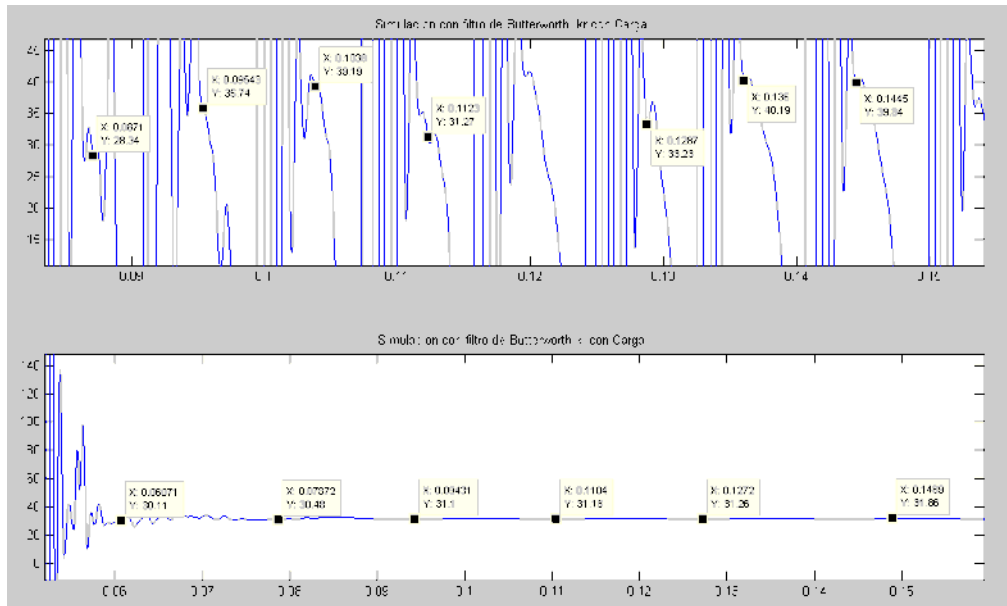


Figura 5.25. Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 25 en los 6 ciclos de falla.

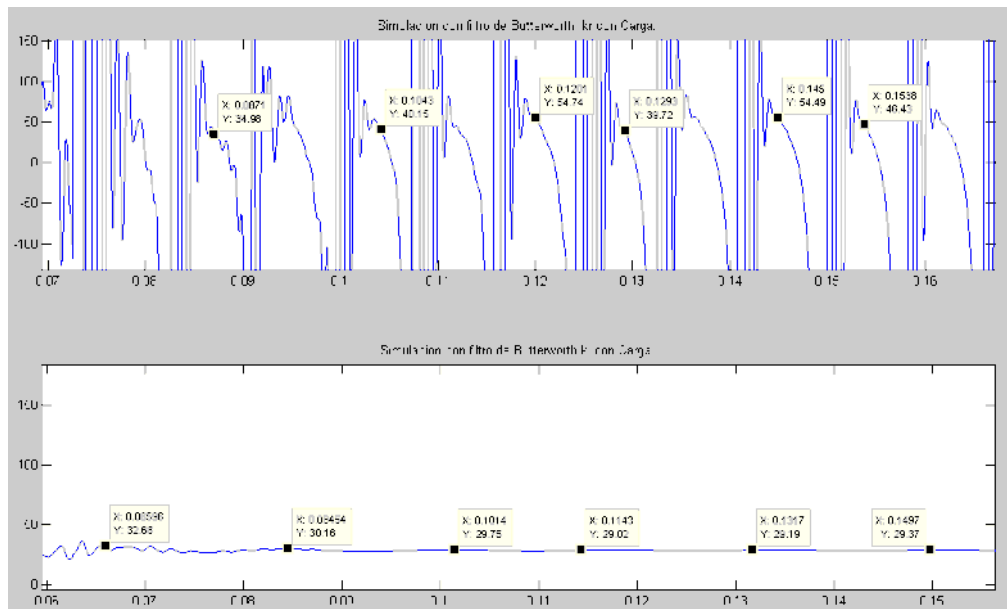


Figura 5.26. Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 50 en los 6 ciclos de falla.

Se puede apreciar en la simulación que la distancia al punto fallado con una impedancia de falla de 25 y 50 tiene una aproximación buena e incluso es más rápida para encontrar el punto fallado en el elemento inductivo, ya que el tiempo que permanece la componente de corriente directa es más corto. En los primeros 2 ciclos de ocurrida la falla ya se puede obtener la distancia de falla, es aproximadamente de 30 Km.

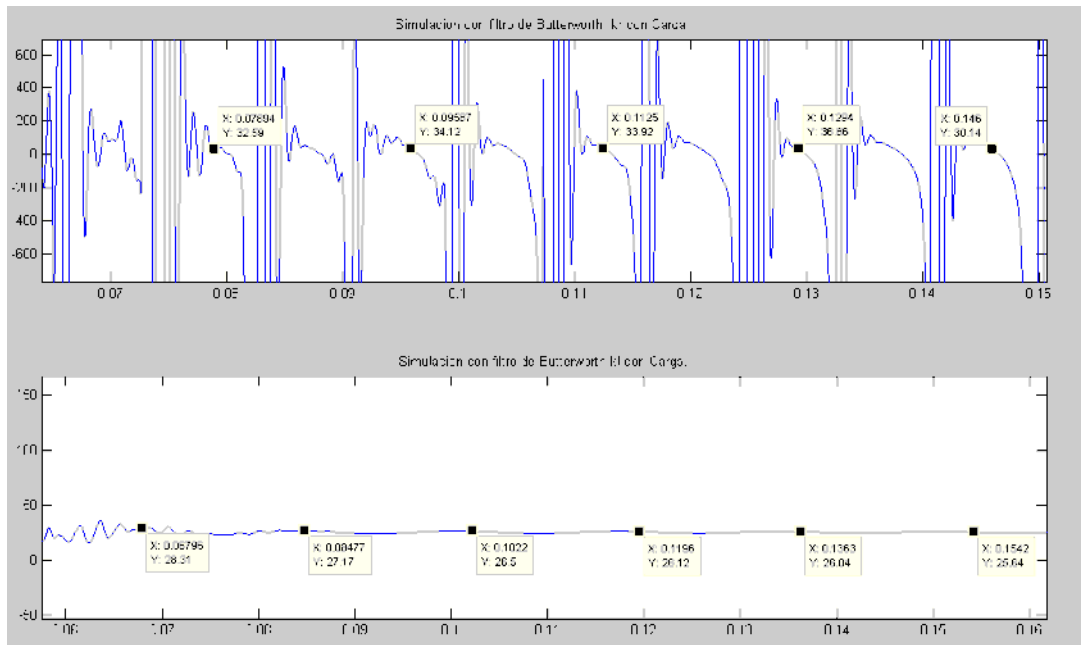


Figura 5.27. Análisis del estimado KR y KL al 10% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 75 en los 6 ciclos de falla.

La simulación realizada con una impedancia de falla de 75 muestra una respuesta rápida y un estimado no tan exacto, como en el caso de la impedancia de falla a 25 y 50. La distancia aproximada es de 26.5 Km. al igual que el caso anterior la componente de corriente directa desaparece en los primeros dos ciclos. Haciendo que el algoritmo sea más rápido.

5.10 ANALISIS DE LA FALLA AL 50% CON FILTRO DE BUTTERWORTH CON CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE FALLA.

En la siguiente ventana de resultados se realizo la simulación del cortocircuito al 50% de la línea de transmisión con una impedancia de falla 25, 50 y 75.

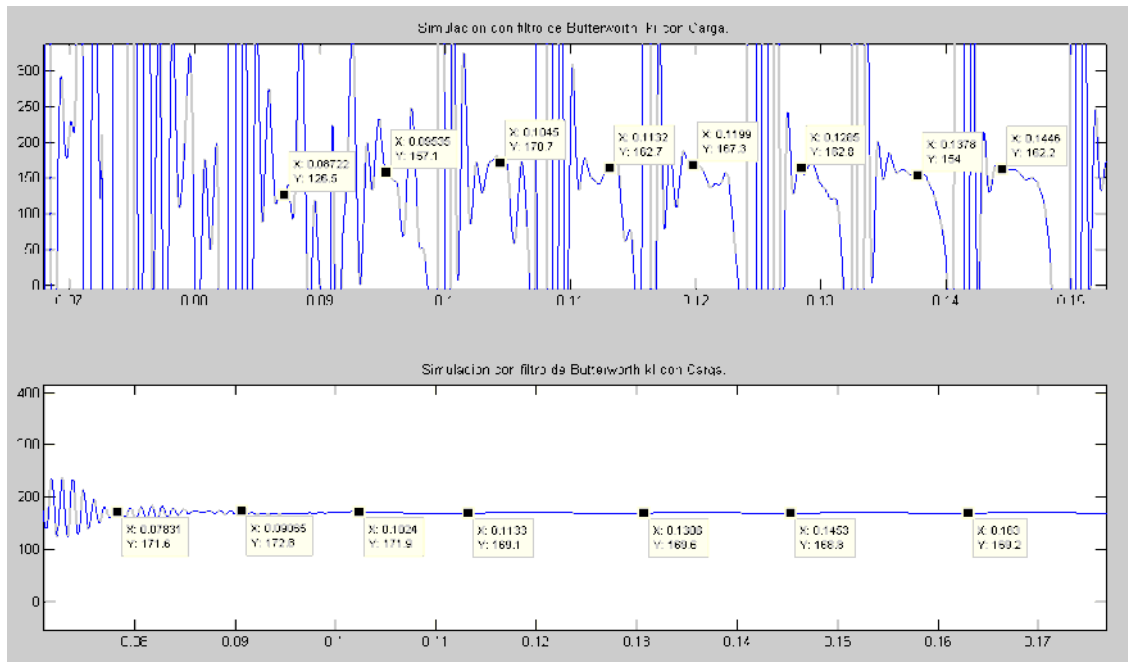


Figura 5.28. Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 25 en los 6 ciclos de falla.

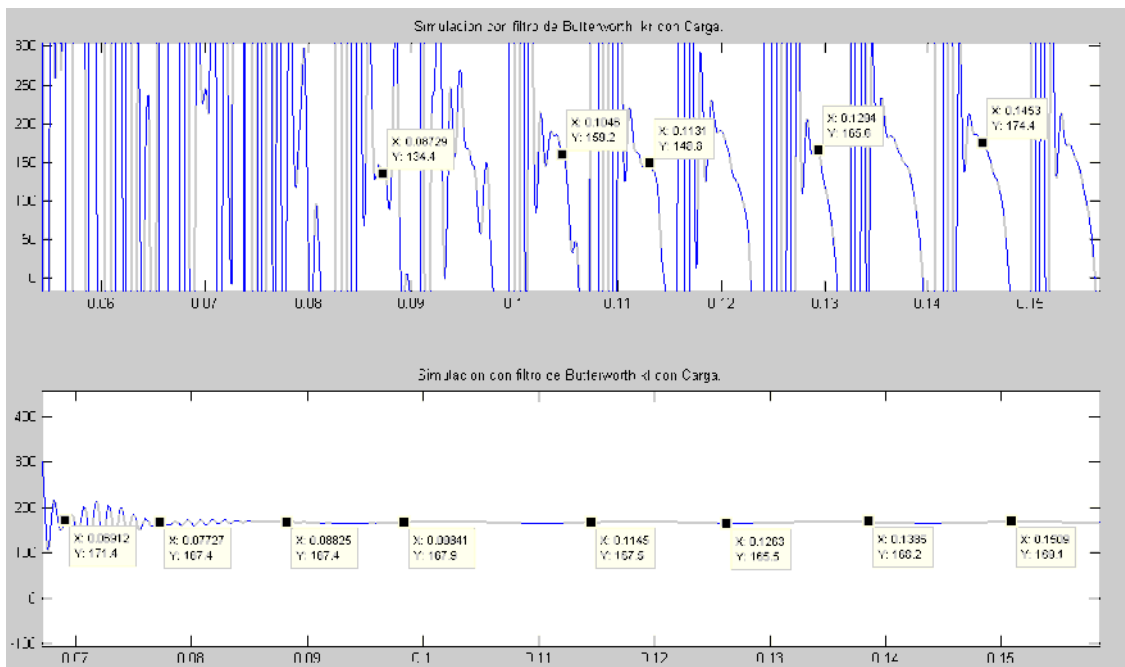


Figura 5.29. Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 50 en los 6 ciclos de falla.

Para la simulación realizada al 50%, la distancia al punto fallado con impedancia de falla de 25 y 50 la aproximación no es tan exacta en el elemento inductivo, y el

elemento resistivo sigue sin aportar información significativa, el tiempo que permanece la componente de corriente directa es más corto que los casos anteriores que existe impedancia de falla. En los primeros 2 ciclos de ocurrida la falla ya se puede obtener la distancia de falla, es aproximadamente de 166 Km.

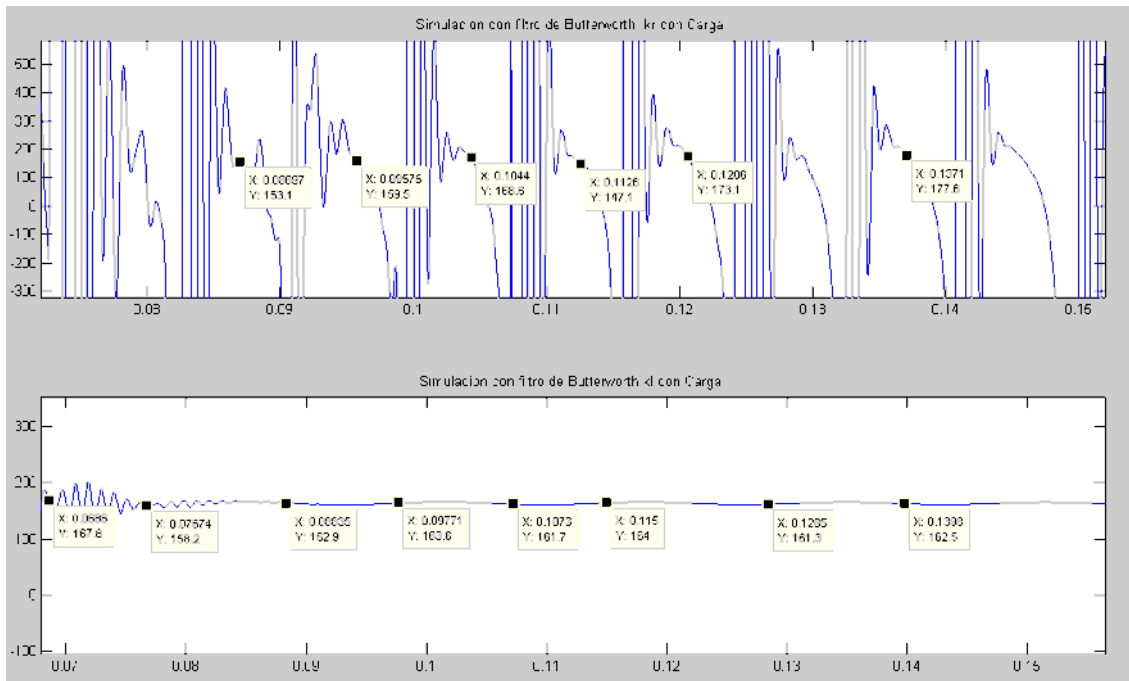


Figura 5.30. Análisis del estimado KR y KL al 50% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 75 en los 6 ciclos de falla.

Para la falla con impedancia de falla de 75 muestra una respuesta rápida pero no una buena aproximación al punto fallado. La distancia aproximada de falla es de 163 Km.

5.11 ANALISIS DE LA FALLA AL 90% CON FILTRO DE BUTTERWORTH CON CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE FALLA.

A continuación se realizan cambios en los valores de impedancia de falla para el análisis y los límites de actuación ante una falla monofásica al 90% de la línea. Los valores de impedancia para la falla monofásica son 25 , 50 y 75 .

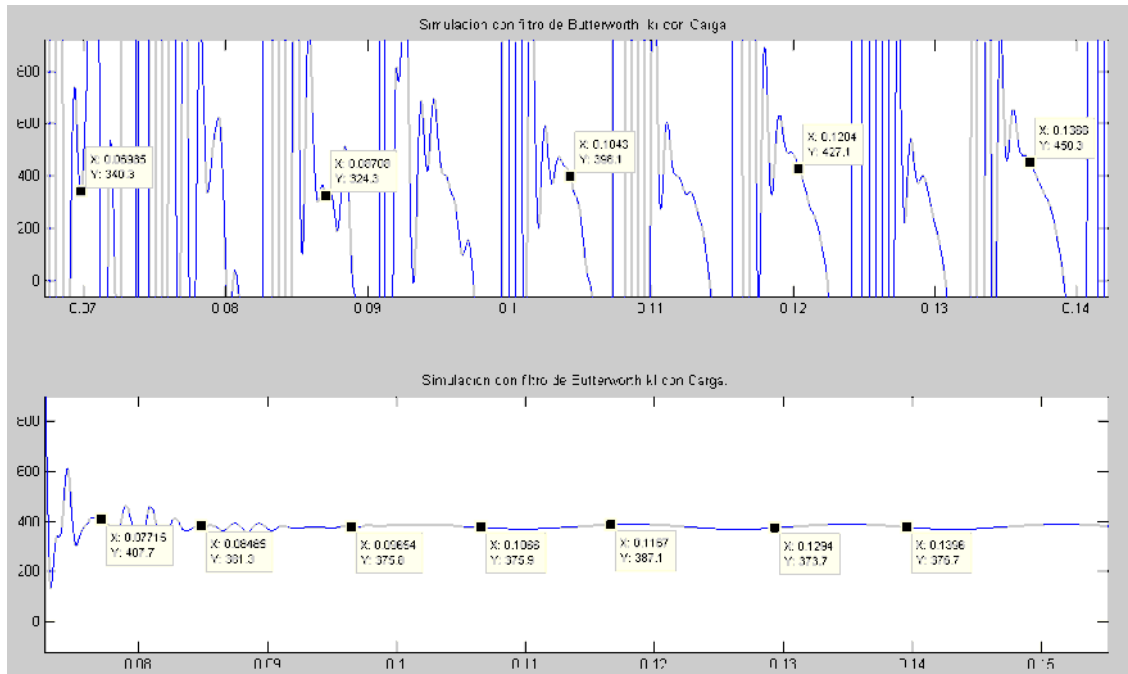


Figura 5.31. Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 25 en los 6 ciclos de falla.

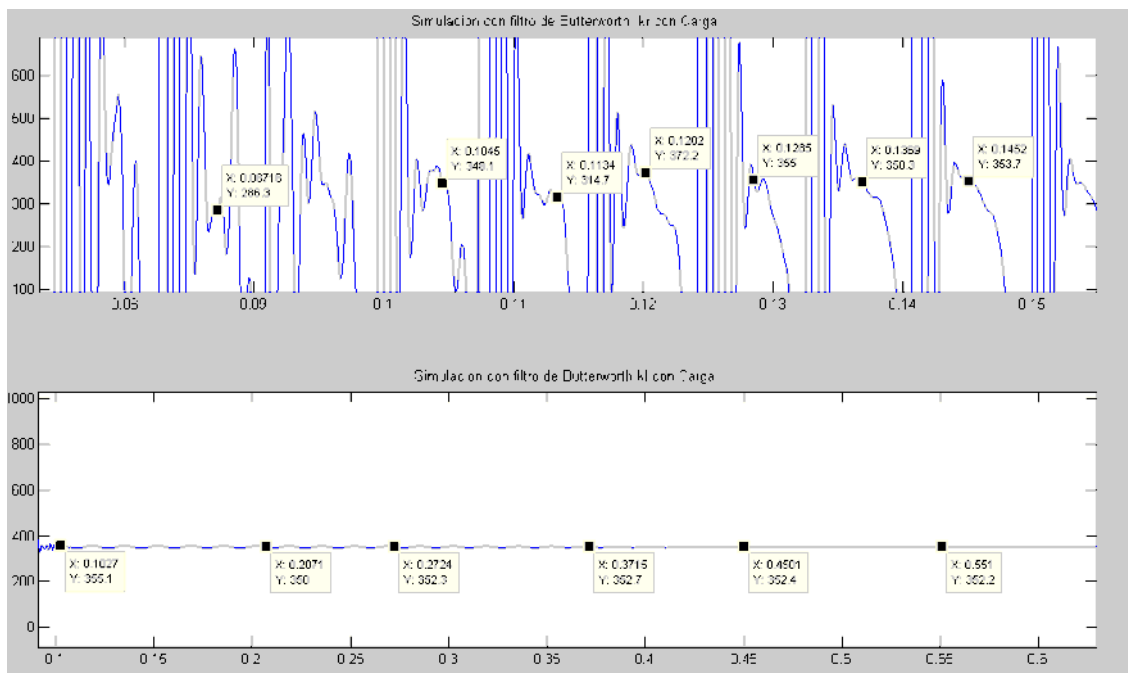


Figura 5.32. Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 50 en los 6 ciclos de falla.

Para la simulación realizada al 90%, la distancia al punto fallado con impedancia de falla de 25 y 50 la aproximación no es buena y no sirve, la información que aporta tiene

un error grande. El tiempo que permanece la componente de corriente directa es más corto que los casos anteriores que existe impedancia de falla. En los primeros 2 ciclos de ocurrida la falla ya se puede obtener la distancia de falla, es aproximadamente de 350 Km.

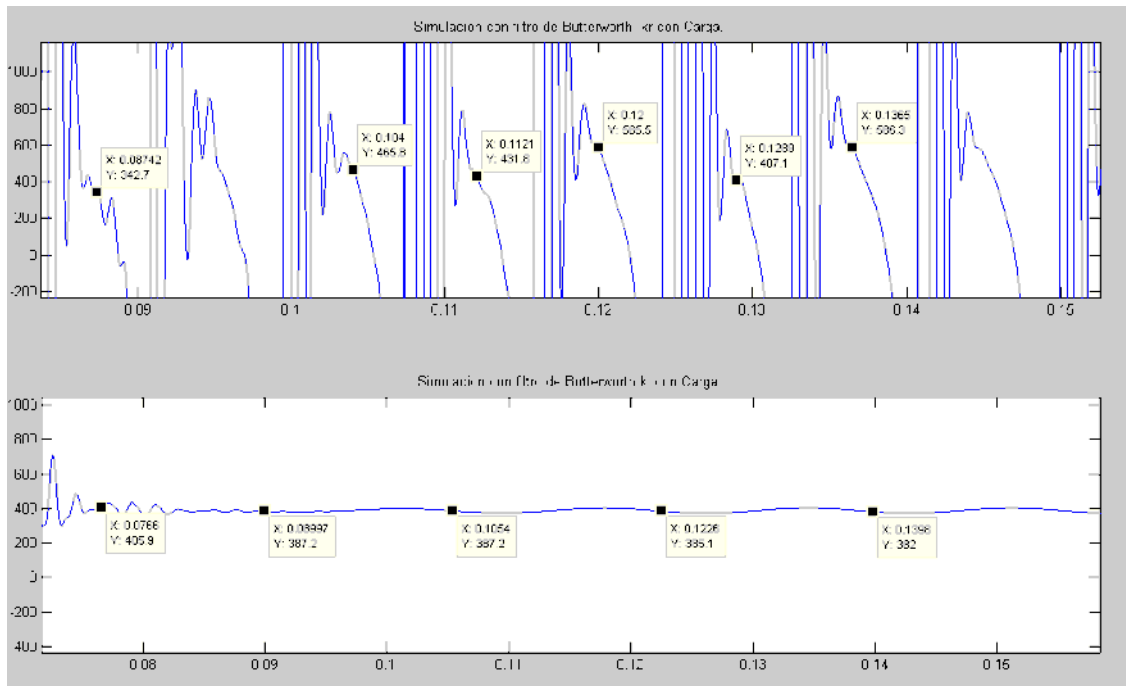


Figura 5.33. Análisis del estimado KR y KL al 90% de la línea de transmisión con carga, filtro de Butterworth e impedancia de 75 en los 6 ciclos de falla.

En la falla monofásica al 90% con una impedancia de falla de 75 el error aumenta, esto con referencia con la impedancia de 25 y 50 . El estimado al punto fallado tiene mas error que cualquiera de los casos anteriores la única característica es que conserva su rapidez y que la componente de corriente directa desaparece en los primeros 2 ciclos.

5.12 APERTURA DE INTERRUPTORES DE LA LINEA DE TRANSMISION Y LOCALIZACION DEL ESTIMADO AL PUNTO FALLADO.

A continuación se realiza el análisis del relevador desde el momento de decisión de disparo y el tiempo en el cual se realiza el clareo de la falla, así como las zonas de operación del relevador. [15]

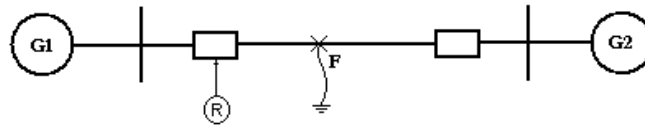


Figura 5.34. *Falla en el sistema de potencia bajo estudio.*

Tiempo de apertura del interruptor de 3 ciclos. [16]	0.032 seg.
Tiempo de operación del relevador	<u>0.007 seg.</u>
Total	0.039 seg.

Para la apertura del interruptor en el sistema de potencia la falla es simulada en 0.05 seg., el tiempo de apertura es de 0.039 seg.

La rápida respuesta y selección de la zona de protección facilita la pronta restauración del sistema. La figura 5.35 muestra la distribución de las zonas de operación del relevador para la línea de transmisión en estudio.

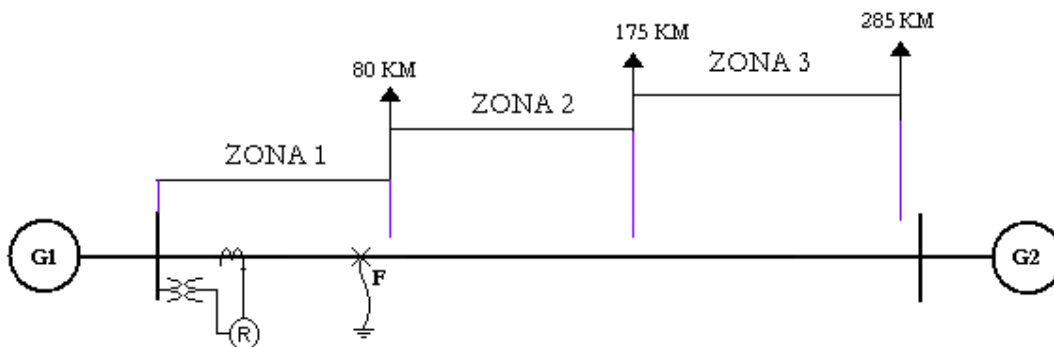


Figura 5.35. *Zonas de operación del relevador en línea de transmisión bajo estudio.*

La figura 5.36 muestra el código para la obtención de las zonas de operación en el software Matlab. [18]

```

Command Window
>> figure
title('Caracteristica de Impedancia')
xlabel('R')
ylabel('X')
grid
hold on
t = 0:pi/20:2*pi;
[x,y] = meshgrid(t);
plot(r1+z*sin(t),x1+z*cos(t),'g') %Delimitacion de la zona 1
hold on
plot(r2+z2*sin(t),x2+z2*cos(t),'y')%Delimitacion de la zona 2
hold on
plot((r3+z3*sin(t),x3+z3*cos(t),'m')%Delimitacion de la zona 3
    
```

Figura 5.36. Código fuente para delimitación de las zonas de operación del relevador.

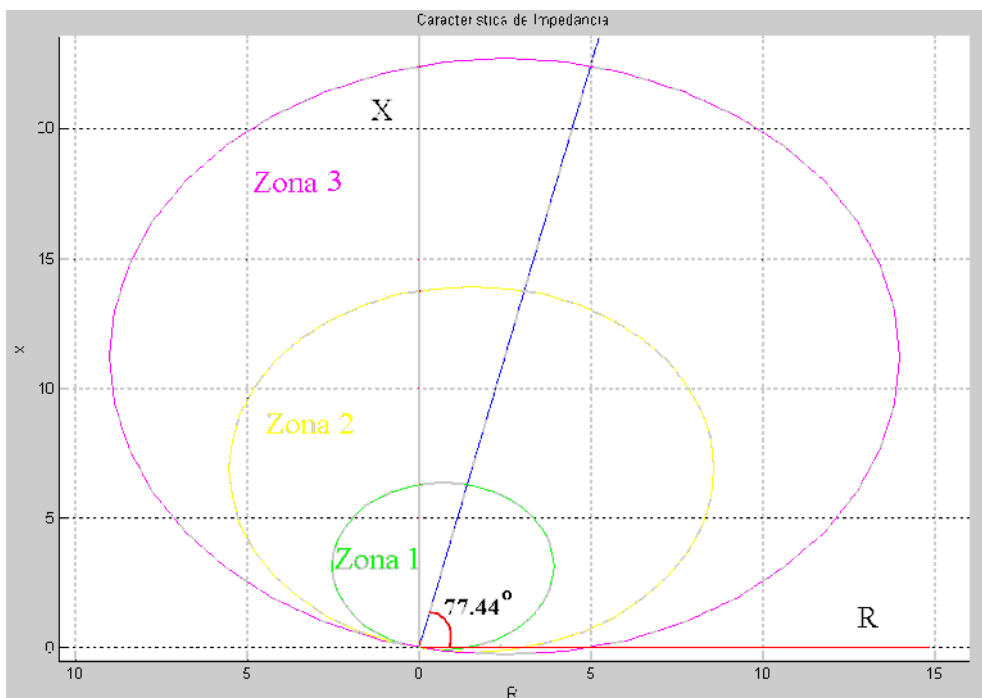
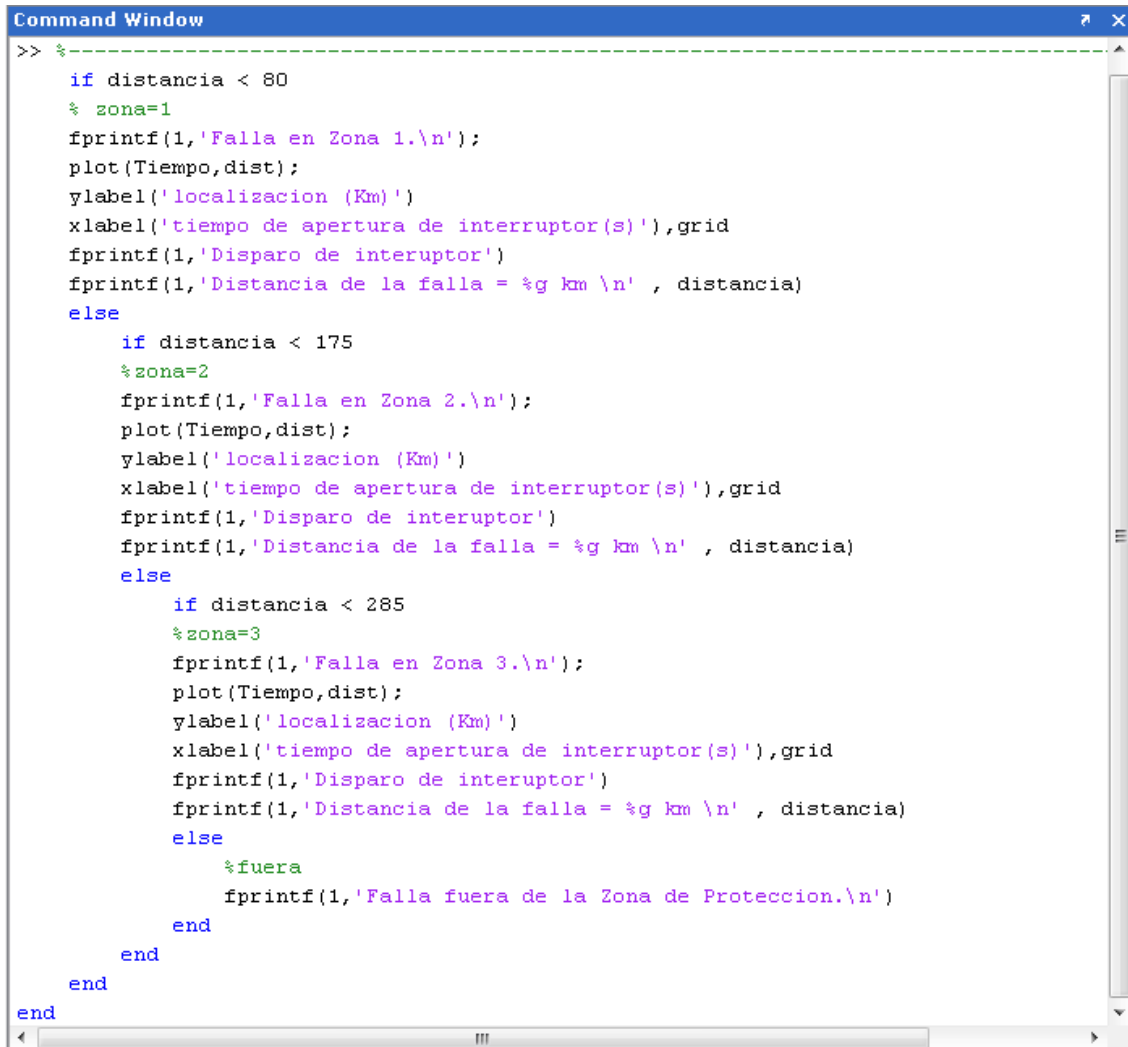


Figura 5.37. Diagrama R-X de las zonas de operación del relevador de impedancia en línea de transmisión bajo estudio.

La localización de la falla, la decisión de disparo están en función de la rapidez con la que se detecto, el algoritmo detecta la falla y localiza la zona en la cual ocurrió, en la

siguiente línea de comandos, figura 5.38, [17] se establece los valores de ajuste para las zonas de protección. [19]



```

Command Window
>> %-----
    if distancia < 80
        % zona=1
        fprintf(1,'Falla en Zona 1.\n');
        plot(Tiempo,dist);
        ylabel('localizacion (Km)')
        xlabel('tiempo de apertura de interruptor(s)'),grid
        fprintf(1,'Disparo de interruptor')
        fprintf(1,'Distancia de la falla = %g km \n' , distancia)
    else
        if distancia < 175
            %zona=2
            fprintf(1,'Falla en Zona 2.\n');
            plot(Tiempo,dist);
            ylabel('localizacion (Km)')
            xlabel('tiempo de apertura de interruptor(s)'),grid
            fprintf(1,'Disparo de interruptor')
            fprintf(1,'Distancia de la falla = %g km \n' , distancia)
        else
            if distancia < 285
                %zona=3
                fprintf(1,'Falla en Zona 3.\n');
                plot(Tiempo,dist);
                ylabel('localizacion (Km)')
                xlabel('tiempo de apertura de interruptor(s)'),grid
                fprintf(1,'Disparo de interruptor')
                fprintf(1,'Distancia de la falla = %g km \n' , distancia)
            else
                %fuera
                fprintf(1,'Falla fuera de la Zona de Proteccion.\n')
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

Figura 5.38. Código fuente para zonas de operación del relevador.

Es importante conocer la característica y tiempo de operación del interruptor desde la aparición de la falla hasta el momento en la que fue clareada.

En la figura 5.39 se muestra la como se hace la comparación con las distancias de referencia, para obtener la zona en la que ocurrió el disturbio.

En el diagrama se muestra como es el proceso de obtención del estimado al punto fallado, el primer paso es la obtención de las graficas de corriente y voltaje de la simulación del sistema de potencia en AtpDraw para convertir las graficas en extensión .pl4 a .mat de esta manera realizar la simulación del algoritmo en Matlab, entonces al ocurrir la falla, el algoritmo compara contra la referencia para la operación del relevador, de no cumplir con la condición de cortocircuito dentro de la zona de operación se muestra el mensaje de sistema en condiciones normales, si el algoritmo detecta la falla empieza a comparar contra las zonas de ajuste para posteriormente mostrar gráficamente y numéricamente el estimado al punto fallado junto con la zona de operación donde opero el relevador.

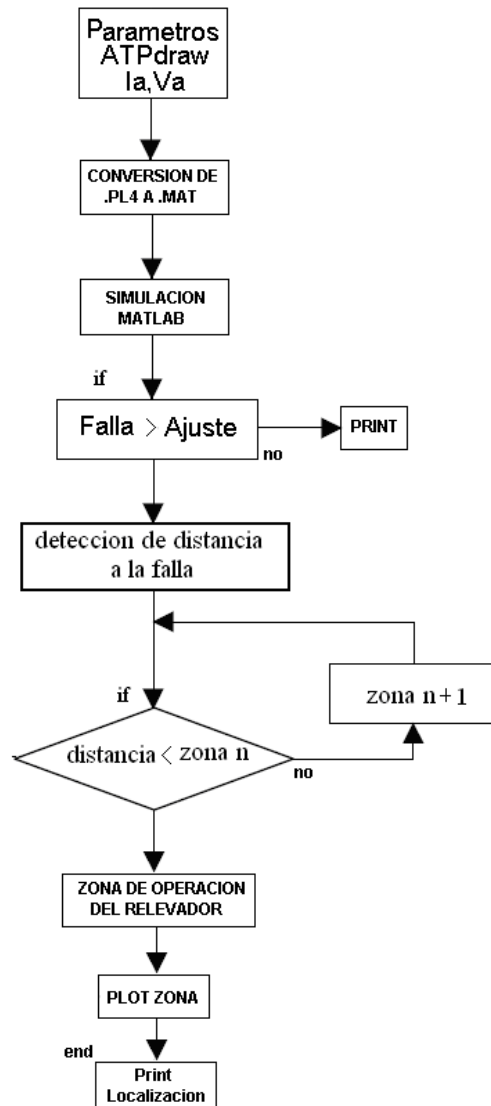


Figura 5.39. Diagrama de bloques para zonas de operación del relevador.

En la figura 5.40 se muestran los tiempos desde la decisión de disparo hasta la apertura del interruptor con el elemento kl.

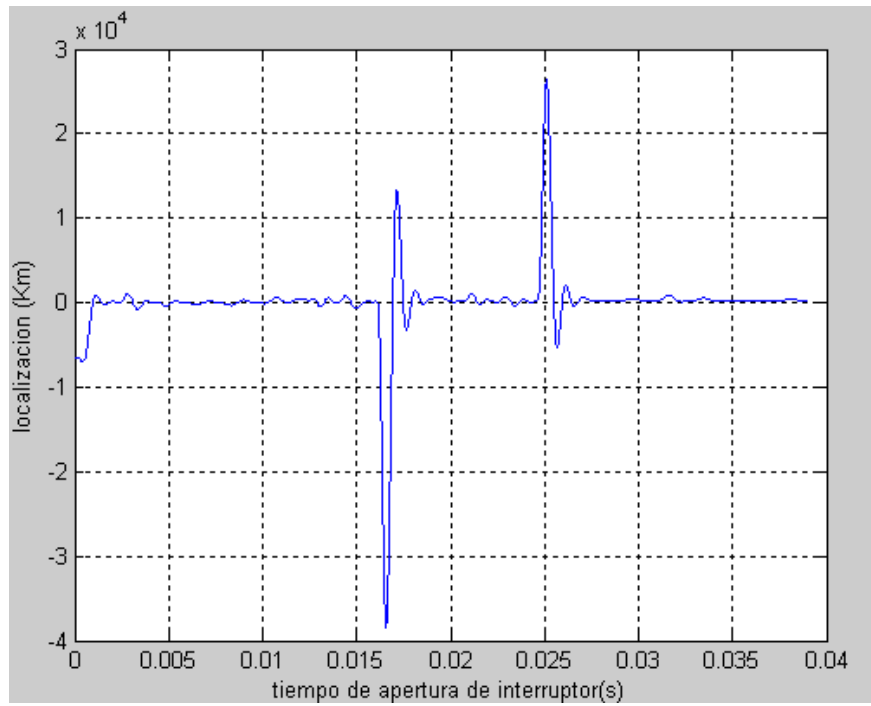


Figura 5.40. Tiempo desde la detección de la falla hasta la apertura del interruptor.

Para la localización de la falla es mas rápido tener un aproximado en forma numérica en lugar de tener una curva, ya que en la curva se puede apreciar el estimado hasta un ciclo después de la falla y en la forma numérica se obtiene el estimado hasta 7ms de ocurrida la falla aplicando una instrucción en Matlab.

$$\text{distancia} = \text{sum}(kl) / \text{length}(kl) \quad (5.1)$$

Los parámetros obtenidos del algoritmo de la ecuación diferencial para una falla monofásica a 10%, 50% y 90% de la longitud de la línea de transmisión son los siguientes:

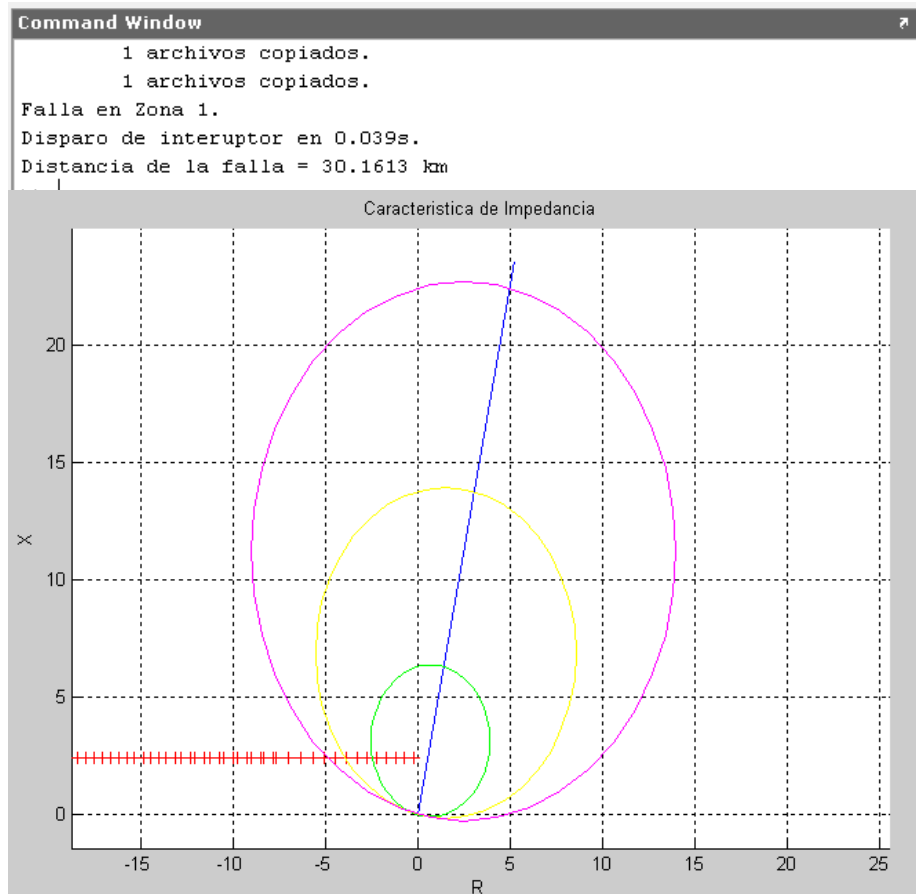


Figura 5.41. Operación y detección para una falla simulada al 10% con la característica de impedancia.

Para la zona protegida a se aprecia como el cortocircuito llega a la zona de operación el algoritmo de la ecuación diferencial calcula el estimado al punto fallado y la decisión de disparo puede ser tomada por el relevador de impedancia.

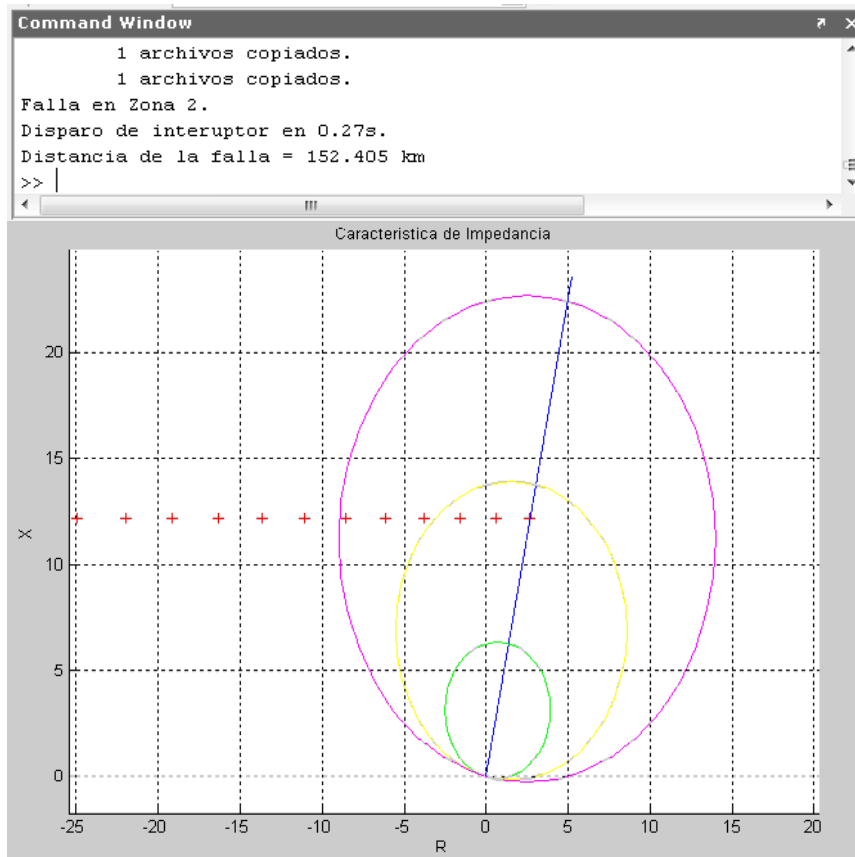


Figura 5.42. Operación y detección para una falla simulada al 50%.

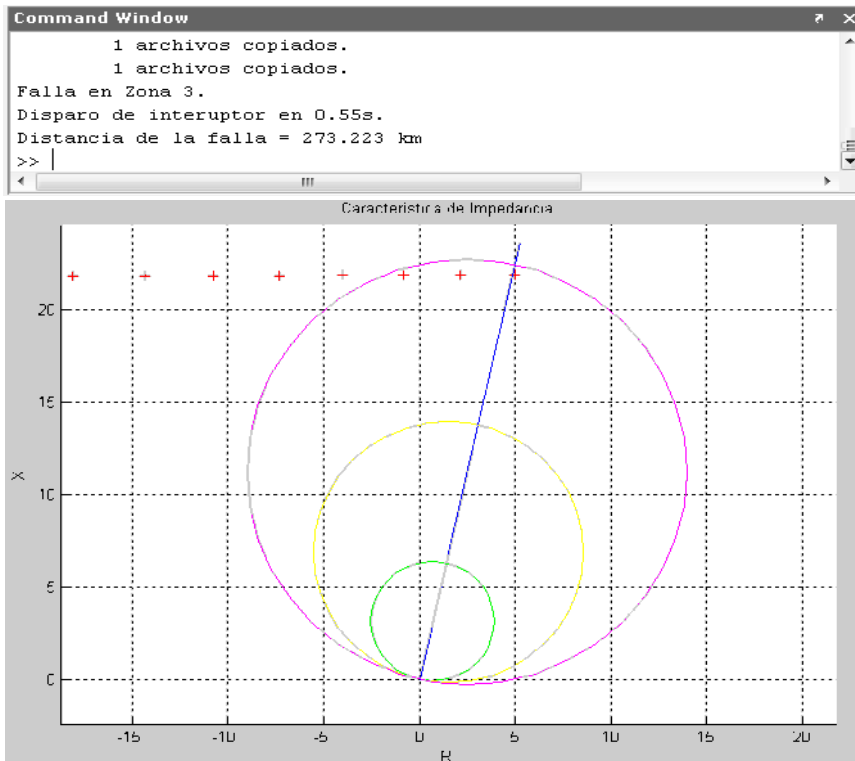


Figura 5.43. Operación y detección para una falla simulada al 90%.

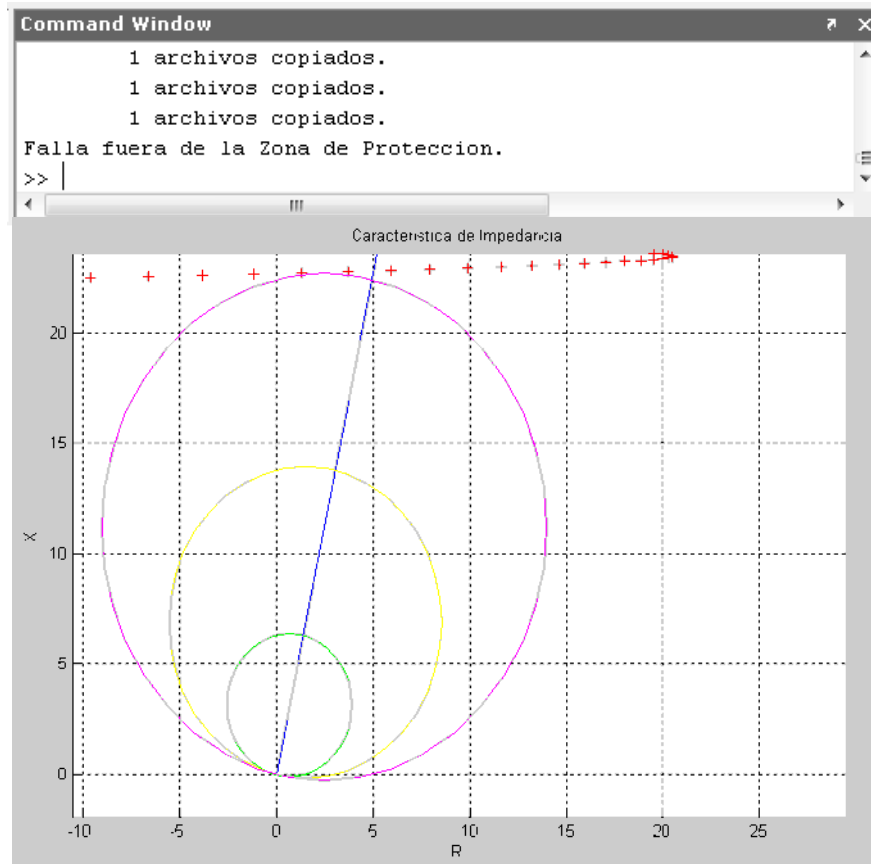


Figura 5.44. Detección para una falla fuera de la zona protegida.

Tanto para la falla al 10, 50 y 90% de la longitud de la línea de transmisión, el estimado al punto fallado se puede obtener junto con la zona, además si la falla ocurre fuera de la zona de operación el relevador no opera. Se aprecia numérica y gráficamente la operación del relevador y la distancia al punto fallado con una buena aproximación.

Conclusiones

6.1. CONCLUSIONES

El algoritmo de protección de distancia con el uso de la ecuación diferencial demostró los límites de actuación con y sin el uso del filtro de Buterworth para una falla monofásica al 10%, 50% y 90% de la longitud de la línea de transmisión.

El comportamiento característico del algoritmo sin filtro ante una falla monofásica fue de 1% de error en la parte mas cercana del bus de medición y de aproximadamente 10% en el extremo de la línea, siendo el elemento inductivo el que aporta información mas clara para la localización. Tambien una respuesta para la localización después de los tres ciclos de ocurrida la falla. La simulación con carga y sin carga para este caso no influyo en la respuesta y la frecuencia.

Para las simulaciones hechas con el uso del filtro de Butterworth ante una falla monofásica se obtuvo un error de 0.1% en la parte mas cercana del bus de medición y de aproximadamente 1% en el extremo de la línea, la localización del punto fallado es mas rápida, se muestra en los 3 primeros ciclos de ocurrida la falla. Para este caso ya no le afecta la componente de corriente directa como en el caso sin filtro. La simulación con carga y sin carga no influyo en la respuesta y la frecuencia.

Para las simulaciones en diferentes instantes de la magnitud de voltaje en la línea de transmisión el único instante más claro que aporta información fue el cruce por cero con un error de 1% en la parte mas cercana al bus de medición y 1% en el extremo de la línea ya que en caso del numerador y denominador de k_l y k_r la operaciones se realizan solo con los instantes de corriente por esta razón el error disminuyo. La simulación con carga y sin carga para este caso no influyo en la respuesta y la frecuencia.

Con el cambio de impedancia de falla que fueron 25 , 50 y 75 , la componente de corriente directa desaparece en los primeros 2 ciclos y el estimado al punto fallado es mas rápido, aunque no es tan preciso, ya que al aumentar la impedancia de falla el error aumenta de 0.1% a 1% en la parte mas cercana al bus de medición y en el extremo de la línea del 30% al 31%.

Con estos resultados se demostró que algoritmo de la ecuación diferencial es rápido que le afecta la componente directa en proporciones menores. Que su localización mejora con el uso del filtro de Butterworth, El error mínimo fue menor al 1% en menos de 3 ciclos, no le afecta el cruce por cero le beneficia en su exactitud, y que el aumento de impedancia de falla suprime la componente de corriente directa pero aumenta el error hasta 30%.

Los resultados para el estimado en la forma numérica mostraron una aproximación menor al 1% con falla en cualquiera de las ubicaciones de falla, así como el clareo de la falla por el elemento de impedancia por zonas. Esto facilitando la lectura y minimizando el error por mala aproximación al leer las graficas.

6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda para trabajos futuros de investigación:

- Realizar simulaciones con un filtro pasa banda. Y comparar los límites de actuación con el filtro de Butterworth.

- Realizar simulaciones con la falla bifásica a tierra ya que el algoritmo es muy similar al de la falla monofásica. analizar la falla trifásica.
- Implementar el algoritmo en laboratorio, voltaje y corriente de Tc`s y Tp`s.
- Analizar el algoritmo en condiciones de aumento de impedancia de falla.
- Analizar el algoritmo con una línea de transmisión con compensación.

Apéndice

A

Código fuente del algoritmo de la ecuación diferencial

A.1 CODIGO FUENTE MATLAB.

En este apéndice se muestra el código para la simulación realizada en Matlab versión 7.1.0.246(R14).

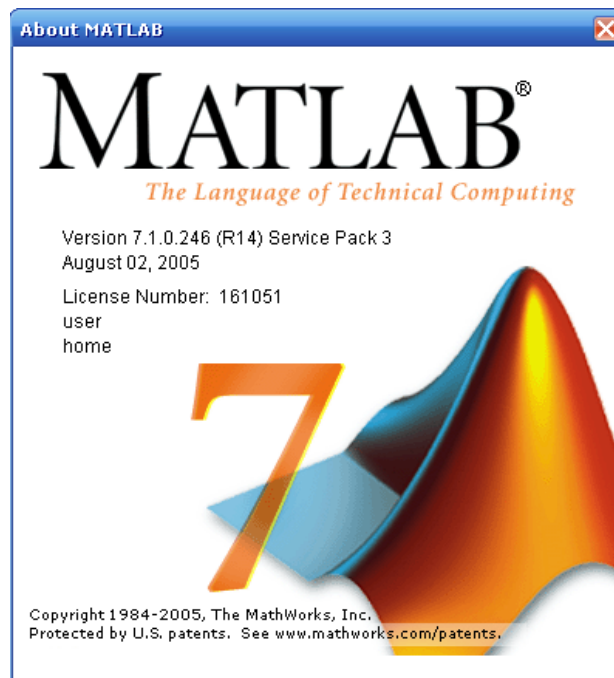


Figura A.1. Ventana acerca de Matlab.

A continuación se muestra el código para obtener el estimado k_l y k_r en la ventana de Matlab, los valores obtenidos son con el uso del filtro de Butterworth.


```

Ilk1=ilcCc(k+1:n-1);
VVk2=vVcc(k+2:n);
VVk=vVcc(k:n-2);
NBR=((VVk1+VVk).*(Ilk2-Ilk1)-(Ilk1-Ilk).*(VVk2-VVk1));
DBR=(Ilk1+Ilk).*(Ilk2-Ilk1)-(Ilk2+Ilk1).*(Ilk1-Ilk);
%-----
% Filtrado del numerador y denominador para obtener kr
NBRF=filter(Hd,NBR);
DBRF=filter(Hd,DBR);
KBR=NBRF./DBRF;
NR=((Vk1+Vk).*(lk2-lk1)-(lk1-lk).*(Vk2-Vk1));
DR=(lk1+lk).*(lk2-lk1)-(lk2+lk1).*(lk1-lk);
NRF=filter(Hd,NR);
DRF=filter(Hd,DR);
KR=NRF./DRF;
Kr=KR./KBR;
KrF=filter(Hd,A*Kr);
kr=300*KrF;
%-----
% Para la obtención de la grafica de kr y kl
figure
hold on
subplot(2,1,1); plot(T,kr);
title('Simulacion con filtro de Butterworth kr.');
```

El resultado de esta simulación se muestra en la figura A.2.

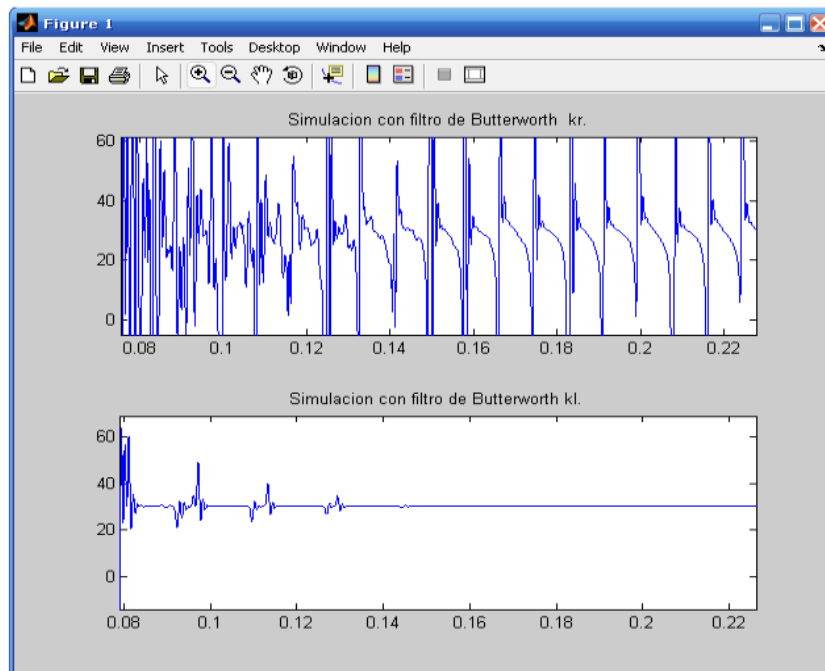
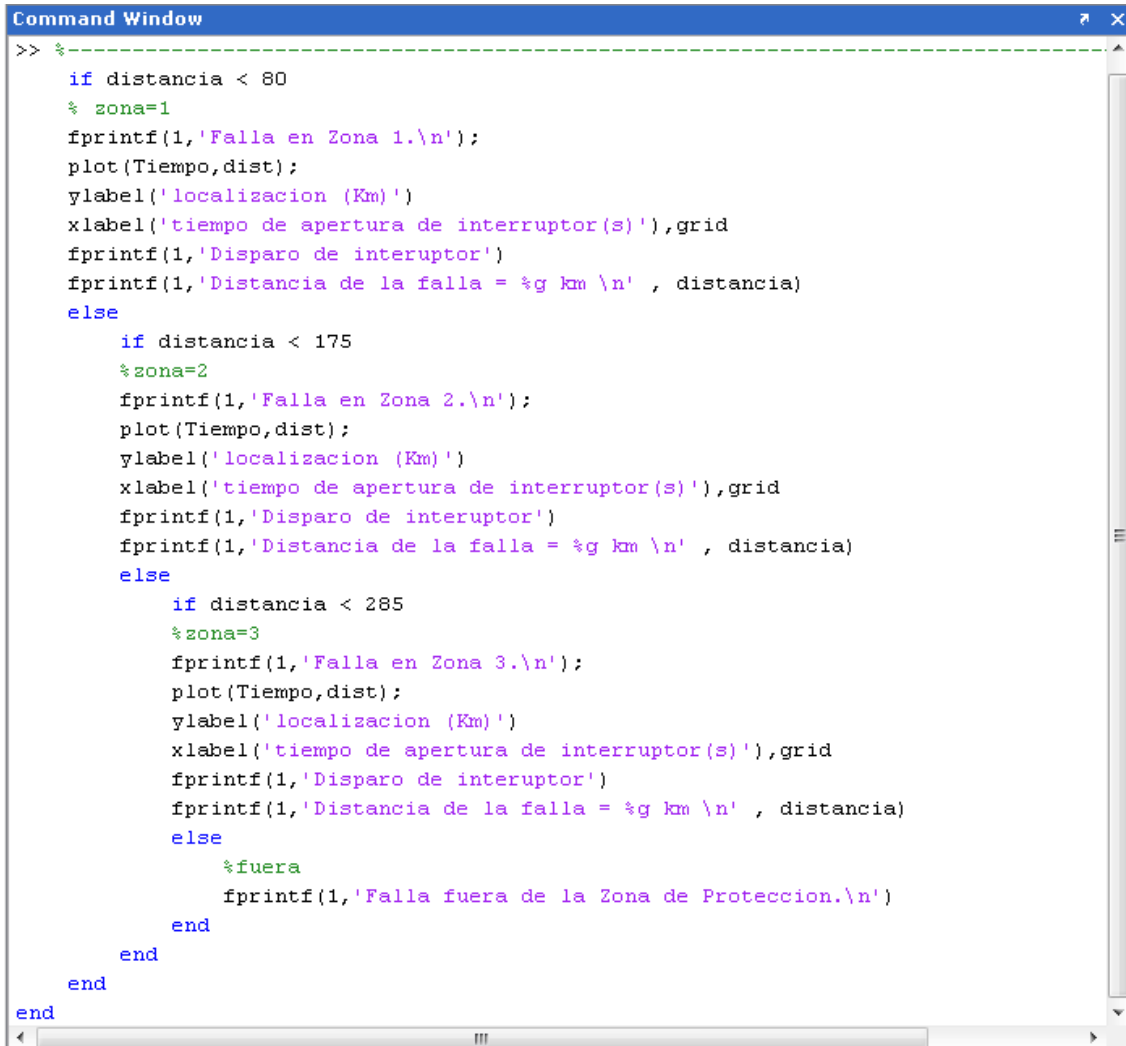


Figura A.2. Resultado del código fuente “estimado de la distancia al 10% de la línea de transmisión con filtro de Butterworth”.

La siguiente línea es la continuación del código anterior para la obtención numérica de las zonas de operación del relevador.



```

>> %-----
if distancia < 80
    % zona=1
    fprintf(1,'Falla en Zona 1.\n');
    plot(Tiempo,dist);
    ylabel('localizacion (Km)')
    xlabel('tiempo de apertura de interruptor(s)'),grid
    fprintf(1,'Disparo de interuptor')
    fprintf(1,'Distancia de la falla = %g km \n' , distancia)
else
    if distancia < 175
        %zona=2
        fprintf(1,'Falla en Zona 2.\n');
        plot(Tiempo,dist);
        ylabel('localizacion (Km)')
        xlabel('tiempo de apertura de interruptor(s)'),grid
        fprintf(1,'Disparo de interuptor')
        fprintf(1,'Distancia de la falla = %g km \n' , distancia)
    else
        if distancia < 285
            %zona=3
            fprintf(1,'Falla en Zona 3.\n');
            plot(Tiempo,dist);
            ylabel('localizacion (Km)')
            xlabel('tiempo de apertura de interruptor(s)'),grid
            fprintf(1,'Disparo de interuptor')
            fprintf(1,'Distancia de la falla = %g km \n' , distancia)
        else
            %fuera
            fprintf(1,'Falla fuera de la Zona de Proteccion.\n')
        end
    end
end
end
end
end

```

Figura A.3. Código fuente “obtención numérica de las zonas”.

El complemento para obtener la zona y el estimado al punto fallado en forma numérica es la siguiente:

$$\text{distancia} = \text{sum}(kl) / \text{length}(kl) \quad (\text{A.1})$$

Con el código de la figura A.3. y la expresión A.1 el resultado es mostrado en la ventana de Matlab como se muestra en la figura A.4.

```

Command Window
1 archivos copiados.
1 archivos copiados.
Falla en Zona 1.
Disparo de interruptor en 0.039s.
Distancia de la falla = 30.1613 km
>> |
    
```

Figura A.4. Código fuente “obtención numérica de las zonas y el estimado al punto fallado”.

Para la obtención de la grafica de la característica de impedancia con sus tres zonas tenemos.

```

Command Window
>> figure
title('Característica de Impedancia')
xlabel('R')
ylabel('X')
grid
hold on
t = 0:pi/20:2*pi;
[x,y] = meshgrid(t);
plot(r1+z*sin(t),x1+z*cos(t),'g') %Delimitacion de la zona 1
hold on
plot(r2+z2*sin(t),x2+z2*cos(t),'y')%Delimitacion de la zona 2
hold on
plot((r3+z3*sin(t),x3+z3*cos(t),'m')%Delimitacion de la zona 3
    
```

Figura A.5. Código fuente “obtención grafica de las zonas de operación del relevador”.

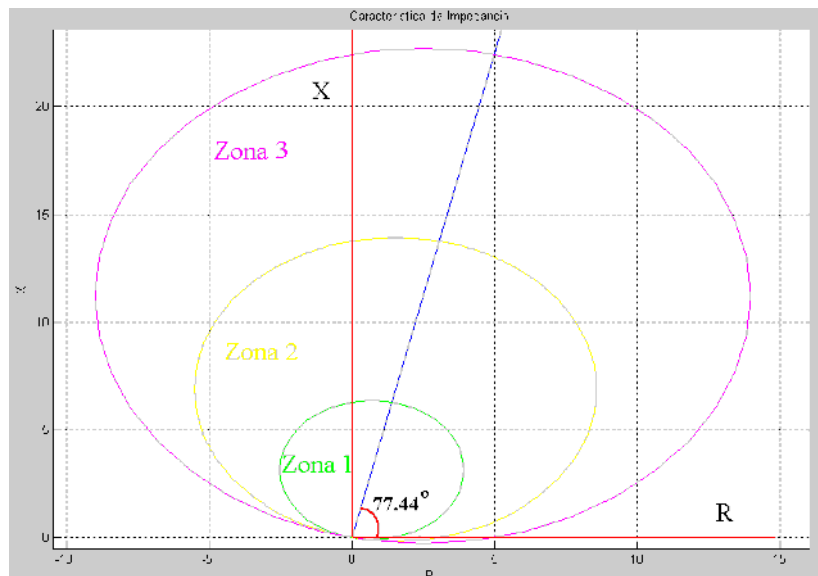


Figura A.6. Resultado del Código fuente “obtención grafica de las zonas de operación del relevador”.

Apéndice

B

Características Físicas y Eléctricas de Conductores

B.1 CONDUCTORES.

En este apéndice se muestran los datos físicos y eléctricos de los conductores.

CARACTERISTICAS DEL CABLE DE ALUMINIO CON REFUERZO DE ACERO															
Circular Mils o AWG Aluminio	ALUMINIO			ACERO		Diámetro exterior en pulgadas	Peso en libras por milla	Radio medio geométrico a 60 Hz	Capacidad de corriente aproximada en Amperes	Ia Resistencia Ohms por conductor por milla				Xa	Xa'
	Hilos	Capas	Diámetro en pulgadas de un hilo	Hilos	Diámetro en pulgadas de un hilo					25° C, (77° F) Corrientes pequeñas		50° C, (122° F) al 75% de su capacidad de corriente aproximado		Reactancia Inductiva Ohms por conductor por milla	Reactancia Capacitiva Megohms por conductor por milla
										Cd	60 ciclos	Cd	60 ciclos		
1113000	54	3	0.1436	19	0.0862	1.293	7544	0.0435	1110	0.0839	0.0844	0.0924	0.0969	0.380	0.0867
1033500	54	3	0.1384	7	0.1384	1.246	7019	0.0420	1060	0.0903	0.0909	0.0994	0.1035	0.385	0.0878
954000	54	3	0.1329	7	0.1329	1.196	6479	0.0403	1010	0.0979	0.0982	0.1078	0.1128	0.390	0.0890
900000	54	3	0.1291	7	0.1291	1.162	6112	0.0391	970	0.104	0.104	0.1145	0.1185	0.393	0.0898
874500	54	3	0.1273	7	0.1273	1.146	5940	0.0386	950	0.107	0.108	0.1178	0.1228	0.395	0.0903
795000	54	3	0.1214	7	0.1214	1.093	5399	0.0368	900	0.117	0.119	0.1288	0.1378	0.401	0.0917
795000	26	2	0.1749	7	0.1360	1.108	5770	0.0375	900	0.117	0.117	0.1288	0.1288	0.399	0.0912
795000	30	2	0.1628	19	0.0977	1.140	6517	0.0393	910	0.117	0.117	0.1288	0.1288	0.393	0.0904
715500	54	3	0.1151	7	0.1151	1.036	4859	0.0349	830	0.131	0.132	0.1442	0.1482	0.407	0.0932
715500	26	2	0.1659	7	0.1290	1.051	5193	0.0355	840	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.405	0.0928
715500	30	2	0.1544	19	0.0926	1.081	5865	0.0372	840	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.399	0.0920
666600	54	3	0.1111	7	0.1111	1.000	4527	0.0337	800	0.140	0.141	0.1541	0.1601	0.412	0.0943

TABLA B.1. Características del cable.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ELÉCTRICAS DE HILOS DE GUARDA AÉREOS DE ALUMOWELD												
NO. & TAMAÑO	DIAMETRO NOMINAL DE CADA HILO		DIAMETRO NOMINAL DEL CONDUCTOR		CARGA DE RUPTURA		PESO		RESISTENCIA DE C.D		SECCIÓN TRANSVERSAL	
	IN.	MM.	IN.	MM.	LB	KG	LB/1000 FT.	KG/KM	OHMS Por 1000 FT. @ 68°F	OHMS Por KM @ 20°C	SQ. IN	mm ²
19 No. 8	0.1285	3.264	.642	16.3	43,240	19,610	713.5	1,062.0	.1649	.5409	.24640	158.90
19 No. 9	0.1144	2.906	.572	14.5	34,290	15,550	565.8	842.0	.2079	.6821	.19540	126.10
7 No. 5	0.1819	4.620	.546	13.9	27,030	12,260	524.9	781.1	.2264	.7426	.18200	117.40
7 No. 6	0.1620	4.115	.486	12.4	22,730	10,310	416.3	619.5	.2803	.9198	.14430	93.10
7 No. 7	0.1443	3.665	.433	11.0	19,060	8,645	330.0	491.1	.3535	1.160	.11450	73.87
7 No. 8	0.1285	3.264	.385	9.78	15,930	7,226	261.8	389.6	.4458	1.463	.09077	58.56
7 No. 10	0.1019	2.588	.306	7.76	10,020	4,545	164.7	245.1	.7088	2.325	.05708	36.83
3 No. 5	0.1819	4.620	.392	9.96	12,230	5,547	224.5	334.1	.5177	1.699	.07800	50.32
3 No. 6	0.1620	4.115	.349	8.87	10,280	4,663	178.1	265.0	.6528	2.142	.06185	39.90

Modulo de Elasticidad: Conductor, 23,000,000 libras por pulgada cuadrada. Coeficiente de Expansión Lineal: .000,007,2 por grado Fahrenheit.

Figura B.2. Características del hilo de guarda.

Referencias

- [1] Osal Herrera, William José y García Gracia, Miguel. “*Algoritmo de protección de distancia basado en la ecuación diferencial*”. *Revista Técnica*, abr. 2006, Vol.29, no.1, p.74-82. ISSN 0254-0770.
- [2] Phadke A. and Thorp J.: “*Computer Relaying for Power Systems*”. Research Studies Press Ltd, 1994.
- [3] De Souza J., Rodriguez: “*Fault Location in Electric Power Systems Using Intelligent Systems Techniques*”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 1, (2001), pp. 59-67.
- [4] Atp analyzer, “*post-processor for atp*” version 2.03 enero 2001.
- [5] László Prikler, Hans Kristian Høidalen “*Atpdraw, User`s Manual*” P.10-16, 33,54. Octubre 2002
- [6] Ing. Amado Monsiváis Peña “*Comparación de funcionalidad de algoritmos de relevadores digitales para líneas de transmisión en condiciones ruidosas de la red*” Instituto Tecnológico de Ciudad Madero 2003. Tesis
- [7] William Anthony Granville “*Element of the differential and integral calculos*” ed. Percey f. Smith pp. 105-115
- [9] Richard Goering, “*Matlab edges closer to electronic design automation world*” *EE Times*, 10/04/2004.

-
- [10] Ing. Abel Villanueva Peña UNAM, Facultad de Ingeniería Departamento de control. Artículo Matlab, 2007.
- [11] Dr. Oscar L. Chacon Mondragón, Lic. Daniel Aguirre López, Dr. Ernesto Vázquez Martínez, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, “*Discriminación de fallas monofásicas*”, Universidad Autónoma de Nuevo León, .Septiembre del 2004.
- [12] Ricardo Valerio Bautista Cuellar. Revista digital investigación y educación “*Matlab y el diseño de filtros digitales*”. Número 19 Volumen II Septiembre de 2005.
- [13] Akke M. and Thorp J. “*Some Improvements in the Three-Phase Differential equation Algorithm for fast trans mission Line Protection*”. IEEE Transactions on Power Delivery.
- [14] C. Russell Mason, “*El arte y la ciencia de la protección por relevadores*”. B John Wiley & Sons, inc, 1980.
- [15] Manual DIGSI 4, Manual No. E50417-G1176-C152-A3 Siemens Agosto 2002.
- [16] Manual “*Análisis de perturgrafías*”, Documento no. E50417-H1178-C070-A3 Sigr4 Siemens, Agosto 2002.
- [17] Jamal T. Manassah, City College of New York, “*Elementary Mathematical and Computational Tools for Electrical and Computer Engineers Using Matlab*” p. 20-26, Octubre 2001.
- [18] The MathWorks, Inc . “*Using MATLAB Graphics*” 2002. p. 2-26.
- [19] Ing. Fernando Saldívar Cerón. “*Protección de líneas de transmisión por medio de relevadores detectores de onda viajera*”. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero 2008. Tesis.

Publicaciones

- [1] **“Nuevo Algoritmo Para Protección De Líneas De Transmisión”** Semana de la Ingeniería ITCM (2007). Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdoba.
- [2] **“Protección De Líneas De Transmisión”** Encuentro De Investigadores ITCM (2007). M.C. Juan de Dios Rodríguez Cartagena. Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdoba.
- [3] **“Algoritmo De La Ecuación Diferencial Para Protección Líneas De Líneas De Transmisión”** Vigésima segunda Reunión de Verano de Potencia, aplicaciones Industriales y Exposición Industrial (2009). Acapulco Guerrero. Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdoba.
- [4] **“Algoritmo De La Ecuación Diferencial Para Protección De Líneas De Transmisión.”** “I CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA COINTEC” (2009). Trujillo Perú. Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdoba, M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas, M.C. Juan de dios Rodríguez Cartagena.
- [5] **“Técnicas Avanzadas Para Protección De Líneas De Transmisión”** “III Encuentro de Investigadores” ITCM, Ciudad Madero Tamaulipas. Diciembre 2009. Ing. Bryan Hademar Vázquez Córdoba, M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas, M.C. Juan de dios Rodríguez Cartagena. M.C. Samuel Ramos Mondragón.