

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



MODELADO Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA
TRANSITORIA DE PUESTAS A TIERRA NO EXTENSAS

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA

ELABORADO POR

ERASMO AMADOR ECHEVERRIA PECHE

ASESOR

M. Sc. JUSTO YANQUE MONTUFAR

LIMA – PERU

2012

**Dedico este trabajo a la memoria de mis
padres Manuel y María, a mi amada
esposa Ángela y a mis adorables hijos
George, Evelyn e Yvette.**

El autor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar doy gracias a Dios nuestro creador, por darme salud, posibilidades de realización y una gran familia.

A mi alma mater la Universidad Nacional de Ingeniería, especialmente a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica por haberme aceptado como estudiante de Maestría, a mis Profesores de Postgrado por la enseñanza y experiencia que me impartieron.

Mi agradecimiento especial a mí Asesor y Profesor M. Sc. Justo Yanque Montufar, por la guía, soporte y forma creativa de exponer las ideas durante el desarrollo de esta Tesis; así como, por transmitir sus grandes experiencias como investigador y profesional. Agradezco a los revisores de ésta Tesis, el M. Sc. Juan E. Velásquez Sevillano y M. Sc. Dionicio Z. Ñaupari Huatuco, quienes han contribuido con sus comentarios para darle claridad a este trabajo.

Mi agradecimiento a mi esposa Ángela, por el amor, cariño y comprensión; por el apoyo decidido y cederme su espacio para hacer posible llegar a la meta. Finalmente a mis hijos George, Evelyn e Yvette, quienes con su alegría y amor me dieron confianza en el desarrollo de esta Tesis, en especial a Evelyn por haber apoyado directamente este trabajo.

ABSTRACT

The exits of the service not programmed of a Transmission Line constitute an important indicator of his performance, according to the statistics of the operation of the majority of the electrical systems in the world, the main cause are the flash of lightning.

The knowledge of the electromagnetic transitory behavior of the grounding is a basic condition and of fundamental importance in the determination of effective practices for the insulator protection of the electrical systems against the lightning flashes; the above mentioned behavior can predict to him by means of a grounding model with dynamic answer and analytical base for the computational calculation, which in turn represent in analogical form to the grounding. A technique of analytical exploration can be use as instrument to reduce the grounding impedance of the towers.

In this work a route of analysis can development for the definition of the grounding model and of his response at the transitory of impulse current type lightning, applicable to the grounding the towers of Transmission Lines; this model takes as a base the Theory of Transmission Lines, possesses the simplicity and facility of his implementation that becomes propitious by the Program ATP.

Thereby simulations have been effected, with big effectiveness, achieving the analysis in the domain of the time and of the frequency with the parameters of interest, to obtain in every case the maximum overvoltage and the impedance of impulse that allow to control and check the behavior of the Isolation of the electrical lines to lightning flashes.

RESUMEN

Las salidas del servicio no programadas de una Línea de Transmisión constituyen un indicador importante de su desempeño, según las estadísticas de la operación de la mayoría de los sistemas eléctricos en el mundo, las causas principales son las descargas atmosféricas.

El conocimiento del comportamiento electromagnético transitorio del aterramiento es condición básica y de fundamental importancia en la determinación de prácticas eficaces para la protección del aislamiento de los sistemas eléctricos contra las descargas atmosféricas; dicho comportamiento puede predecirse mediante un modelo de Puesta a Tierra con respuesta dinámica y con base analítica para el cálculo computacional, que a su vez represente en forma analógica al aterramiento. Una técnica de exploración analítica que puede utilizarse como instrumento, para reducir la impedancia de Puesta a Tierra de las torres.

En este trabajo se desarrolla una ruta de análisis para la definición del modelado de Puesta a Tierra y de su respuesta frente a transitorios de corriente de impulso tipo Rayo, aplicables al aterramiento de torres de Líneas de Transmisión; este modelo tiene como base la Teoría de Líneas de Transmisión, y cuenta con la simplicidad y facilidad de su implementación mediante el Programa ATP.

De ese modo se han efectuado simulaciones con gran eficacia, logrando el análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia con los parámetros de interés, para obtener en cada caso la sobretensión máxima y la impedancia de impulso que permiten controlar y verificar el comportamiento del Aislamiento de las líneas eléctricas ante descargas atmosféricas.

TABLA DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE TABLAS.....	xxii
GLOSARIO DE ABREVIACIONES.....	xxv
CAPITULO 1: PLAN PARA EL ESTUDIO DEL MODELADO Y ANALISIS	
PREVISTOS	28
1.1 Antecedentes.....	28
1.2 Planeamiento del Problema.....	29
1.2.1 Marco del Problema.....	30
1.2.2 Marco Teórico del Modelado.....	31
1.3 Justificación y Objetivo de la Tesis	31
1.4 Organización de la Tesis.....	32
1.5 Estado actual de la Normatividad sobre Puesta a Tierra	33
1.6 Breve Descripción de la Física del Rayo y sus efectos	34
1.6.1 Composición de la Atmósfera Terrestre.....	34
1.6.2 Teorías validas de la Física del Rayo	34
1.6.3 Modelo de las Nubes Tormenta como Estructura Dipolar	35
1.6.4 Estructura “Doble Dipolo” de la Nube Tormenta	36
1.6.5 Descargas Eléctricas o Rayos.....	40
1.6.6 Observaciones sobre el comportamiento del Rayo.....	43
CAPITULO 2: CRITERIOS Y PRÁCTICA ACTUAL PARA PROTEGER	
LINEAS ELECTRICAS CONTRA RAYOS	44
2.1 Características Eléctricas del Rayo	44
2.1.1 Niveles Isoceraunicos	44
2.1.2 Densidad de Descargas de Rayo a Tierra.....	46
2.1.3 Influencia de la Cota de la Estructura a caída de Rayos.....	48
2.1.4 Magnitud de la Corriente de Impulso.....	48
2.1.5 Características de la Onda de Rayo.....	48
2.2 Fallas de Blindaje y Distancia de Disrupción por Efecto del Rayo.....	49
2.2.1 Modelo Electro Geométrico de blindaje contra caída de Rayos a Líneas	

de Transmisión	50
2.2.2 Protección Efectiva de Líneas de Transmisión.....	52
2.2.3 Cálculo de Corriente de disrupción por falla de la Protección contra Rayos.....	53
2.3 Impacto de Rayo en la cima de la Estructura.....	56
2.4 Modelo CIGRE de Puesta a Tierra en Alta Frecuencia, Circuito R-L//R	58
2.4.1 Modelado y Parámetros de la Impedancia de Puesta a Tierra.....	58
2.4.2 Respuesta en Tensión y Corriente de la Puesta a Tierra por caída de Corrientes de Rayos en Modelo CIGRE	62
2.5 Modelado de Puesta a Tierra como Circuito “R-L” desarrollado por J.G. Anderson.....	65
2.5.1 Criterios del Modelado en Circuito R-L.....	65
2.5.2 Parámetros de Puesta a Tierra y Torre de Transmisión en el modelo equivalente “R – L”	65
2.5.3 Cálculo de Parámetros del aterramiento de las Torres de Transmisión en Circuito R-L para Alta Frecuencia.....	70
2.5.4 Modelo de Puesta a Tierra en Circuito “R-L” con Respuesta a Corrientes de Impulso de Rayo.....	71
2.6 Modelado de Puesta a Tierra en Alta Frecuencia como Circuito R-C.....	74
2.6.1 Criterios Generales del Modelado R-C	74
2.6.2 Cálculo de los Parámetros del Circuito R – C.....	75
2.6.3 Circuito Eléctrico R-C equivalente de la Puesta a Tierra.....	78
2.6.4 Aplicaciones del Modelo R-C de Puestas a Tierra en Alta Frecuencia.....	80

CAPITULO 3: EXAMEN A MODELADOS PRECURSORES DE PUESTAS

A TIERRA CON RESPUESTA TRANSITORIA.....	83
3.1 Introducción.....	83
3.2 Resistencia de Puesta a Tierra en Estado Estacionario.....	83
3.2.1 Criterios Generales.....	84
3.2.2 Modelado de Resistencia de Puesta a Tierra en Estado Estacionario.....	85
3.3 Modelados Precursores de Impedancia de Puesta a Tierra con Respuesta Transitoria a Corrientes de Impulso.....	91
3.3.1 Modelado de Puesta a Tierra aproximado por Teoría de Líneas de Transmisión.....	91

3.3.2 Modelo de Puesta a Tierra aproximado por Teoría del Campo	
Electromagnético.....	95
3.3.3 Modelo de Puesta Tierra aproximado por Teoría del Circuito Eléctrico.....	98
3.4 Análisis comparativo de los Modelados de Puesta Tierra con respuesta transitoria a corriente de Impulso.....	101
3.5 Ventajas y Desventajas de los Modelados de Puesta a Tierra con Respuesta Transitoria.....	107

CAPITULO 4: MODELADO DE PUESTAS A TIERRA DINAMICA

APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	109
4.1 Características de un Modelado	109
4.2 Teoría de Líneas de Transmisión aplicada al estudio de Puesta a Tierra con Respuesta Transitoria.....	110
4.2.1 Consideraciones Metodológicas.....	110
4.2.2 Aplicación de la Frecuencia de Propagación de las Ondas.....	112
4.3 Modelado de Puesta a Tierra Aproximado a Línea de Transmisión.....	113
4.3.1 Criterios y Asunciones básicas para el modelado.....	113
4.3.2 Parámetros del Conductor de Puesta a Tierra en p.u. de longitud.....	115
4.4 Modelado de Puesta a Tierra Aproximado a Línea de Transmisión infinita con parámetros por unidad de longitud constante.....	116
4.5 Modelado de PT aproximado a Línea de Transmisión Uniforme con parámetros por unidad de longitud dependiente de la longitud.....	121
4.6 Modelado de la PT aproximado a Línea de Transmisión Infinita con Parámetros por unidad de Longitud Dependiente de la Frecuencia	126
4.7 Modelado de Puesta a Tierra aproximado por Línea de Transmisión No Uniforme.....	129
4.8 Simulaciones para Verificación del Modelado de Puesta a Tierra aproximado a Línea de Transmisión.....	133
4.8.1 Respuesta Dinámica de la Puesta a Tierra con Electrodo Idénticos y Fuentes de corriente de Impulso Rápida y Lenta	133
4.8.2 Mejora de Respuesta Dinámica de Puesta a Tierra a Corriente de Impulso..	139

4.8.3	Discusión a los Resultados del Modelado de Puesta a Tierra aproximado a Línea de Transmisión.....	143
4.9	Análisis Transitorio de la Puesta a Tierra a la Corrientes de Rayo mediante el Uso del ATP	144
4.9.1	Breve Descripción del ATP como herramienta de Cálculo.....	144
4.9.2	Procedimiento de uso del ATP	145

CAPITULO 5: MODELADO DE LA IONIZACIÓN DEL SUELO EN EL CÁLCULO DE LA PUESTA A TIERRA CON RESPUESTA DINÁMICA			147
5.1	Criterios Generales.....		147
5.2	Modelo de Puesta a Tierra Convencional con Ionización del Suelo.....		148
5.2.1	Criterios y Metodología.....		149
5.2.2	Aplicaciones del Modelo de Puestas a Tierra Convencional con Ionización..		150
5.3	Modelo de la Ionización del Suelo dependiente de la Corriente		154
5.3.1	Criterios para el Modelado.....		155
5.3.2	Calculo de la Impedancia de Puesta a Tierra.....		157
5.3.3	Asunciones iniciales para el modelado de la Resistividad con Ionización...		158
5.3.4	Modelado de la Resistividad en función de la Corriente para ionización del Suelo.....		159
5.3.5	Calculo de la Resistencia Eficaz de una varilla conductora.....		162
5.4	Aplicación del Modelado de la Resistividad dependiente de la corriente con Ionización del Suelo.....		162
5.5	Pruebas Experimentales y Cálculo de la Resistividad Residual en Regiones de Ionización de investigaciones Anteriores.....		166
5.6	Discusión de Resultados de las Tablas Nº 5.3, 5.4 y 5.5		167
5.7	Comparación entre Modelados de Ionización Convencional y Modelado de Ionización dependiente de la Corriente		172
5.8	Discusión a los Resultados comparativos de los Modelados de PT con Ionización.....		175
5.9	Consideraciones finales al Modelado de Puesta a Tierra con Ionización....		176

CAPITULO 6: ANÁLISIS TRANSITORIO DE PUESTAS A TIERRA PARA ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	177
6.1 Criterios para el Dimensionamiento de los Parámetros de la Puesta a Tierra.....	177
6.1.1 Capacidad del Conductor para electrodo de Puesta a Tierra.....	177
6.1.2 Parámetros del electrodo de Puesta a Tierra en Modelo aproximado a Línea de Transmisión.....	177
6.1.3 Influencia de los Parámetros del Suelo y Dimensiones del Conductor en la Puesta a Tierra.....	178
6.2 Respuesta Dinámica de la Puesta a Tierra en Suelo Estratificado.....	181
6.3 Dimensionamiento del electrodo de Puesta a Tierra Aplicando del criterio de longitud eficaz.....	186
6.4 Dimensionamiento de Puestas a Tierra para Torres de Líneas de Transmisión.....	190
6.4.1 Criterios para el Dimensionamiento.....	190
6.4.2 Impedancia de Impulso e Impedancia Dinámica.....	191
6.4.3 Configuraciones Típicas de electrodos de Puesta a Tierra.....	191
6.5 Parámetros de la Puesta a Tierra utilizados para Simulaciones de Análisis Transitorios.....	194
6.5.1 Casos a ser Analizados.....	194
6.5.2 Parámetros de aterramiento de las Torres de Transmisión.....	194
6.5.3 Impedancia de Puesta a Tierra Dinámica.....	196
6.5.4 Fuentes de Corriente de Impulso.....	197
6.5.5 Tensión Crítica del Aislamiento.....	198
6.6 Simulaciones con el ATP para Respuesta Transitoria de la Puesta a Tierra a Corriente de Rayos.....	198
6.7 Nivel de Aislamiento de las Líneas Eléctricas y Discusión de Resultados...	202
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE INVESTIGACIONES..	204
7.1 Conclusiones.....	204

7.2	Propuestas de Investigaciones futuras.....	206
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	207
	<u>ANEXOS</u>	
	ANEXO A-0: NORMAS DE PUESTA A TIERRA	212
	ANEXO A1: MODELADO DINÁMICO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	214
	ANEXO A2: RESPUESTA DINÁMICA DE LA PUESTA A TIERRA EN MODELO APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	221
	ANEXO B1: REPORTE DE CÁLCULO DE RESPUESTA TRANSITORIA DE LA PUESTA A TIERRA USANDO EL ATP.....	228
	ANEXO B2: ALGORITMOS DE CÁLCULO DE IMPEDANCIA DINÁMICA DE PUESTA A TIERRA EN MATLAB.....	232
	ANEXO C1: ECUACIONES DE ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS ELÉCTRICAS..	234
	ANEXO D : LAMINAS DE CONFIGURACIONES TÍPICAS DE ESTRUCTURAS Y ARMADOS DE PUESTA A TIERRA	239

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1:

Figura 1.1	Electrodos simples de Puesta a Tierra.	31
Figura 1.2	Formación de carga dipolar de una nube tormenta.	37
Figura 1.3	Convención de signos para análisis de campos eléctricos de una nube tormenta.	37
Figura 1.4	Estructura Doble Dipolo de una nube de tormenta.....	38
Figura 1.5	Método de imágenes para deducir el campo eléctrico de una carga sobre el suelo.....	39
Figura 1.6	a) y b) Intensidad de Campo Eléctrico en superficie del suelo en función de la distancia lateral, en una estructura de nube tormenta tipo “Doble Dipolo”.....	41
Figura 1.7	Categorías del rayo según Berger.....	42
Figura 1.8	Modelo conceptual de secuencia de descarga nube-tierra en Una nube conectiva.....	43
Figura 1.9	Polarización de las nubes e inicio de la Descarga de Rayo.....	43
Figura 1.10	Foto de la izquierda muestra la polarización de las nubes con descargas N-N y N-T, la foto de la derecha muestra descarga nube-tierra	44
Figura 1.11	Distintas etapas de descarga de un Rayo nube-tierra, afinidad del rayo con objetos metálicos elevados.....	44

CAPITULO 2:

Figura 2.1	Mapa de Registro Días de Tormenta promedio /año en el mundo (<i>World Lightning Map</i>). Fuente observatorios de la NASA.....	45
Figura 2.2	Mapa de Nivel Isocerámico del Perú.....	46
Figura 2.3	Mapa de Densidad de Rayos/km ² /año en el mundo, periodo 1993-2003, fuente observatorios de la NASA.....	47

Figura 2.4	Forma de Onda de Corriente Tipo Rayo.	49
Figura 2.5	Forma de Onda de Rayo estándar IEC.....	49
Figura 2.6	Modelo Electro Geométrico para Blindaje de Líneas Eléctricas, Área (A) Blindaje incompleto, ancho X_S no es cubierto ante descargas de rayo, Área (B) saltos al conductor de fase C1.....	51
Figura 2.7	Modelo Electro Geométrico para fallas de Protección a Rayos. BLINDAJE EFECTIVO – ancho no protegido X_S se reduce a cero.	52
Figura 2.8	Distancia de disrupción máxima por caída de Rayo para una LT 220 kV con dos Cables de Guarda.	55
Figura 2.9	Flameo Inverso causado por una descarga sobre una Torre.....	56
Figura 2.10	Caída de Rayo en estructuras de una Línea Eléctrica con Cable de Guarda.	56
Figura 2.11	Circuito equivalente de Impedancia de Puesta a Tierra (PT) con Respuesta Dinámica, Modelo CIGRE.	58
Figura 2.12	Impedancia Transitoria al Impulso de Rayo de Puesta a Tierra, conductor horizontal 25 mm ² en suelo de Resistividad de 1000 Ohm-m. Modelo de PT-CIGRE.....	61
Figura 2.13	Impedancia Transitoria al Impulso de Rayo de Puesta a Tierra, conductor horizontal 35 mm ² en suelo de Resistividad de 1000 Ohm-m. Modelo de PT-CIGRE.....	61
Figura 2.14	Circuito Equivalente de la Impedancia de Puesta a Tierra asociado al aterramiento de una LT, por caída de rayo en la cima de Torre.....	62
Figura 2.15	Tensión en Cima y Pie de Torre por inyección de corriente de 20kA, en Puesta a Tierra de 2x40 m – 35 mm ² , Resistividad del Suelo de 1000 Ohm-m.	63
Figura 2.16	Tensión en cima y pie de Torre por inyección de corriente de 20kA, en Puesta a Tierra de 2x40 m – 25 mm ² , Resistividad del suelo de 1000 Ohm-m.	63
Figura 2.17	Disipación de la Corriente de impulso en Cable de Guarda,	

	Torre-Puesta a Tierra con electrodo de $25 \text{ mm}^2 - 2 \times 40 \text{ m}$, Resistividad $1000 \text{ } \Omega\text{-m}$. Modelo de PT-CIGRE.....	64
Figura 2.18	a) y b) Circuitos equivalentes de PT sometidos a Corriente de Rayo, Modelo en baja y alta frecuencia [2].	66
Figura 2.19	Inductancia eficaz de la Torre como función de Impedancia de Onda de la Torre y Resistencia de Puesta a Tierra ($Z_s = 400 \text{ Ohm}$). 70	
Figura 2.20	Impedancia Dinámica equivalente en la cima de la torre para diversos valores de Inductancias de la Torre y Resistencia de Puesta a Tierra, conductor 25 mm^2	71
Figura 2.21	Tensiones en la cima $V_T(t)$ y en Pie de Torre $V_{pt}(t)$, producido por Corriente de Rayo con Puesta a Tierra de 25 Ohm . Modelo R-L de [2].....	73
Figura 2.22	Tensiones en la cima $V_T(t)$ y en Pie de Torre $V_{pt}(t)$, producido por Corriente de Rayo con Puesta a Tierra de 15 Ohm . Modelo R-L de [2]	73
Figura 2.23	Modelado de Puesta a Tierra: (a) Representado por R (estado estacionario o CC), (b) Representación R-C con componentes de R, L, C para alta frecuencia.	75
Figura 2.24	Distribución del campo eléctrico en una Capacitancia de forma Cilíndrica, de un conductor de PT enterrado a una profundidad "h".....	77
Figura 2.25	Modelo de Circuito Eléctrico L, R-C simplificado de la PT.....	78
Figura 2.26	Tensión en la cima y pie de la Torre por caída de Rayo de 20 kA , con Resistencia de PT de $12,3 \text{ Ohm}$, suelo con Resistividad de 1000 Ohm-m . Modelo de PT en circuito R-C.....	80
Figura 2.27	Distribución de corriente de Rayo en Puesta a Tierra ramificada, suelo con Resistividad de 1000 Ohm-m . Modelo de PT circuito R-C..	81
Figura 2.28	Tensión en la cima y pie de la Torre por caída de Rayo de 20 kA , con electrodo de PT de $1 \times 16 \text{ m}$ en suelo tratado con Resistividad de 5 Ohm-m	81

Figura 2.29	Tensión en la cima y pie de la torre por caída de Rayo de 20 kA, $Z_{\text{torre}} = 66 \mu\text{H}$, con electrodo de PT de 1x16 m en suelo tratado con Resistividad de 5 Ohm-m.....	82
-------------	--	----

CAPITULO 3:

Figura 3.1	Resistencia de Puesta a Tierra vs Longitud de la Varilla vertical para diámetro de 5/8" en Modelo de [12] y [14].....	86
Figura 3.2	Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud de la varilla vertical para diámetros de 1/2" a 2" en suelo de Resistividad de 100 $\Omega\text{-m}$...	87
Figura 3.3	Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductor simple horizontal de 35 mm ² -Cu enterrado, Resistividad del suelo 500 $\Omega\text{-m}$. Modelos de PT en [10], [12] y [14].....	89
Figura 3.4	Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductor simple horizontal de 25 mm ² -Cu enterrado, resistividad del suelo 1000 $\Omega\text{-m}$. Modelos de PT en [10], [12] y [14].	89
Figura 3.5	Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductores simple horizontal de 25, 35, 50 y 70 mm ² -Cu enterrado a 0,60 m en suelo con resistividad de 500 Ohm-m. Modelo de PT en [12].	90
Figura 3.6	Circuito equivalente de la Línea de Transmisión con perdidas, aproximado a un conductor de Puesta a Tierra.....	92
Figura 3.7	a) y b) Puesta a Tierra aproximado a Circuito Eléctrico equivalente por cada segmento, Modelo de PT propuesto por [28].....	98
Figura 3.8	Circuito de Equivalente de una red cuadrada de la malla de PT...	100
Figura 3.9	Circuitos Equivalentes de la rama Conductancia-Capacitancia de la Puesta a Tierra. Modelo CE de [32].....	100
Figura 3.10	a), b) y c) Circuitos Equivalentes de Puesta a Tierra, rama Resistencia-Inductancia en el Modelo de [32].....	100
Figura 3.11	Modulo de Impedancia harmónica normalizada con Resistencia en CC vs Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 1m. Fuente de [44].....	103

Figura 3.12	Modulo de Impedancia harmónica normalizada con Resistencia CC versus Frecuencia, para un electrodo vertical de 10 m. Fuente de [44].	103
Figura 3.13	Modulo de Impedancia harmónica normalizada con Resistencia CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 30 m. Fuente de [44].	103
Figuras 3.14	Modulo de Impedancia harmónica normalizada con Resistencia CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 1 m. Fuente de [44].	104
Figura 3.15	Modulo de Impedancia harmónica normalizada con Resistencia CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 10 m. Fuente de [44].	104
Figura 3.16	Modulo de Impedancia harmónica normalizada con Resistencia CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal 30m. Fuente de [44].	105
Figura 3.17	Modulo y ángulo de la Impedancia de Puesta a Tierra medida por EDF y simulada para el Modelo TL y TCE por [25].	107

CAPITULO 4:

Figura 4.1	Electrodo de Puesta a Tierra segmentado en circuito PI distribuido. Modelo aproximado por TL.....	111
Figura 4.2	Flujo de corriente en el electrodo-suelo de PT y circuito PI equivalente en Modelo aproximado a Línea de Transmisión.....	111
Figura 4.3	a), b) Dos electrodos de Puesta a Tierra enterrados a los que se inyecta corriente en los puntos A, B y C.....	117
Figura 4.4	Circuito del Modelo de PT aproximado a Línea de Transmisión infinita, con parámetros constantes, longitud del electrodo l_1	117
Figura 4.5	Corriente de impulso rápido $I(t)$, tiempo de frente- $t_f = 2\mu S$ y tiempo de cola- $t_r = 50 \mu S$	118
Figura 4.6	a) y b) Tensiones Transitorios en los puntos A, B, C para conductor	

	de PT horizontal de 20 m con parámetros constantes. Modelo de PT aproximadamente a LT.....	119
Figura 4.7	a) y b) Tensiones Transitorios en los puntos A, B, C para conductor de PT horizontal de 100 m, parámetros constantes. Modelo de PT aproximadamente a LT.....	120
Figura 4.8	a), b, c) Modulo de Impedancia $Z(\ell)$ vs Longitud del electrodo de PT para bajas y altas frecuencias. Modelo de PT aprox. a LT.....	125
Figura 4.9	a), b), c) Modulo de Impedancia $ Z(\omega) $ vs Frecuencia para electrodos de PT con longitudes de 25 m hasta 200 m. Modelo de PT aproximado a LT.....	128
Figura 4.10	Ilustración de un conductor simple, con la discretizacion y el acoplamiento.....	131
Figura 4.11	Corriente de impulso lento $I(t)$, $t_c = 5 \mu\text{S}$ y $t_f = 150 \mu\text{S}$	134
Figura 4.12	a), b) Distribución de Tensiones en la PT por inyección de corriente de impulso rápido de 10kA, para electrodo de $\ell = 20$ m. Modelo aprox. a LT.....	136
Figura 4.13	a), b) Distribución de Tensiones en la PT por inyección de corriente de impulso rápido de 10kA para electrodo de $\ell = 100$ m. Modelo de PT aproximado a LT.....	136
Figura 4.14	a) y b) Distribución de Tensiones en la PT por inyección de corriente de impulso lento de 10kA para electrodo de $\ell = 20$ m. Modelo de PT aproximado a LT.....	138
Figura 4.15	Distribución de Tensiones en la PT por inyección de corriente de impulso lento de 10kA para electrodo de $\ell = 100$ m. Modelo de PT aproximado a LT.....	139
Figura 4.16	Modulo de Impedancias de impulso de PT ramificados vs Tiempo, ajustado a longitud eficaz para suelos con Resistividad de 1000 y 2000 Ohm-m.....	141
Figura 4.17	Tensión de impulso en electrodo de PT tipo B1 – 1x60 m, corriente impulso rápido 10kA, suelo de Resistividad de 1000 Ohm-m....	141
Figura 4.18	Tensión de impulso en electrodo de PT tipo B2 – 2x30 m, corriente	

	impulso rápido 10kA, suelo de Resistividad de 1000 Ohm-m.....	142
Figura 4.19	Tensión de impulso en electrodo de PT tipo B4 – 4x30 m, corriente impulso rápido 10kA, suelo de Resistividad de 2000 Ohm-m.....	142
Figura 4.20	Tensión de impulso en electrodo de PT tipo B3 – 3x40 m, corriente impulso rápido 10kA, suelo de Resistividad de 2000 Ohm-m.....	143
Figura 4.21	Menú Principal del Programa ATP.....	145
Figura 4.22	Modelado de la Puesta a Tierra con electrodo distribuido, para simulación de la Respuesta Transitoria usando el Programa ATP.	146

CAPITULO 5:

Figura 5.1	a), b) Modelo de PT aproximado a Línea de Transmisión con Ionización. Método Convencional.....	149
Figura 5.2	a), b) Tensiones transitorias en punto de inyección a PT, conductor de 20 m en suelos de $100\Omega\text{-m}$. y $1000\Omega\text{-m}$. con ionización. Modelo convencional [62].....	153
Figura 5.3	a), b) Distribución de corriente de impulso en el conductor de PT de 20m en suelos de $100\Omega\text{-m}$ y $1000\Omega\text{-m}$ con ionización. Modelo convencional [62].....	154
Figura 5.4	a) Esquema del fenómeno de Ionización para Electrodo de Puesta a Tierra.....	155
Figura 5.4	b) Circuito equivalente PI de Puesta a Tierra aproximado a la LT con Ionización de suelo dependiente de la corriente. Modelo de PT en [67].....	155
Figura 5.5	Perfil ilustrativo de la Resistividad dinámica con el proceso de ionización del suelo, propuesto en el Modelo de [67].....	156
Figura 5.6	Esquema simplificado para la impedancia de PT con electrodo de varilla vertical, mostrando zonas de ionización y desionización...	158
Figura 5.7	Resistividad del suelo en función de la variación de la densidad de corriente, para suelo homogéneo de 150 Ohm-m . Modelo de [67].	165
Figura 5.8	Esquema del sistema experimental usado en la Universidad de	

	Upsala para determinación de la existencia de la Resistividad Residual en Ionización del suelo.....	169
Figura 5.9	Resistividad Residual vs Resistividad del suelo original, en la región de ionización para corrientes máximas en experimentos de [62], [67], [66] y Universidad de Upsala (Suecia).....	171
Figura 5.10	Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, sin Ionización.....	173
Figura 5.11	Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, con ionización del suelo como aumento ficticio del radio del conductor. Modelado de [62].....	173
Figura 5.12	Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, con ionización del suelo dependiente de la corriente. Modelado de [67].....	174
Figura 5.13	Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, con ionización del suelo dependiente de la corriente o Resistividad residual del 7%. Modelado de [66].....	175
 CAPITULO 6:		
Figura 6.1	Modulo de Impedancia Dinámica de PT en suelos con baja y alta Resistividad, variables con la Permitividad eléctrica para electrodo de 50 m.....	180
Figura 6.2	Electrodo de Puesta a Tierra con varilla vertical en suelo de dos capas.....	182
Figura 6.3	a), b) Tensiones de impulso en Varilla de PT con suelo de 2 capas, corriente de impulso rápido 10 kA. Modelo de PT aproximado a LT.....	183
Figura 6.3	c) Tensión máxima en extremo de PT con Varilla de 3,0 m en suelo de 2 capas, Corriente de impulso rápido 10 kA. Modelo de PT por TL distribuido en dos capas.....	184
Figura 6.4	Configuración de PT con electrodo de conductor horizontal	

	de cuatro ramales en suelo de dos capas.....	184
Figura 6.5	a) y b) Tensiones de impulso en PT con electrodo de 4 ramales ortogonales en suelo de 2 capas, inyección de corriente de 10 kA. Modelo de PT por TL.....	185
Figura 6.6	a), b), c) Variación de la Impedancia de PT con electrodo horizontal, en función de la longitud y frecuencia en suelo de 1000 Ohm-m, regulado por la Longitud Eficaz.....	188
Figura 6.7	a) y b) Tensiones máximas en electrodo de PT horizontal, suelo de 1000 Ohm-m, inyección de corriente de 10 kA. Modelo de PT aproximado a LT.....	189
Figura 6.8	Configuración de Puestas a Tierra con arreglos mediante electrodos horizontales ramificados en pie de Torre de las Líneas de Transmisión.....	192
Figura 6.9	a), b) Impedancia Dinámica de PT mediante contrapesos en configuraciones ramificadas.....	194
Figura 6.10	Tensión Crítica de Disrupción de Cadena de Aisladores-Curva V(t) vs t, Std IEC 1243.....	198
Figura 6.11	Esquema de Circuito del Sistema de Aterramiento de las Torres de Transmisión.....	199
Figura 6.12	Tensión en cima de Torre de Transmisión de 500 kV, inyección de corriente de impulso de 20kA, para Modelo de PT aprox. a LT en suelo de 2000 Ω -m.....	201
Figura 6.13	Tensión en cima de Torre de Transmisión de 220 kV, inyección de corriente de impulso de 20kA, para Modelo de PT aprox. a LT en suelo de 2000 Ω -m.....	201
Figura 6.14	Tensión en cima de Torre de Transmisión de 138 kV, inyección de corriente de impulso de 20kA, para Modelo de PT aprox. a LT, en suelo de 2000 Ω -m.....	201

ANEXO A1:

Figura A1.1	Modelo del electrodo de PT aproximado a Línea de Transmisión con Impedancia PI distribuida.....	215
-------------	---	-----

ANEXO A2:

Figura A2.1	Circuito PI distribuido de PT, equivalente a la Línea de Transmisión..	221
Figura A2.2	Sub circuito Longitudinal de la LT	222
Figura A2.3	Sub circuito transversal de la LT.....	222
Figura A2.4	Tensiones y Corrientes en los elementos concentrados de la red equivalente que representa el electrodo de puesta a tierra.....	223

ANEXO C1:

Figura C1.1	Esquema de distribución de la corriente de rayo en los elementos de Puesta a Tierra de una LT, cable de guarda, torre y Puesta a Tierra de pie de torre.....	237
Figura C1.2	Diagrama de Enrejado desarrollado por [20], la onda de Rayo se Refleja o Refracta en los puntos de discontinuidad de transición..	238

ANEXO D: Lamina de Estructuras y armados Puesta a Tierra Típicas

Lamina 01:	LT 500 kV Nea-Noa, Estructuras típicas.....	240
Lamina 02:	LT 220 kV Vizcarra-Antamina, Estructuras típicas.....	241
Lamina 03:	LT 138 kV Huallanca-Tayabamba, Estructuras típicas.....	242
Lamina 04:	Armados de Puesta a Tierra típicas.....	243

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1:

Tabla 1.1	Zonas de mas Alta Densidad de Descargas de Rayos a tierra en el Mundo y Sudamérica	44
Tabla 1.2	Valor Pico de Corriente de Retorno del Rayo en diferentes zonas del Mundo.....	44

CAPITULO 2:

Tabla 2.1	Parámetros de electrodos de Puesta a Tierra, Modelo CIGRE....	60
Tabla 2.2	Valores de Parámetros del circuito de Puesta a Tierra-Torre para alta frecuencia, Modelo J.G. Anderson [2].....	70
Tabla 2.3	Parámetros del electrodo de Puesta a Tierra y suelos.....	79
Tabla 2.4	Calculo de Valores de R, L y C en Suelo normal.....	79
Tabla 2.5	Cálculo de Valores de R, L y C en Suelo Tratado.....	80

CAPITULO 3:

Tabla 3.1	Parámetros de los conductores y Suelo, Dimensionamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra.....	88
Tabla 3.2	Comparación de Niveles de Complejidad del Modelado de Puesta a Tierra en régimen transitorio.....	108

CAPITULO 4:

Tabla 4.1	Características y Capacidad de Conductores a Corrientes de Impulso tipo Rayo.....	113
Tabla 4.2	Características Eléctricas por Naturaleza y Tipo de Suelos.....	114
Tabla 4.3	Parámetros constantes de Electrodo PT longitudinales de 20 m y 100 m.....	117

Tabla 4.4	Características eléctricas del electrodo de PT para varias longitudes, excitada con fuente de excitación Rápida y Lenta.....	135
Tabla 4.5	Características eléctricas del electrodo de PT para varias longitudes, Resistividades de suelo e Impedancias de impulso y armados ramificados.....	140

CAPITULO 5:

Tabla 5.1	Parámetros de un electrodo de Puesta a Tierra en Modelo LT con Ionización de suelo. Método Convencional de [62].....	151
Tabla 5.2	Parámetros del suelo en proceso de ionización dependiente de la corriente par Modelo de [67].....	164
Tabla 5.3	Resistividad Residual del suelo en la región de Ionización para los experimentos de [62].....	166
Tabla 5.4	Resistividad Residual del suelo en región de ionización para los experimentos de [67].....	167
Tabla 5.5	Resistividad Residual del suelo en región de Ionización para los experimentos de [66].....	167
Tabla 5.6	Parámetros de electrodos de PT y muestra de suelos de los experimentos en la Universidad Upsala.....	169
Tabla 5.7	Resistividad Residual en región de ionización de suelo obtenidos en experimentos de la Universidad Uppsala-Suecia.....	170
Tabla 5.8	Parámetros de PT con varilla sin y con Ionización en Modelo de LT, para Ionización Convencional y Dependiente de la Corriente.....	172

CAPITULO 6:

Tabla 6.1	Impedancia de Impulso y Resistencia en CC de PT para varios tipos de suelo.....	180
Tabla 6.2	Parámetros de Puesta a Tierra con contrapesos Horizontales	

	ramificados en suelos de alta Resistividad.....	193
Tabla 6.3	Parámetros de Cables de Guarda y Torres metálicas de Líneas de Transmisión.....	196
Tabla 6.4	Parámetros de los Electrodo Horizontal Ramificados de Puesta a Tierra.....	199
Tabla 6.5	Resultados de cálculos de Tensiones y Corrientes transitorios por corrientes de impulso tipo rayo en cima y en pie de Torre utilizando el Programa ATP	200
Tabla 6.6	Tensión Critica de sostenimiento de Disrupción del aislamiento para Líneas Eléctricas, según Std 1243.....	202

GLOSARIO DE ABREVIACIONES

Símbolo	Descripción
API	American Petroleum Institute
ATP	Alternative Transient Program
NBA	Nivel Básico de Aislamiento
C	Capacitancia de la línea a la tierra (F/m).
CIGRE	Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas, creada 1921, cuenta con comités Nacionales en 56 países del mundo.
CE	Teoría de circuitos Eléctricos
DIN	Deutsches Institut for Normung, Norma Industrial General-Alemania
dx o $d\ell$	Longitud incremental de la línea (m).
EAT	Extra Alta Tensión
E_c	Campo Eléctrico crítico que produce corona o ionización (kV/m)
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i> (Programa de Transitorios Electromagnéticos)
EPRI	Electric Power Research Institute
f	Frecuencia de onda (ciclos/s o Hz)
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Método de Elementos finitos
ϵ_r	Permitividad eléctrica relativa
G	Conductancia Eléctrica (siemens/m).
GFD	Ground Flash Density (Densidad de descarga a Tierra)
$I(t)$ o I_0	Corriente de descarga atmosférica (kA).
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineering
IFFT	Transformada Rápida Inversa de Fourier
I_c	Corriente limitante para inicializar una ionización del suelo (A).
J_c	Densidad de corriente crítica para inicio de ionización (A/mm ²)

L	Inductancia de la línea (H/m).
LT	Línea de Transmisión
LE	Líneas Eléctricas
MATLAB	Matrix Laboratory (software de simulación)
MOM	Método de Momentos
NESC	National Electrical Safety Code Handbook
NEC	National Electrical Code o NFPA
NFPA	National Fire Protection Association
NN	Nube a Nube
NT	Nube a Tierra
PT	Puesta (s) a Tierra
p.u.	por unidad
ρ	Resistividad del Suelo
R	Resistencia del electrodo de PT (Ω ó Ω/m).
R_o o R_{DC}	Resistencia medida a baja corriente y baja frecuencia (Ω).
σ	Conductividad eléctrica
STI	Sobretensión de Impulso
STII	Sobretensión de impulso inverso
TEM	Transitorio Electromagnético
TC	Teoría de Circuitos Eléctricos
TCE	Teoría de Campos Electromagnéticos
TL	Teoría de Líneas de Transmisión
TN	Tierra a Nube
\mathfrak{F}	Transformada de Fourier
\mathfrak{F}^{-1}	Transformada inversa de Fourier
V	Tensión de operación (kV).
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker, Norma específica electro-electrónica-Alemana.
V_c	Tensión Crítica de flameo a temperatura y presión estándar.

μ_0	Permeabilidad magnética del vacío.
μ	Permeabilidad magnética.
UNE	Una Norma Española, conjunto de normas tecnológicas creadas por los Comités Técnicos de Normalización (CTN)
v	Velocidad de la onda en el suelo o aire (m/s).
ω	Frecuencia angular (rad/s)
Z	Impedancia de la línea (Ω).
Z_C	Impedancia característica (Ω).
Z_s	Impedancia de impulso (Ω).
Y	Admitancia transversal (Mho/m)
α	Angulo de apantallamiento ($^\circ$).
δ_r	Densidad relativa del aire.
Δt	Tiempo incremental (intervalos discretos) (sS).
Γ_1	Coefficiente de Reflexión de Onda en una línea de transmisión.
Γ_2	Coefficiente de Refracción de una Onda en una línea de transmisión.
γ	Constante de propagación de la Onda viajera.

CAPÍTULO 1

PLAN PARA EL ESTUDIO DEL MODELADO Y ANÁLISIS PREVISTOS

1.1 Antecedentes

Los sistemas eléctricos de potencia constituyen un elemento fundamental en el desarrollo económico y social de las grandes ciudades modernas y países, debido a su demanda creciente, por lo que es necesario que evolucionen dentro de los niveles de calidad y continuidad más rigurosos, dado que en ciertas circunstancias cuando ocurren descargas atmosféricas cerca o sobre una Línea Eléctrica se producen disturbios que en muchos casos pueden conducir a interrupciones no programadas, ocasionando restricciones del suministro de energía; la sobretensión desarrollada en la cadena de aisladores, cuando supera el nivel del aislamiento, ocasiona falla que puede producir salida de servicio.

Por lo indicado, en la operación del sistema de transporte de energía eléctrica, las descargas atmosféricas son consideradas eventos electromagnéticos de mayor relevancia, que se asocian a salidas de servicio, cuyos indicadores generales están entre el 10% y 40% del total de desconexiones. En las estadísticas de operación de las Líneas Eléctricas del SEIN del Perú, las desconexiones de las Líneas de Transmisión atribuibles a los rayos están en el orden del 20% al 25%. Este indicador es un factor importante que evidencia que en las zonas de incidencia de descargas atmosféricas, las Puestas a Tierra (PT) deben diseñarse para respuesta dinámica con valores pequeños de Impedancias Transitorias, para obtener sobretensiones controlables al nivel del aislamiento y lograr un bajo número de salidas. Esto permite ubicar el estudio de la Puesta a tierra con Respuesta Transitoria ante Rayos, como un tópico relevante para mejorar la eficacia de las soluciones técnicas al problema

Las normas y recomendaciones nacionales e internacionales sobre puestas a tierra recogen una serie de criterios relativos a la seguridad de las personas y a los equipos e instalaciones, pero no abordan el tema de respuesta dinámica ante la disipación de corrientes de régimen transitorio.

El sistema de puesta a tierra debe ser capaz de tolerar corrientes de falla a tierra durante el tiempo de despeje, sin deteriorar sus propiedades mecánicas ni eléctricas. También debe ser capaz de dispersar corrientes de alta frecuencia provenientes de descargas atmosféricas o por actuación de los pararrayos, sin producir diferencias de potencial

significativas que puedan ocasionar fallas o el deterioro prematuro del aislamiento en las instalaciones eléctricas, líneas de transporte de energía o en plantas industriales.

Las Puestas a Tierra no extensas para protección contra los rayos, están conformadas por conductores eléctricos simples en diferentes armados o configuraciones geométricas, solas o combinadas, debidamente enterradas en el suelo según la Figura 1.1.

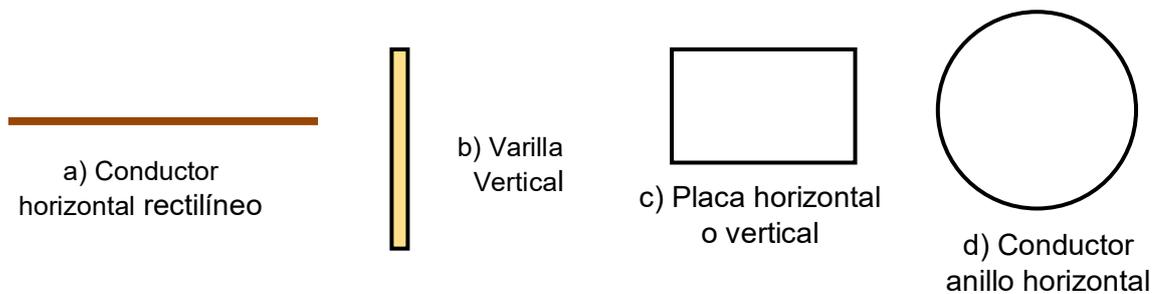


Figura 1.1 Armados de electrodos simples de Puesta a Tierra.

1.2 Planteamiento del Problema

Cuando ocurre un evento de rayo en una instalación con Puesta a Tierra (PT), se produce una gran elevación de potencial local, con una gran energía transitoria que es la causa principal de una falla o daño del aislamiento. Para reducir dicho riesgo, se debería diseñar la PT de modo que su respuesta transitoria sea capaz de disiparse, sin que las corrientes de choque del rayo provoquen un valor elevado de la onda de retorno.

El problema de la puesta a tierra en respuesta transitoria, se formuló hace muchos años por [14] y [12] entre otros, pero la complejidad de las soluciones y de los métodos matemáticos involucrados, unida a la carencia de ordenadores, hacía difícil el uso de los modelos analíticos de diseño de puesta a tierra para respuesta transitoria.

El presente trabajo modela y logra aplicaciones de puesta a tierra con respuesta transitoria ante caída de rayos, como medida de protección del aislamiento de los Sistemas Eléctricos, especialmente de Líneas de Transmisión (LT); para tal efecto se selecciona un modelo eficaz a fin de obtener la impedancia estática y de impulso que corresponde a una adecuada respuesta transitoria. En tal sentido, las propuestas de cálculo, materia del presente estudio, han adoptado el Modelado de la Puesta a Tierra basado en la teoría de la Línea de Transmisión (LT). Se presentan los fundamentos del modelado, el modelado propiamente dicho, así como aplicaciones mediante simulaciones en régimen transitorio, mediante la utilización del programa ATP.

Como antecedentes de los análisis precedentes, en el Modelo de la Teoría de Campos

Electromagnéticos (TCE) se han desarrollado distintos trabajos; entre otros [32], [35], [38], [43], [46], [47]; mientras que en el Modelo que adopta la Teoría de Líneas de Transmisión han sido presentados otros trabajos por [44], [45], [54], [58], y en relación al Modelo que aplica la Teoría de Circuitos Eléctricos (TC) también se han dado otras iniciativas por [28], [30], entre otros.

Como parte de la revisión de los antecedentes, el comportamiento de estos modelos fue evaluado y analizado respecto a la variación de los parámetros con: la longitud del electrodo; la frecuencia de la onda de impulso; y las características del suelo. Todo ello para determinar la respuesta en tensión y corriente, mediante el uso de programas convencionales, MATLAB y ATP.

1.2.1 Marco del Problema

El tema materia del presente trabajo, se ha conceptualizado bajo los criterios siguientes:

1. El análisis de Puestas a Tierra en su Respuesta Transitoria, con aplicación a la protección del aislamiento contra descargas tipo Rayo, aún no ha sido logrado en forma satisfactoria.
2. En el diseño de Líneas Eléctricas con Protección Focalizada Contra Rayos, ya se utilizan algunos Modelos de “Puestas a Tierra de Respuesta Transitoria Controlada”, soluciones aproximadas sin resolver la ecuación de Ondas Electromagnéticas. Estas soluciones dan márgenes de incertidumbre altos, que se refleja en las tasas de salida de las Líneas por descargas de rayos. Además, en nuestro país no son del dominio general por su alto costo de investigación y de su aplicación.
3. En nuestro medio, no existen normas ni pautas oficiales de diseño de PT con respuesta transitoria controlada para la inhibición de las descargas inversas, producidas por caída del Rayo; además, en la cátedra universitaria solo es posible abordar el tema en forma sucinta y con mínimo soporte analítico, por ser un tema muy especializado.

1.2.2 Marco Teórico del Modelado

El presente trabajo tiene como objetivo analizar, modelar, desarrollar y seleccionar las características de un modelado de Puesta a tierra para aplicaciones generales con Respuesta Transitoria ante las ondas de corriente de Rayo, tomando como referencia el estado del arte en el tema.

1.3 Justificación y Objetivos de la Tesis

Dentro del alcance del marco del problema, se presenta un exámen y diagnóstico a modelados de Puesta a tierra (PT) con respuesta en alta frecuencia, sin resolver las ecuaciones de Onda con aplicación a la ingeniería actual en América Latina, exámen y diagnóstico de modelados de Puesta a tierra (PT) con respuesta dinámica a las Corrientes de Impulso tipo Rayo existentes, lograr directrices para seleccionar un modelado eficaz a fin de obtener la impedancia estática y de impulso, con una adecuada respuesta transitoria y efectuar el análisis de Respuesta Transitoria para el diseño de Puestas a Tierra con aplicaciones confiables a proyectos de ingeniería, con límites de aproximación o control respecto al fenómeno real; con ello se avizora mejorar la confiabilidad y continuidad de las Líneas Eléctricas en la operación de los Sistemas de Potencia ante la incidencia estacional de rayos.

En esta Tesis se efectúa la comparación de los niveles de complejidad y precisión entre los modelados de PT con respuesta dinámica a Corrientes de Impulso, se selecciona al modelo aproximado a Línea de Transmisión (LT) como el más eficaz, confiable y menos exigente en el análisis matemático; evidenciando sus ventajas comparativas. Finalmente, se examinan diversos armados de Puestas a Tierra no extensas para la protección de Líneas Eléctricas contra descargas de rayo, intentando lograr una contribución básica para futura elaboración de la Norma Técnica contra Rayos, en nuestro país.

El trabajo que se propone, asimismo comprende lo siguiente:

- Examinar los estándares y Normas relativas a Sistemas de Protección contra los Rayos (*Lightning Protection Systems-LPS*) utilizados a nivel internacional.
- Focalizar el análisis del Modelo de Puesta a Tierra aproximado a LT con énfasis en la Respuesta Transitoria ante las descargas de Rayo, para lograr un modelo eficaz con aplicaciones en la ingeniería.
- Efectuar recomendaciones para diseños de Puesta a Tierra (PT) con respuesta transitoria ante descargas de Rayos, destinadas a la protección del aislamiento de Líneas de Transmisión Eléctrica.

1.4 Organización de la Tesis

El texto de la Tesis se ha desarrollado en siete secciones o capítulos, para abordar el análisis de la problemática planteada, cada sección comprende los siguientes tópicos:

En el capítulo 1, se presenta los criterios generales de la necesidad del modelado y análisis de la respuesta transitoria de Puestas a Tierra no extensas, definición del problema, Justificación del estudio del tema y revisión de los Estándares en lo referente a la protección del aislamiento contra rayos.

En el capítulo 2, se presenta una evaluación de la práctica actual de protección de las Líneas Eléctricas contra descargas de Rayo, usando técnicas convencionales, como los modelados de la CIGRE, JG Anderson y Circuito R-C; estos han resuelto los fenómenos transitorios sin la aplicación de la Teoría de Ondas Electromagnéticas. Posteriormente en cada modelo se hace una evaluación analítica mediante simulaciones, para armados típicos de PT con Respuesta Transitoria aplicando el Programa ATP.

En el capítulo 3, se examina los modelos para el cálculo de la Resistencia de puesta a tierra en C.C., luego se efectúa un examen a modelados de Puestas a Tierra bajo transitorios tipo rayo más importantes; tales como, Modelados por Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Líneas de Transmisión (TL) y Teoría de Circuitos Eléctricos (TC); seleccionando al modelo de PT aproximado a LT como tema principal de la Tesis, por ser más accesible en los análisis y por el rigor físico matemático para los análisis de Transitorios.

En el capítulo 4, se ha desarrollado el modelado de PT con respuesta transitoria frente a la descarga de Rayos aproximado a Línea de Transmisión (LT), por su simplicidad y eficacia para los análisis y diseños; se propone una metodología para el cálculo de los parámetros del electrodo de PT, con simulaciones para el cálculo de la Impedancia dinámica y las tensiones de impulso ante las corrientes de Rayo, terminando con discusiones de los resultados, y comparación de casos.

En el capítulo 5, se han evaluado los criterios, el análisis y la necesidad de considerar el efecto de la ionización del suelo en el modelado de las Puestas a Tierra, con simulaciones y aplicaciones para casos específicos; asimismo con la data de pruebas existentes se ha evaluado el comportamiento de la ionización del suelo, determinando

que en base al concepto de resistividad residual en la región de ionización, se puede modelar la PT con respuesta transitoria.

En el capítulo 6, se ha desarrollado análisis transitorios de las Puestas a Tierra para estructuras de Líneas de Transmisión, con aplicaciones prácticas de diseño asociado a la respuesta transitoria, como soporte para prever la protección del aislamiento de Líneas de Transmisión en 138 kV, 220 kV y 500 kV.

En el capítulo 7, se consignan las conclusiones más importantes del trabajo y las recomendaciones para la exploración de futuras iniciativas.

1.5 Estado actual de la Normatividad sobre Puesta a tierra

El primer intento de normar la Puesta a Tierra, corresponde al *American Institute of Electrical Engineers-AIEE* (predecesor del actual *Institute of Electrical and Electronic Engineers-IEEE*), con la publicación del artículo "*Application Guide on Methods of Substation Grounding*"-1954, luego en 1961 el Estándar 80, basado en los trabajos de *H.B. Dwight, J.R. Eaton, R. Rüdénberg, E.D. Sunde, P.G. Laurent, Koch, Schwartz* y otros autores; quienes propiciaron mediante conferencias, el conocimiento sobre los sistemas de "Puestas a Tierra" para instalaciones eléctricas.

En 1986 se publicó la versión mejorada del *AIEE Standard 80*, en dos artículos bajo el título "*Safe substation grounding*", el primero presentado en el *Summer Power Engineering Society Meeting-1980*, estableciendo como criterios de diseño, los valores máximos admisibles de las diferencias de Tensión que pueden existir en el suelo de una subestación eléctrica durante una falla, y exponía los distintos factores a ser considerados en toda instalación de PT; el segundo, presentado en el *Winter Power Engineering Society Meeting-1982*, trataba sobre el diseño de redes de PT, formadas por electrodos horizontales y verticales; incluyó la elección de materiales e instrucciones sobre el modo de efectuar las conexiones de los componentes.

En la actualidad, se cuentan con varias publicaciones de Protección contra Rayos por instituciones especializadas; tales como la *NFPA, IEEE, IEC, VDE, UNE, National Lightning Safety Institute (NLSI)* y otros; en el Anexo A-0, se citan las normas más utilizadas en el tema de puesta a tierra y protección contra Rayos a nivel internacional; no obstante, el tema de Respuesta transitoria tiene muy poca aplicación.

En el Perú no se cuenta con Normas específicas de protección contra los rayos ni normas para Sistemas de PT asociada a este objetivo; el presente trabajo proporciona criterios, parámetros y límites de aplicación; así como, perspectivas para futuros estudios e iniciativas en ese tema.

1.6 Breve Descripción de la Física del Rayo y sus efectos

El estudio de la puesta a tierra con respuesta transitoria a los Rayos, análisis y modelado; requiere del conocimiento de la física del Rayo, efectos y riesgos, en esta sección se presenta un breve repaso respecto a este tema.

1.6.1 Composición de la Atmósfera Terrestre

La tierra y el cinturón de iones positivos (Ionósfera) imponen la existencia de un campo eléctrico permanente en el aire; la Ionósfera contiene plasma y por la radiación solar está siempre ionizada, en estas condiciones los electrones libres solo pueden existir por periodos cortos de tiempo, antes de ser capturados por un ión positivo cercano.

a) Capas de la atmósfera terrestre

La atmósfera de la tierra está conformada por capas: la **Tropósfera**, es envolvente con un espesor aproximado de hasta 12 Km, en esta se produce la formación de las nubes, tales como los cumulus-nimbus que producen precipitaciones de lluvias y presenta las descargas atmosféricas; la **Estratosfera**, tiene un espesor aproximado de 12 km a 50 km, esta capa es básicamente de ozono y presencia de Rayos Cósmicos; la **Mesosfera**, tiene un espesor aproximado de 50 km a 80 km, esta capa es de aire enrarecido y vacío de gran intensidad electromagnética; la **Ionosfera o Termosfera**, tiene un espesor aproximadamente de 80 km a 500 km, en esta capa las moléculas de gas se encuentran en un estado transformado de la materia, cargada de electrones, capaces de transportar energía, en la parte superior la temperatura llega aproximadamente a 1000°C en [79].

1.6.2 Teorías Válidas de la Física del Rayo

Benjamín Franklin (1706-1790), demostró que las nubes contenían electricidad con carga negativa y algunas veces carga positiva, por mediciones del signo de la carga captado por las varillas o puntas pararrayos, en su experimento de la caja centinela.

Con los escasos conocimientos y equipos del siglo XIX, el físico inglés **Charles T.R. Wilson** (1869-1959) fue el primero en efectuar mediciones de campo eléctrico y tras realizar observaciones de numerosas tormentas a cierta distancia, concluyó que **la estructura**

básica de una nube de tormenta era la de un dipolo, luego **George C. Simpson** (1878-1965) estableció que la discrepancia entre la forma polar del dipolo, obedece a que rara vez se mide la carga en una nube de tormenta; y en general de las mediciones del campo eléctrico de la nube, se infiere que la parte superior tiene carga positiva y parte inferior carga negativa, condición predominantes pero no restrictiva.

1.6.3 Modelados de las Nubes de Tormenta como Estructura Dipolar

El primer modelo se desarrolló a principios de la década del 30, se basó en mediciones a nivel del suelo, en ese modelo, las cargas en la nube forman un dipolo con una región positiva conteniendo una carga total localizada sobre o bajo una región de carga negativa, como se muestra en la figura 1.2 y 1.3.

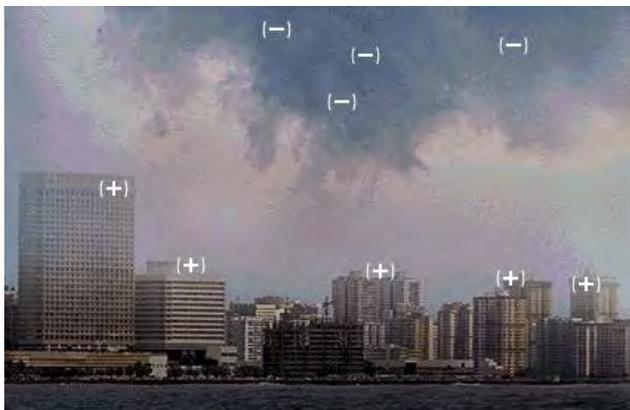


Figura 1.2 Formación de carga dipolar de una nube tormenta (video, caso real).

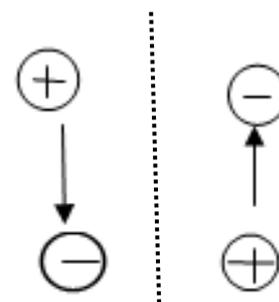


Figura 1.3 Convención de signos de campos eléctricos de una nube tormenta dipolar.

Los investigadores para explicar la teoría de la estructura dipolar de las nubes de tormenta, propusieron dos modelos diferentes: el de precipitación y el de convección.; estas dos teorías fueron desarrolladas por Martin A. Uman en 1987 y se resumen a continuación:

a. Modelo de precipitación

Las partículas pesadas que caen por precipitación, interactúan con las partículas livianas. El proceso carga las partículas pesadas negativamente y las partículas livianas con signo positivo, el modelo de precipitación supone que las gotas de lluvia y las partículas de granizo en una tormenta son atraídas hacia abajo por la gravedad a través del aire, dejando en suspensión gotas de agua menores y cristales de hielo que se sostenían con las corrientes de aire ascendente. De este análisis se concluye que la parte más baja de la nube acumula carga negativa y la parte superior carga positiva, es decir un dipolo positivo.

b. Modelo de convección

Se acumula carga eléctrica en la superficie de la tierra (de polaridad negativa) o en las regiones de movimiento de aire y conductibilidad variable dentro de la nube, la carga es trasladada en bloque por el flujo de aire húmedo de las tormentas que termina formando los dipolos, el experimento desarrollado en laboratorio se basa en el principio de funcionamiento del generador de Van Der Graff, en este aparato se inyecta una carga eléctrica positiva o negativa, por medio de un transformador de Alta Tensión, sobre una cinta móvil sin fin de goma, que transporta las cargas, o iones.

Este modelo supone que las cargas eléctricas de la nube proceden inicialmente de dos fuentes externas, los rayos cósmicos que inciden sobre las moléculas de aire por encima de la nube y lo ionizan y el intenso campo eléctrico en los objetos puntiagudos de la superficie de la tierra; que producen por “descarga corona” iones positivos.

1.6.4 Estructura “Doble Dipolo” de la Nube Tormenta

Desde la controversia Wilson - Simpson, investigadores como Malan y Schonland (1947) y Kasemir (1965) establecieron que la estructura básica de las nubes de tormentas no es dipolar, sino “doble dipolo”; en la Figura 1.4, se muestra una región de carga negativa (**N**) en el centro, con una región de carga positiva (**P**) encima de ella y una segunda región, menor y gregaria, de carga positiva (**P**) debajo de aquélla.

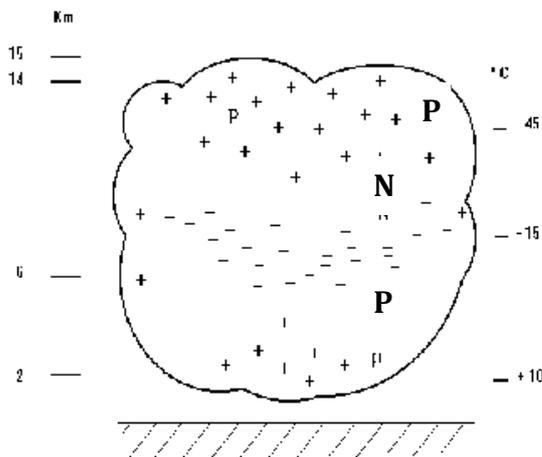


Figura 1.4 Estructura Doble Dipolo de una nube tormenta.

1.6.4.1 Deducción del Campo Eléctrico de la nube tormenta sobre el suelo

Una variación de Campo Eléctrico se considera positiva, si es atribuible a un aumento de Carga positiva, esto significaría el crecimiento del vector (**E**) dirigido hacia abajo, de la misma manera, será negativa si una variación del campo está asociada con el aumento del vector Campo Eléctrico dirigido hacia arriba.

La nube en su parte inferior tiene carga negativa, es neutralizada por mecanismos de descarga, las cargas concentradas denominados “líder descendente” con carga negativa, concatenará con cargas positivas a nivel del suelo, como se observa en la Figura 1.5, el campo a nivel del suelo es negativo, según convención para ciertos valores de Q.

El comportamiento del campo eléctrico sobre la superficie del suelo, se obtiene resolviendo las ecuaciones de Maxwell que se aplican a la distribución; se considera una carga (+Q) a una altura (H) sobre el nivel del suelo y con el método de las imágenes, se deduce la ecuación del campo eléctrico en un punto de interés.

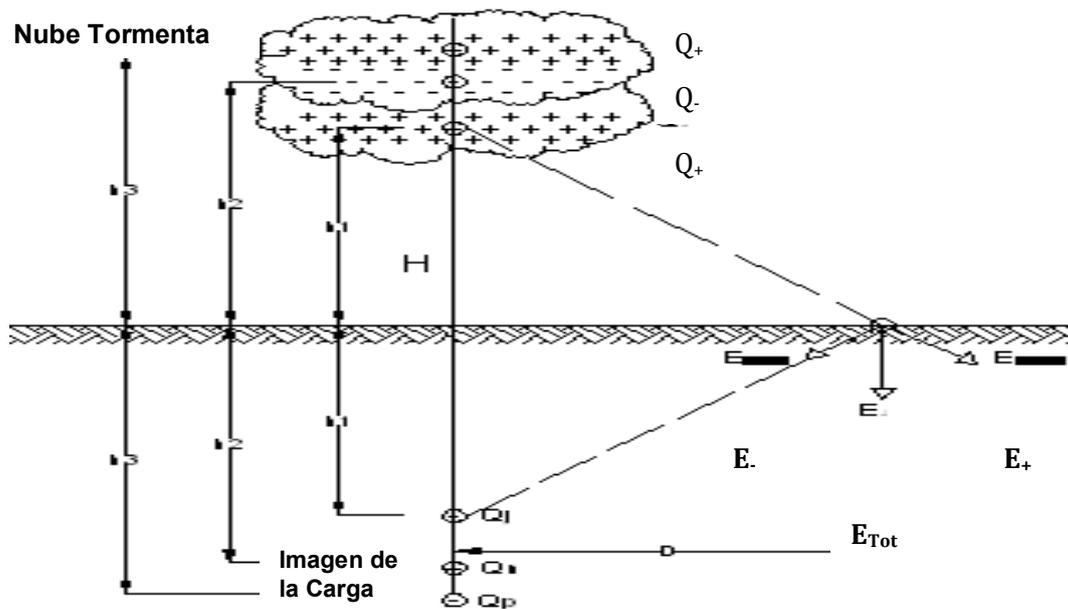


Figura 1.5 Método de imágenes para deducir el campo eléctrico de una carga sobre el suelo.

El Campo Eléctrico (E) debido a una nube tormenta de configuración “doble dipolo” con carga inferior (+Q_j) a la distancia (H_j) del plano del suelo considerado como plano conductor, sobre un punto del suelo a la distancia horizontal (D), se da en la ecuación (1.1).

$$E_+ = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 (H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (\text{V/m}) \quad (1.1)$$

Asimismo, el campo eléctrico resultante generado por la carga (+ Q_j) y su carga imagen (– Q_j), se obtiene por la ecuación (1.2). La dirección de (E_j) será perpendicular al plano y positivo según nuestra convención.

$$E_+ = \frac{2*QH}{4\pi\epsilon_0 (H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (\text{V/m}) \quad (1.2)$$

Para el modelo “Doble Dipolo” de la nube tormenta, usaremos dos centros de carga (Q_p , Q_n y Q_j) de manera que al ser consideradas aproximadamente esféricas, el campo total sea expresado por la ecuación (1.3); Si Q_p , Q_n y Q_j están en una misma línea vertical se cumple: $D_p = D_n = D_j = D$.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2Q_p * H_p}{(H_p^2 + D_p^2)^{3/2}} - \frac{2Q_n * H_n}{(H_n^2 + D_n^2)^{3/2}} + \frac{2Q_j * H_j}{(H_j^2 + D_j^2)^{3/2}} \right] \quad (1.3)$$

En el cálculo del campo eléctrico (E), se han considerado dos casos:

Caso 1.- Con $Q_p = 40$ C, $H_p = 10$ km; $Q_n = 40$ C, $H_n = 5$ km; la nube en su parte inferior tiene carga positiva, con carga $Q_j = 10$ C, 5 C y 0 C; donde C es Coulomb.

En el gráfico de la figura 1.6 a), se observa los valores de la intensidad del campo eléctrico (E) en función de la distancia (D); toma valores negativos para cargas menores a + 10 C y para $Q_j = -10$ C toma valores positivos y negativos, cuando el campo eléctrico es mayor al campo crítico del aire, se produce disrupción o descarga.

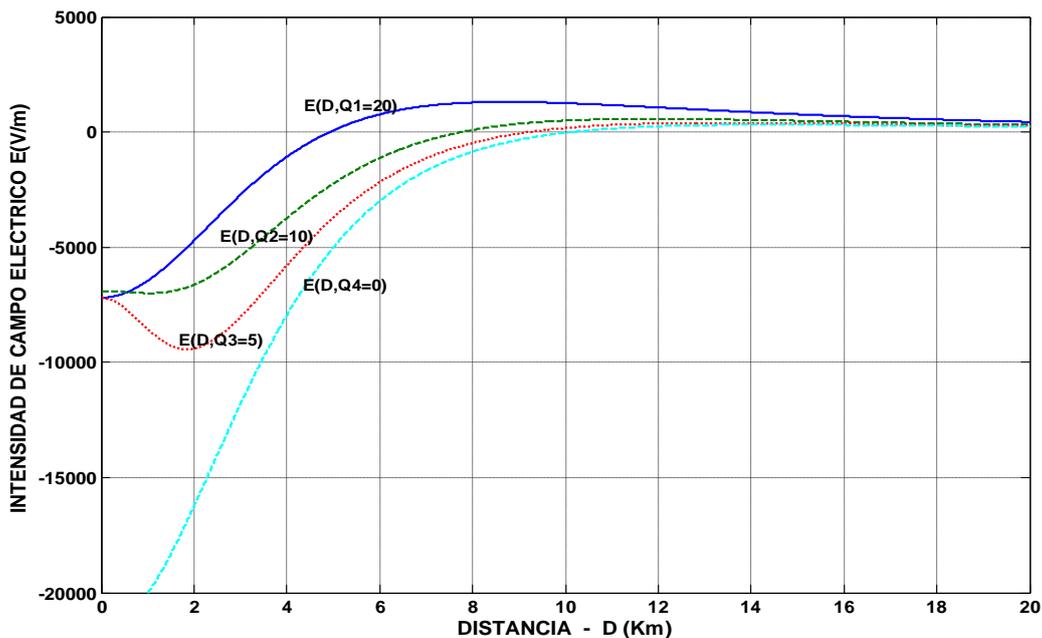


Fig. 1.6 a) Campo Eléctrico en la superficie por carga eléctrica en la atmósfera a 5 km.

Caso 2.- Con $Q_p = 40$ C, $H_p = 10$ km; $Q_n = 40$ C, $H_n = 5$ km; la nube en su parte inferior tiene carga positiva con carga $Q_j = 10$ C; se ha simulado para las cargas ubicadas a la altura $H_j = 4.5$ km, 3.5 km, 2.5 km y 1.5 km. Los resultados se presentan en la Figura 1.6 b).

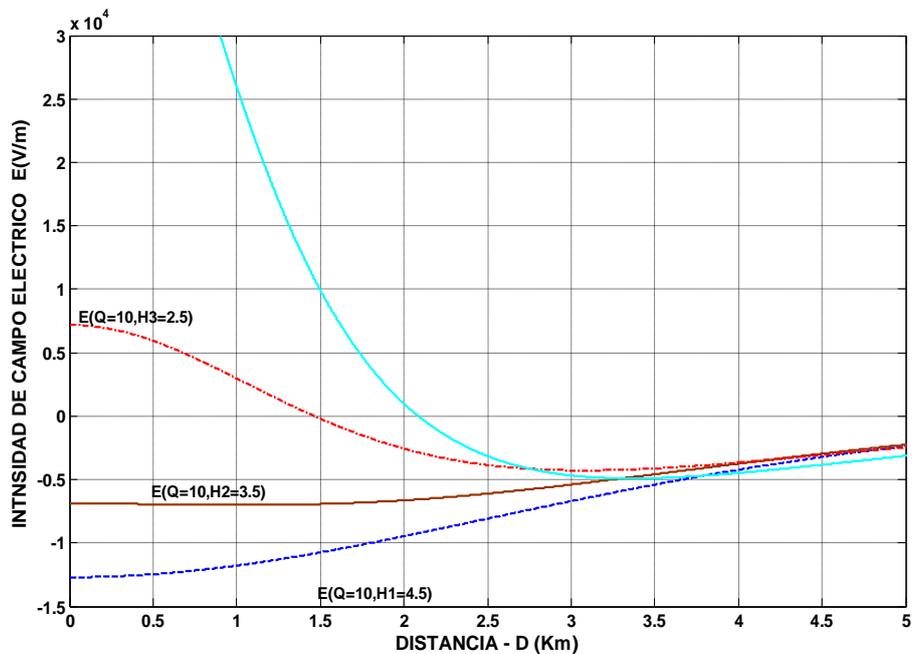


Fig. 1.6 b) Campo Eléctrico por carga eléctrica constante a diferentes altitudes

Figura 1.6 a), b) Intensidad de Campo Eléctrico en la superficie del suelo (E) versus distancia lateral (D), en una estructura de nube tormenta tipo “Doble Dipolo”.

Para $Q_j = + 10 \text{ C}$ ubicado a distintas alturas, se ha calculado el Campo Eléctrico en la superficie del suelo en función a la distancia horizontal, se observa que a medida que la carga se acerca a la superficie, el campo es más intenso; para alturas comprendida entre 2.5 km y 3,5 Km, el E cambia de polaridad de positivo a negativo con valores que no ocasionaran disrupción.

Los campos eléctricos más intensos de la nube tormenta se encuentran en las fronteras superior e inferior de la capa principal de carga negativa.

1.6.4.2 Categorización del Rayo

Berger (1978) fue el primero en plantear 4 tipos de rayos en términos de la dirección de su movimiento entre nube y tierra (ascendente o descendente) y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga (positivo o negativo), como se muestra en la figura 1.7. Los tipos de descarga 1 y 3 son los más estudiados en el mundo, debido a su interés práctico.

La categoría 1- Rayos negativos nube-tierra, es la más común de acuerdo a las estadísticas disponibles a nivel mundial, mas del 90% de las descargas son de esta categoría. En zonas o regiones o micro-climas específicos los análisis experimentales muestran casos aislados en

que los rayos pueden ser próximos al 100%. La **categoría 3**-Rayos positivos nube-tierra es complementaria.

La **Categoría 2** implica rayos ascendentes positivos nube-tierra y la **Categoría 4** conforma los rayos ascendentes negativos nube-tierra

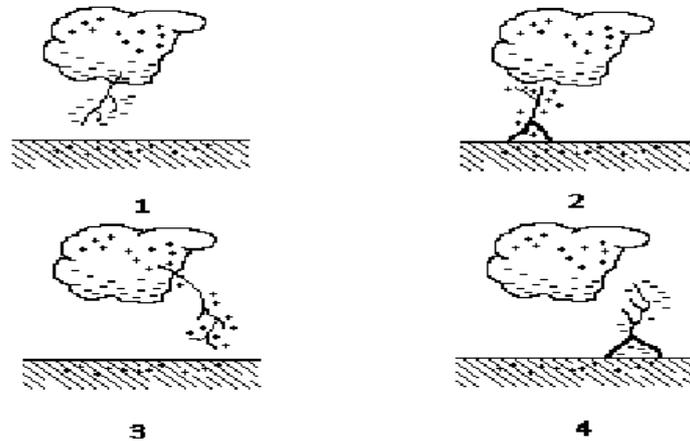


Figura 1.7 Categorías del rayo (1, 2, 3 ,4) según Berger.

1.6.5 Descargas Eléctricas o Rayos

Cuando el campo eléctrico o el potencial entre centros de carga de la nube hacia un centro en el aire superan el valor crítico, se produce el rayo o descarga eléctrica que tiende a reducir tal energía, inicia y produce una redistribución de las cargas en la nube, en el suelo y en la atmósfera.

Durante un corto período la energía electrostática acumulada es liberada como un arco eléctrico en forma de energía electromagnética (relámpago o rayo visible más ondas de radio), energía acústica (trueno) y energía calorífica. El efecto global de las corrientes de descarga se traduce en el transporte de carga negativa hacia el suelo y positiva a los niveles altos de la atmósfera, las primeras son predominantes.

a. Proceso de las descargas atmosféricas

Las cargas eléctricas en la nube, inducen a su alrededor y en tierra carga opuestas, creando un campo eléctrico que tiene un valor que varía de 400 a 500 kV/m a nivel del mar, aumentando progresivamente hasta el valor crítico de 3000 kV/m (ruptura de la rigidez dieléctrica del aire).

Durante el proceso activo de la tormenta, estos valores modifican las propiedades del entorno de aire, que se comporta normalmente como un dieléctrico, en la Figura 1.8 se muestra la polarización de las nubes respecto al suelo y el mecanismo del rayo.

Figura 1.8 Modelo conceptual de secuencia de descarga Nube-Tierra en una nube convectiva.

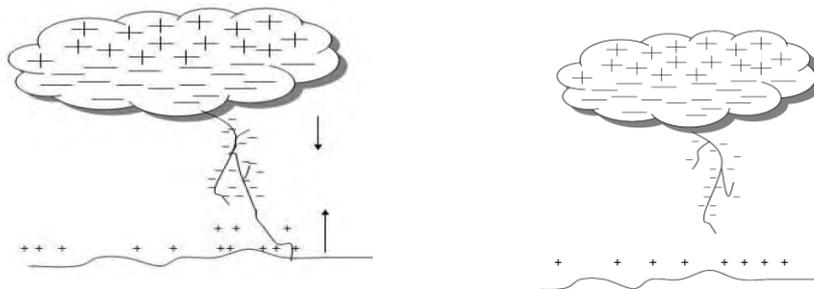
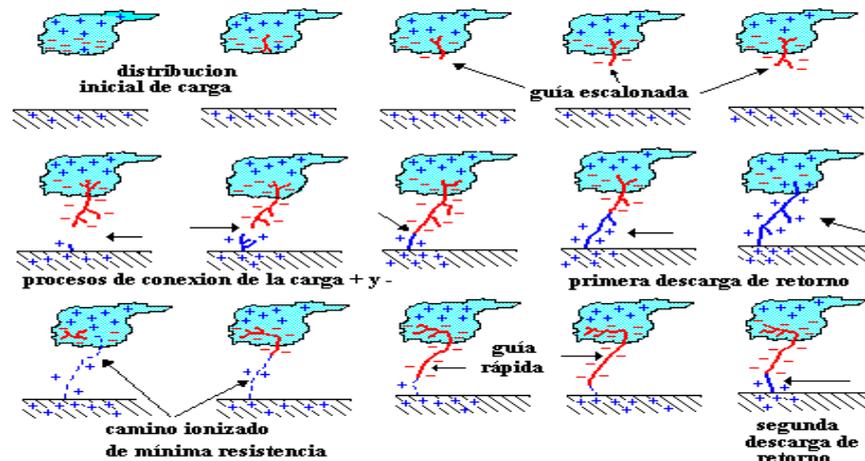


Figura 1.9 Polarización de las nubes e inicio de la Descarga de Rayo.

c. Rayo negativo Nube-Tierra (NT-)

La figura 1.9 muestra la secuencia inferida de una descarga nube a tierra, entre la región principal de carga negativa de la nube y la superficie terrestre (cargada positivamente por inducción); la descarga inicial tiende a formar un camino, que se va creando con el incremento del gradiente de potencial entre centros de carga en el aire, con sucesivos impulsos, avanzando hacia la tierra, es la llamada **guía escalonada** (step leader).

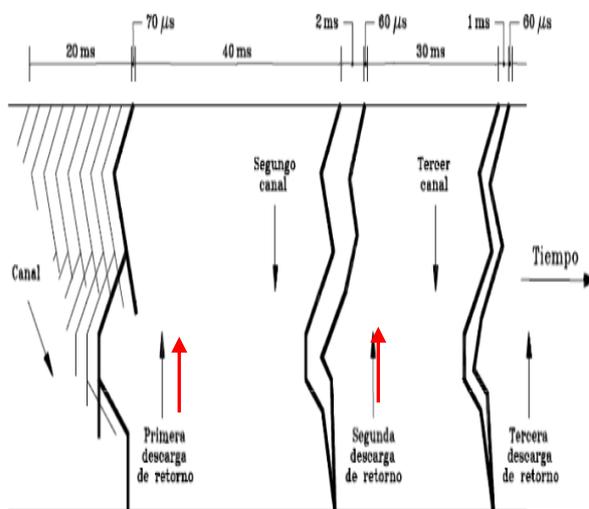
El proceso no siempre es visible a simple vista, dado que al no transportar gran cantidad de carga eléctrica, no es brillante y siendo de polaridad negativa, suele ramificarse; no obstante la mayoría de dichas ramas no llegan al suelo; el resultado final es la existencia de un camino ionizado de mínima resistencia.

Ante la proximidad del líder negativo descendente a la superficie del suelo, se van acumulando sobre ciertas zonas y puntos protuberantes, carga positiva que concatenan en función de su acumulación y distancia con el efluviio, hasta que desde uno de ellos

surge una descarga ascendente que cierra el circuito nube-tierra; y de este modo se produce la descarga principal o de neutralización entre la tierra y la nube, comprometiendo gran cantidad de plasma en el canal en un tiempo muy corto, a gran temperatura; concentrando energía calorífica y electromagnética, con los efectos luminosos y sonoros conocidos; paralelamente a lo cual pueden ocurrir descargas consecutivas N-T o T-N desde distintos centros de carga, se han llegado a detectar hasta 42 descargas secundarias por un mismo camino, la primera descarga de retorno de aproximadamente $50 \mu\text{s}$, con intervalos de aproximadamente 30 ms , como se muestra en la Figura 1.11 a), b).



Figura 1.10 Foto de la izquierda muestra la polarización de las nubes con descargas N-N y N-T, la foto de la derecha muestra descarga N-T.



a) Esquema de formación de canales de descarga de rayo variando en el tiempo.

b) Formación de canal de la primera descarga de rayo positivo (N-T).

Figura 1.11 Distintas etapas de la descarga de un Rayo Nube-Tierra, afinidad del rayo con objetos metálicos elevados.

De estudios realizados en otras latitudes, se conoce que las descargas atmosféricas ocasionan aproximadamente un 26% de las desconexiones de líneas eléctricas de 230 kV y de un 72% en líneas eléctricas de tensiones inferiores.

1.6.6 Observaciones sobre el comportamiento del Rayo

Se han efectuado numerosos estudios a nivel mundial; tales como [1], [2], [5], [6], [8] que indican que el comportamiento del rayo es específico de cada lugar, por ejemplo en el Principado de Andorra-España (1999 al 2004), ubicado entre 1900 y 2400 msnm, en una área mayor a 32 km², se ha confirmado que estos pueden seguir una trayectoria caótica y siempre predominan en ambientes eléctricos cargados, generando chispas dentro de su trayectoria donde la intensidad y situación del Campo Eléctrico pueden cambiar radicalmente proporcionando trayectorias laterales de más de 17 Km entre los puntos de contacto.

El estudio de la densidad de impacto de Rayo en el suelo, realizados en [4] indica que no siempre depende de la Resistencia específica del suelo, ni de la altura; a partir de los estudios y observaciones en el Principado de Andorra, se concluye lo siguiente:

- De 473 rayos analizados en los estudios de [4] se obtiene: 21 impactos fueron positivos (Tierra-Nube), es decir el 5% (a mayores latitudes es del 10%), 452 impactos fueron negativos (Nube-Tierra) representando el 95 %; lo que confirma que las descargas de rayo son mayoritariamente negativas.
- Las descargas de Rayo registradas varían de intensidad entre 9.000 a 171.000 Amperios, dicha intensidad no está relacionada con la Resistencia Específica del suelo, ni altitud o cota.
- Los terrenos en la zona del estudio son de diferente composición mineral, la Resistividad varía enormemente según la estación del año, pasando de 10 Ohm-m a valores de 100 Ohm-m en invierno a causa del hielo y en pleno verano a causa de la evaporación del agua.

CAPÍTULO 2

CRITERIOS Y PRÁCTICA ACTUAL PARA PROTEGER LÍNEAS ELÉCTRICAS CONTRA RAYOS

Un adecuado Sistema de Protección Contra Rayos de las Líneas Eléctricas depende de varios factores. Los de orden primario, corresponden a los niveles de tormenta con probabilidad de caídas de rayo, dado por: Niveles Ceráunicos o Isoceráunicos, Densidad de caída de Rayos, características geológicas, topográficas y climáticas. La presencia de Rayos posibilita la descarga a los conductores de la línea y estructuras, los efectos están influenciados por los parámetros de Ondas de Choque por descarga.

A la línea eléctrica se le debe dotar de dos sistemas de protección, una externa de interceptación de rayos, mediante cables de guarda (jaula de Faraday) y otra de Protección interna de derivación a tierra contra sobretensiones provocadas en los conductores; ambos respaldados por una Puesta a Tierra de baja Impedancia, que asegure la dispersión de las corrientes y sobretensiones producidas por el Rayo.

La corriente pico y la carga total transferida por la disrupción de una onda de rayo positiva, es mucho mayor que la producida por una onda de rayo negativa. El rayo positivo es de particular interés, porque según registros sus corrientes son más grandes; en los estudios de CIGRE se indica que cerca del 5% o menos de rayos negativos comprenden corrientes superiores a 100kA, los Rayos positivos tienen posibilidad de lograr valores cerca a 200 kA. El más amplio registro de datos de ondas de corriente de rayos fue obtenido por Karl Berger en el periodo de 1950 a 1970 en dos estaciones montadas en el Monte San Salvatore en Lugano, Suiza.

2.1 Características Eléctricas del Rayo

El número de descargas varía en cada lugar y es totalmente aleatorio, solo es posible obtener información estadística en base a registros y datos históricos retrospectivos, los parámetros del Rayo están representados por:

2.1.1 Niveles Isoceráunicos

Un día de tormenta se define como aquel en el que se escucha el trueno, aunque no se produzca descarga atmosférica ni lluvia en dicho lugar; éstos conforman curvas de igual nivel cerámico (Td), dicha información se registra en mapas Isoceráunicos, en la Figura 2.1 se presenta los Días de Tormentas Promedio/año en el Mundo (*World Lightning Map with Average World Thunderstorm Days/Year*), datos de registro satelital que se vienen haciendo en

los últimos 20 años; también se hacen mediciones directas por el método de Búsqueda Direccional (DF) o de Tiempo de Llegada (TOA) éstas registran la frecuencia de rayo, fecha de ocurrencia, hora, localización, UTM, número de descargas, estimación de la corriente pico y polaridad; también hacen un plano con curvas de igual Densidad de caída de Rayos a tierra (Ng).

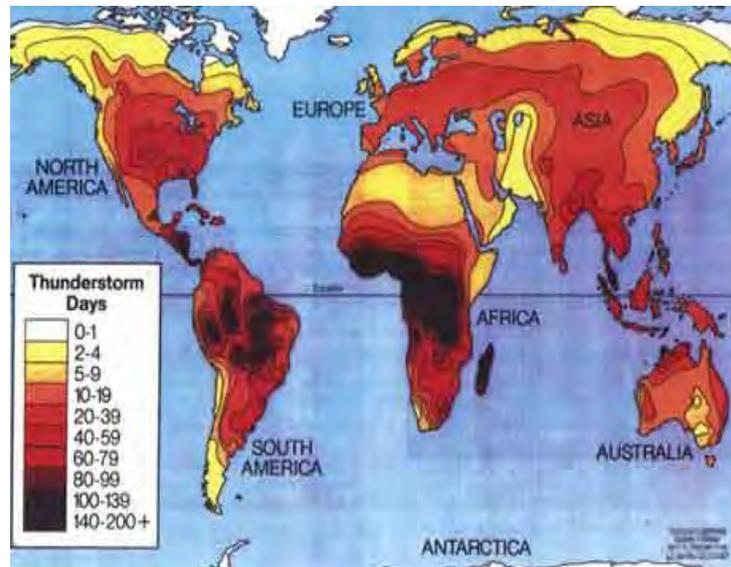


Figura 2.1 Mapa de Registro de Días de Tormenta promedio /año en el mundo (*World Lightning Map*).

Fuente observatorios de la NASA.

En muchos países como el Perú, por carecer de registros históricos de tormentas de rayo, se utiliza el indicador del nivel ceráunico básico (Td), que corresponde al número de días del año en el que se perciben o escuchan tormentas.

En la Figura 2.2 se muestra el Mapa de Niveles Isoceráunicos del Perú [9], con la base de datos de campo (1973-1990), datos promedio satelitales, información localizada, registros dispersos (hasta 2005) compatibilizados con las cuencas fluviales, la geografía y la orografía territorial.

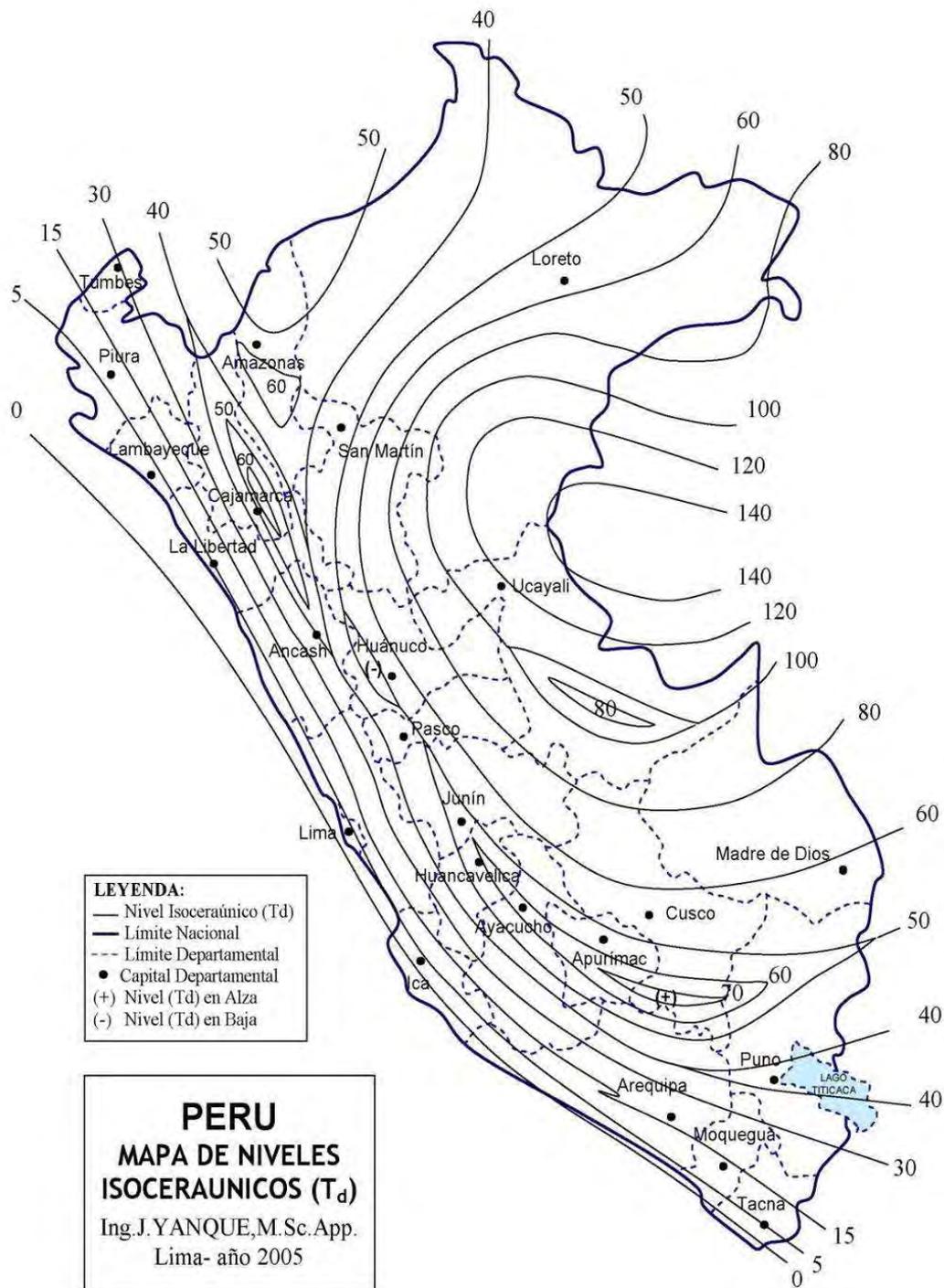


Figura 2.2 Mapa de Nivel Isoceraúnico del Perú.

2.1.2 Densidad de Descargas de Rayo a Tierra (Ng)

Los mapas de Densidad de Descargas (Ng) de Rayo/km²/año (*Ground Flash Density - GFD*), pueden derivarse de los niveles isoceraúnicos (Td) o de los registros automáticos, estos últimos proveen mucho más detalle, exactitud y confiabilidad, los mapas se desarrollan en cada país o por estudios de la NASA; en la Figura 2.3 se muestra el Mapa de Densidad de Rayos a Tierra (*Ground Flash Density-GFD*) Rayos/km²/año en tiempo real de un instante.

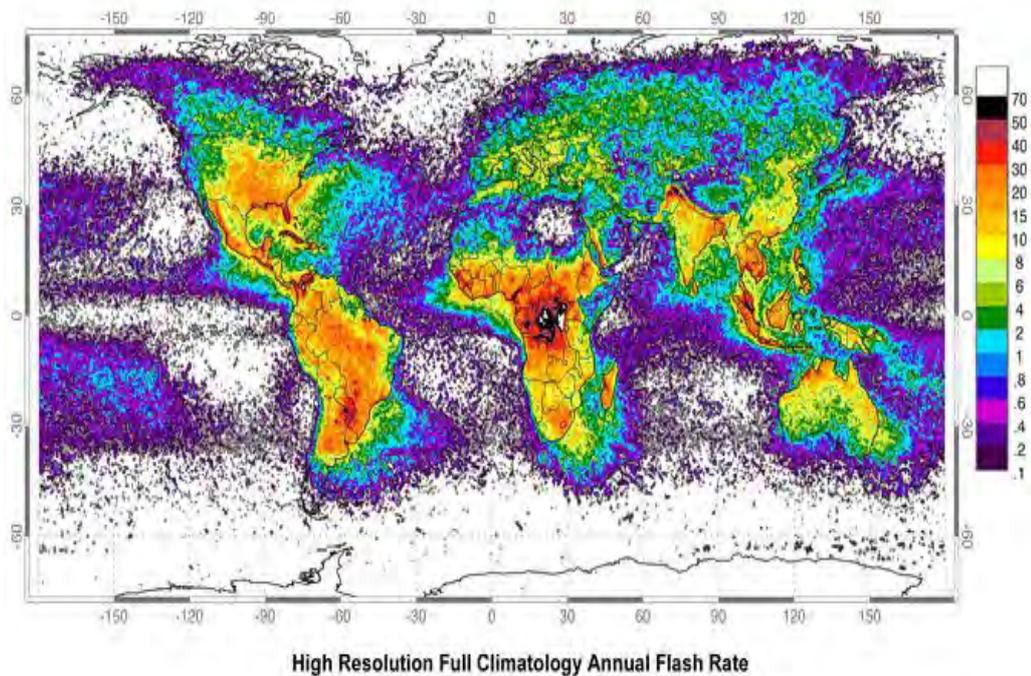


Figura 2.3 Mapa de Densidad de Rayos/km²/año en el mundo, periodo 1993-2003, fuente observatorios de la NASA.

Cuando no se dispone de registros (N_g), estos pueden ser calculados mediante expresiones empíricas usando las ecuaciones dado por.

$$N_g = K * T_d^a \quad (2.1)$$

Donde:

- N_g : Densidad de descargas a tierra (Rayos/Km²/año)
- T_d : Nivel cerámico de la zona (días de tormenta/año)
- K y a : Constantes de ajuste (k=0.04, a = 1.25)

Efectuado el ajuste de las constantes por Erikson se ha obtenido la ecuación (2.2.1), que ha sido adoptado por la CIGRE y la Standard IEEE 1410; asimismo, se ha obtenido la ecuación (2.2.2) calculado por JG Anderson y adoptado por la IEC.

$$N_g = 0.04 * T_d^{1.25} \quad (2.2.1)$$

$$N_g = 0.12 * T_d \quad (2.2.2)$$

Donde:

- N_g : Densidad del Número Total de Rayos a Tierra (Rayos/km²-año)
- T_d : Nivel Cerámico (días de tormenta al año).

2.1.3 Influencia de la Cota de la Estructura a caída de Rayos

El primer factor de una Ruta de Línea de Transmisión que afecta la caída de Rayos, es la altura de la estructura, especialmente si son más altas que el terreno circundante. Al incrementar la altura de la torre, se tienen dos efectos importantes: más descargas son atraídas por la torre y el desempeño del blindaje del cable de guarda cambia.

El número de descargas de Rayo por cada 100 km de línea eléctrica (N) considerando el efecto de la altura de la torre, fue determinado por Whitehead [2] en la ecuación (2.3).

$$N = N_g * \left(\frac{4 * h^{1,09} + b}{10} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

N : N° de Rayos que caen en la Línea/100 km/año

N_g : Densidad de Rayos a Tierra-GFD (Rayos/km²/año)

h : Altura de la torre (m)

b : Separación entre cables de guarda (m)

2.1.4 Magnitud de la corriente de Impulso

Los rayos generan corrientes de valores elevados y de corta duración. Los valores pico de la corriente de rayo positiva y negativa, varían entre 3 y 200 kA; en base a mediciones en diferentes partes del mundo, el Grupo de trabajo 33.01 del CIGRE, ha producido curvas que indican la probabilidad acumulada de la ocurrencia de descargas con diferentes valores de corriente en valores pico.

2.1.5 Características de la Onda de Rayo

La descarga por rayo implica el paso de una corriente eléctrica de corta duración, y alcanza su valor máximo en tiempos que varían entre 0.1 μ s y 10 μ s, luego decrece exponencialmente en intervalos entre 20 μ s y 200 μ s.

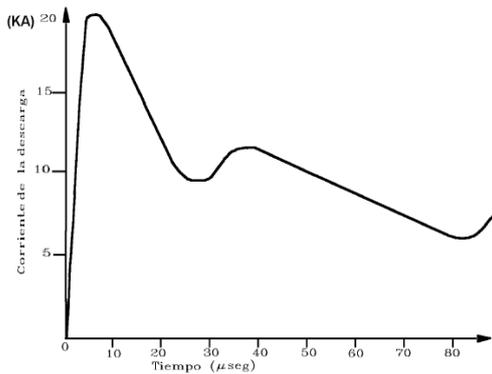
Para identificar las ondas de impulso, se toma la parte ascendente hasta el valor de cresta y luego la parte descendente, ambos como tiempos:

T_f : Tiempo de frente, tiempo en el cual la onda empezando en cero alcanza su valor máximo o pico.

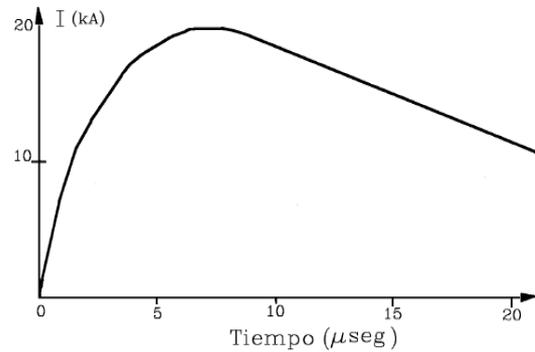
T_c : Tiempo de cola, tiempo en que la onda decrece desde el valor pico hasta el 50% de su amplitud máxima o pico.

La forma de onda de corriente doble exponencial viene representada por la ecuación (2.4) y las figuras 2.4 a) y b).

$$I(t) = I_0 * (e^{-\alpha*t} - e^{-\beta*t}) \quad (2.4)$$



a) Forma de Onda típica de Rayo



b) Forma de Onda ideal de un Rayo

Figura 2.4 Forma de Onda de Corriente Tipo Rayo

La onda de impulso de rayo estandarizada por la IEC-71 es $1.2 \times 50 \mu s$, que se muestra en la figura 2.5, esta es unidireccional y unipolar, se compone de un frente rápido lineal de onda ($t_f = 1.2 \mu s$) y un tiempo de cola ($t_c = 50 \mu s$) de suave descenso, tiene una tolerancia del 20% y 30% para abarcar a la onda ANSI ($1.5/40 \mu s$); esta forma de onda es la que se produce en los laboratorios para las pruebas de impulso y para estudiar el efecto de los rayos; se le conoce también como la onda de "Impulso Básico".

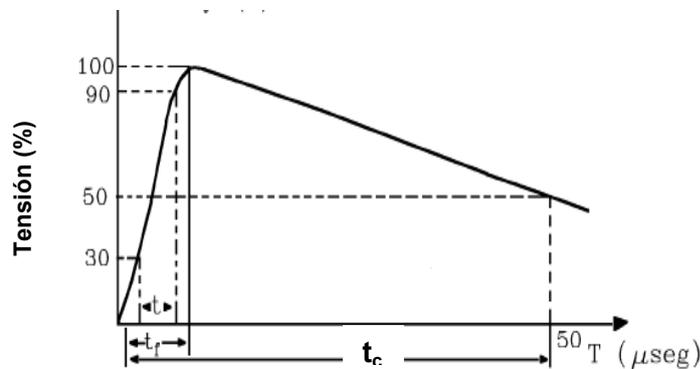


Figura 2.5 Forma de Onda de Rayo estándar IEC-71.

2.2 Fallas de Blindaje y Distancia de Disrupción por Efecto del Rayo

El aislamiento de Líneas de Extra alta Tensión (EHT) y Muy Alta Tensión (UHT) ante sollicitaciones de rayo y fallas por rayo, no representa un problema principal, como en el caso de las Líneas Eléctricas de Alta Tensión (HT); las líneas de mayor o igual Tensión a 800 kV son prácticamente a prueba de Rayo, porque el dimensionamiento por caídas de rayo no es relevante.

Las fallas de blindaje que ocasionan las descargas de rayos, se estudia dentro del análisis de la protección de las LT; estas fallas ocurren cuando un rayo cae sobre los cables de

guarda (CG), las torres o directamente sobre el conductor de fase, en cuyos puntos de contacto se desarrollarán ondas de tensión con frente escarpado extremadamente alto, que viajan en ambas direcciones a lo largo del conductor de blindaje o CG pudiendo superar el nivel de aislamiento de uno o varios aisladores y causando su flameo; la probabilidad de falla de blindaje debe ser calculada para cada diseño.

2.2.1 Modelo Electro geométrico de blindaje contra caída de Rayos a Líneas de Transmisión

El modelo electro geométrico desarrollado originalmente por Whitehead [5] es utilizado para ubicar el (los) Cable (s) de Guarda (CG) en la estructura de Transmisión y diseñar el blindaje para protección contra Rayos, como en la Figura 2.6; en una estructura con dos cables de guarda se analiza las condiciones de falla del blindaje, se evalúa para el cable de guarda G_1 y el conductor de fase C_1 , que son los componentes más expuestos al rayo. Se muestra las descargas de corrientes de rayo de igual magnitud en tres zonas, acercándose a la línea hasta una distancia (r_s) al suelo y a la línea QR (en la zona C); esta distancia (r_s) es llamada la distancia de salto o disrupción o ruptura dieléctrica, es un concepto clave en la teoría del modelo electro geométrico. Esta distancia es función de la carga y por consiguiente de la Corriente en el canal de descarga, este parámetro fue estudiado separadamente por Whitehead, Erickson, Rizk.

El Modelo Electro geométrico, desarrollado por Whitehead [5], fue incluido en el estándar IEEE 1243; las distancias mínimas de disrupción o ruptura dieléctrica para el conductor de fase (r_c) y la distancia de disrupción del cable de guarda (r_g), están dadas por las ecuaciones (2.5.1) y (2.5.2).

$$r_c = r_s = 10 * I^{0.65} \quad (2.5.1)$$

$$r_g = \beta * r_s = \begin{cases} [3.4 + 1.7 * \ln(43 - y_c)] * I^{0.65} & , \text{ Si } y_c < 40 \text{ m} \\ 5.5 * I^{0.65} & , \text{ } y_c \geq 40 \text{ m} \end{cases} \quad (2.5.2)$$

Donde:

$r_c = r_s$: Distancia de salto o disrupción (m).

I : Corriente de descarga o choque (kA).

En la misma Figura 2.6, la descarga en el área "A" puede ocurrir sólo al cable de guarda G_1 , porque sobre el arco OP la distancia al conductor C_1 excede la distancia " r_s "; asimismo la descarga en el área "C" puede ocurrir sólo a la distancia $\beta * r_s$ a tierra, porque a lo largo de la línea QR, la distancia al conductor de fase es mas grande que " r_s ".

El coeficiente β , para alta probabilidad de disrupción, permite que la distancia de disrupción o salto final al suelo sea diferente a la distancia de disrupción al conductor suspendido sobre el suelo; el valor de β usado por J.G. Anderson [2] es 0.8 para líneas EHV y 0.67 para líneas UHV. La descarga en el área B, antes que llegue al arco PQ, puede saltar sólo al conductor de fase C_1 , porque las distancias al cable de guarda G_1 (mas cercano) y tierra, excederán la distancia de disrupción r_s . Para descargas verticales, el ancho, X_s , establece el área no protegida en las cuales las descargas llegarían a contactar el conductor de fase C_1 en vez del suelo. En los casos de descargas en ángulo y suelo ondulante, X_s cambia; en los análisis Whitehead utilizó la suposición de descargas sólo verticales dejando de lado las correcciones.

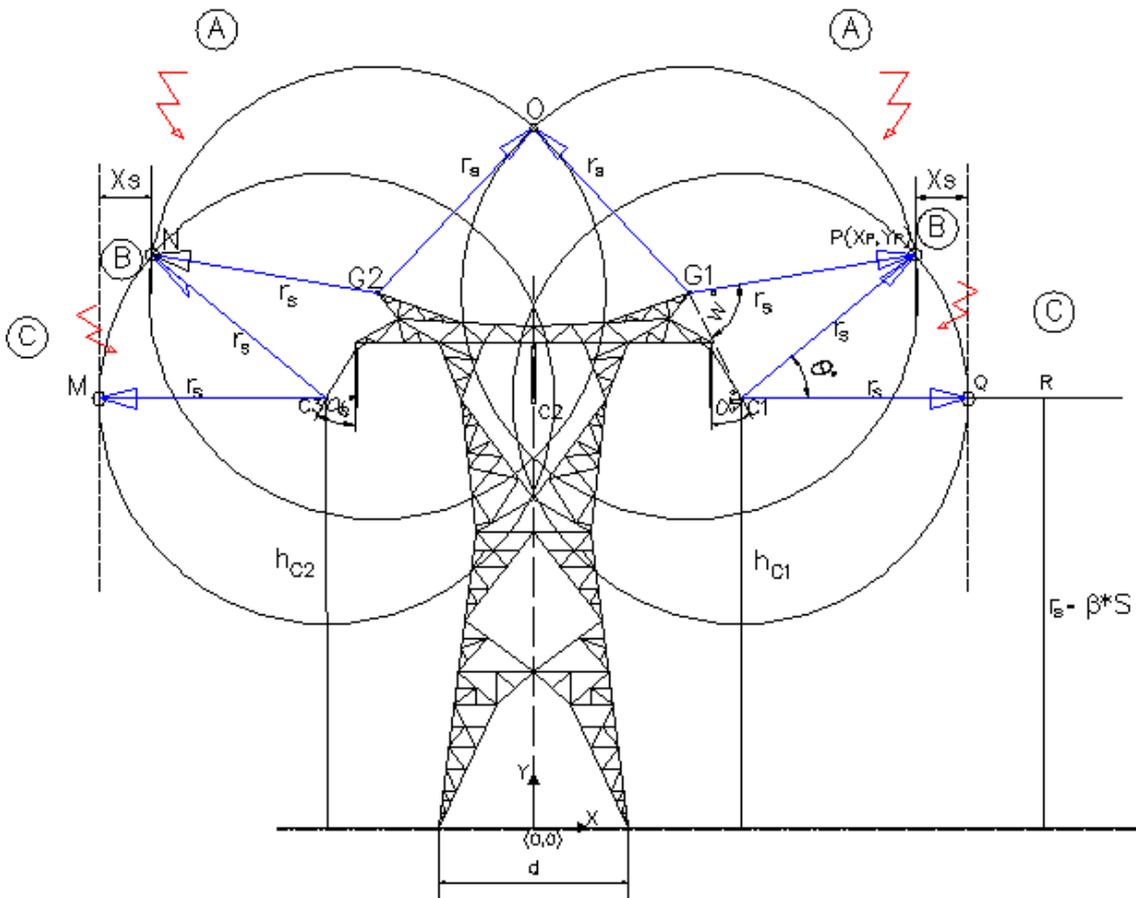


Figura 2.6 Modelo Electro geométrico para Blindaje de Líneas Eléctricas, Área (A) Blindaje incompleto, ancho X_s no es cubierto ante descargas de Rayo, Área (B) saltos al conductor de fase C_1 (mas expuesto).

Si el cable de guarda se acerca al conductor de fase, una condición óptima será alcanzada, cuando el arco PQ no protegido desaparece y cualquier descarga entrante no puede alcanzar al conductor de fase, como se muestra en la Figura 2.7. Esto resulta un ángulo (α_E) de protección efectivo. Si r_s es conocida, y si $\beta * r_s > h_{c1} = Y_{c1}$, una solución

trigonométrica se obtiene para el ancho (X_s) de zona no protegida, su valor esta dado por la ecuación.

$$X_s = r_s * [\cos \theta + \sin (\alpha_s - \omega)] \quad (2.6)$$

Donde:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\beta * r_s - Y_1}{r_s} \right) \quad (2.6.1)$$

$$\omega = \arccos \left(\frac{d}{2r_s} \right) \quad (2.6.2)$$

$$\alpha_s = \arctan \left(\frac{X_1 - X_{G1}}{Y_{G1} - Y_1} \right) \quad (2.6.3)$$

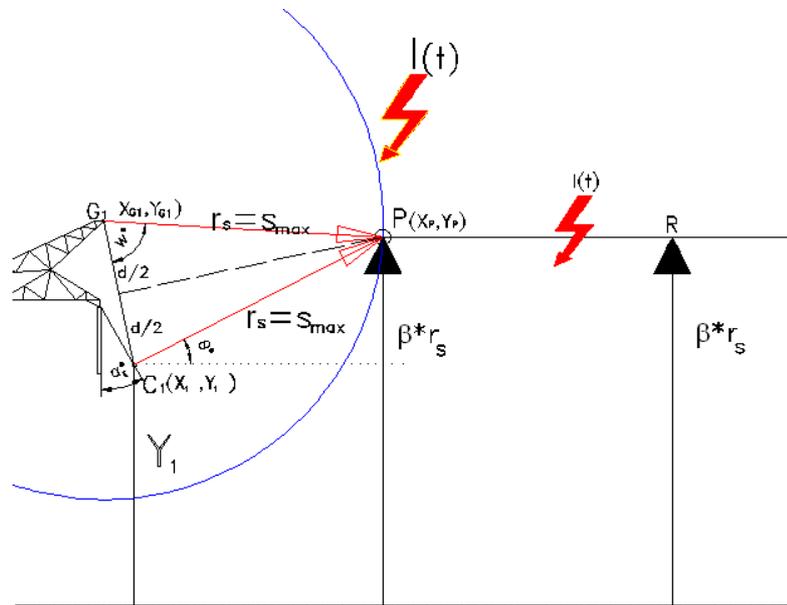
Si $\beta * S < Y_{C1}$, $\cos \theta$ debe ser igual a la unidad, y

$$X_s = r_s * [1 + \sin (\alpha_s - \omega)] \quad (2.7)$$

2.2.2 Protección Efectiva de Líneas de Transmisión

Para lograr una condición de protección efectiva (Figura 2.7), el diseñador por lo general propone sostener al conductor de fase fijo y mover el cable de guarda horizontalmente hasta que el ancho sin protección, X_s , sea reducido a cero.

Figura 2.7 Modelo Electro geométrico para fallas de Protección a Rayos. BLINDAJE EFECTIVO – ancho no protegido X_s se reduce a cero.



En la condición de blindaje efectivo se tiene que $X_s = 0$, las coordenadas del conductor de fase C_1 en la condición de la cadena de aisladores sin oscilación es (X_{C1}, Y_{C1}) ; cuando ocurre oscilación de la cadena de aisladores por efecto del viento, las nuevas coordenadas del punto C_1 es (X_1, Y_1) y las coordenadas del cable de guarda G_1 es (X_{G1}, Y_{G1}) con respecto al eje de coordenadas $(0,0)$ de la torre de la Figura 2.6.

El ángulo de oscilación de la cadena de aisladores se calcula por:

$$\alpha_{OSC} = \arctan\left(\frac{W_{Cond} + W_{Cad Aisl}}{P_{v-Cond} + P_{v-Cad. Aisl}}\right) \quad (2.8.1)$$

Las coordenadas de C_1 se calculan por las ecuaciones (2.8.2 al 2.8.4):

$$X_1 = X_{C1} + L_c * \text{Sen}(\alpha_{OSC}) \quad (2.8.2)$$

$$Y_1 = Y_{C1} + L_c * (1 - \text{Cos}(\alpha_{OSC})) \quad (2.8.3)$$

$$X_1 - X_{G1} = \sqrt{r_s^2 - (\beta * r_s - Y_1)^2} - \sqrt{r_s^2 - (\beta * r_s - Y_{G1})^2} \quad (2.8.4)$$

El ángulo efectivo de blindaje, α_E , se calcula por la ecuación (2.9).

$$\alpha_E = \arctan\left(\frac{X_1 - X_{G1}}{Y_{G1} - Y_1}\right) \quad (2.9)$$

Dónde:

W_{Cond} , $W_{Cad Aisl}$: Peso del conductor de la Fase C_1 y cadena de aisladores respectivamente (Kg/m)

P_{v-Cond} , $P_{v-Cad Aisl}$: Presión del viento sobre el conductor de la Fase C_1 y Presión del viento sobre la cadena de aisladores respectivamente (Kg/m)

α_{osc} : Ángulo de oscilación de la cadena de aisladores ($^\circ$)

L_c : Longitud de la cadena de aisladores (m)

Para ángulos de blindaje positivos, X_{G1} del cable de guarda estará a la izquierda del conductor de fase C_1 , según se muestra en la figura 2.6.

2.2.3 Cálculo de Corriente de disrupción por falla de la Protección contra Rayos

Si la protección no es eficaz, ocurrirán fallas; para optimizar la protección, se debe calcular las dimensiones para la ubicación adecuada de los cables de guarda respecto a los conductores de fase y al suelo; se calcula la corriente de Rayo mínimo (I_{min}) para la fase C_1 (fase más expuesta) que ocasiona descarga sobre el aislador, dado por:

$$I_{min} = \frac{2V_c}{Z_s} \quad (2.10)$$

Dónde:

I_{min} : Corriente (kA) mínima de Rayo para falla del aislamiento

V_c : Tensión crítica (kV) de flameo ("flashover") del aislador, en la Figura 6.10 se muestra el sostenimiento de una cadena de aisladores en función del tiempo para flameo, con una onda de Impulso de Tensión estándar-IEEE 1243.

Z_s : Impedancia de onda del conductor de fase, incluyendo efecto corona

Reemplazando la I_{\min} en la ecuación (2.5), se calcula la distancia de interrupción mínima, $r_{S \min}$, para aquella fase, con $r_{S \min}$ en la ecuación (2.6) o (2.7) se calcula el ancho no protegido X_s . En la figura 2.7, la longitud de la línea $\overline{C_1P}$ se aproxima a $r_{S \max}$ para la mayoría de los casos prácticos, es otra hipótesis válida del modelo Electro geométrico; entonces la solución cuadrática para $r_{S \max}$ se simplifica y se calcula por.

$$\overline{S} = \left(\frac{-B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s C_s}}{A_s} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

$$r_{S \max} = S_{\max} = Y_0 * \overline{S} \quad (2.11.1)$$

$$Y_0 = \frac{Y_{G1} + Y_P}{2} \quad (2.11.2)$$

$$A_s = m^2 - m^2 \beta - \beta^2 \quad (2.11.3)$$

$$B_s = \beta(m^2 + 1) \quad (2.11.4)$$

$$C_s = (m^2 + 1) \quad (2.11.5)$$

m : Pendiente de la línea $\overline{C_1P}$, según la figura 2.7

$$m = \frac{X_P - X_{C1}}{Y_P - Y_{C1}} \quad (2.11.6)$$

El valor aproximado de S_{\max} se obtiene multiplicando el valor \overline{S} por Y_0 , este es una función sólo de m y del coeficiente β ; para líneas EHV se usa $\beta = 0.8$ y para líneas de UHV, $\beta = 0.67$; estos valores son establecidos por la industria y los proyectistas. En la Figura 2.8 se ha graficado S_{\max} vs m (para diversos valores de β) buscando proponer una gama de soluciones.

En este punto, la corriente de dispersión mínima y máxima que puede causar un flameo (*flashover*) por falla del apantallado, es calculada considerando que el ancho de la zona no protegida (X_s), está asociada a la corriente mínima; mientras que para la corriente máxima (I_{\max}), el valor de X_s se reduce a cero; el ancho promedio no protegido es $X_s/2 = \overline{X}_s$ (dado por otros autores), con él se calculó la I_R de falla de protección. El número de descargas que causan falla de protección (N_{SF}) según [2] se calcula por el número más probable de rayos/100 Km/año, fallando dentro \overline{X}_s el cual es multiplicado por la diferencia de las probabilidades a la I_{\min} y a la I_{\max} con ocurrencia de descargas, el valor se calcula por.

$$N_{SF} = 0.012 * T * \frac{X_s}{2} * [P(I_{\min}) - P(I_{\max})] \quad (2.12)$$

Donde

N_{SF} : Número de fallas de protección (rayos/100 Km/año),

T : Nivel ceraúnico (días de tormenta o truenos al año),

X_s : Ancho sin protección (m),

$P(I_{min})$: Probabilidad que una disrupción excederá I_{min} , y

$P(I_{max})$: Probabilidad que una disrupción excederá I_{max} .

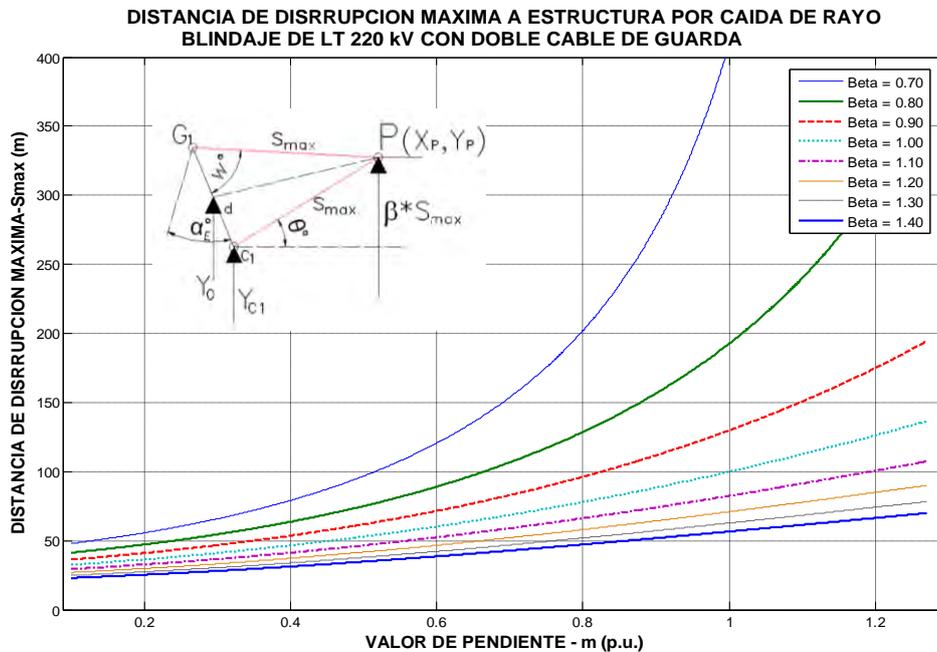


Figura 2.8 Distancia de disrupción máxima por caída de Rayo para una LT 220 kV con dos Cables de Guarda.

La ecuación (2.12) involucra a un cable de guarda (G_1) y un conductor de fase (el más expuesto, C_1) para la Fig. 2.6, en forma idéntica se calcula para los otros conductores de fase que también son expuestos. El valor de falla de protección de cada componente es añadido separadamente para encontrar el valor total de falla de protección. Luego, este valor es restado del número total de disrupción N_S , para determinar el número total de disrupciones disponibles a ser usado en los cálculos de descarga inversa (*back flashover*).

2.3 Impacto de Rayo en la cima de la Estructura

Consideraciones para el análisis:

- Las descargas de los Rayos se orientan aproximadamente en un 60% hacia los soportes metálicos de las líneas, por su altura, forma y material; más aún, si tienen cable de guarda.

- Se asume que la corriente de rayo recorre el soporte hacia la Puesta a Tierra (PT), la impedancia de la estructura o de la bajada conectada a la PT, determinan los fenómenos de propagación.
- La PT debe tener una Impedancia de valor adecuado, que permita la dispersión de la corriente al suelo; valores altos originan Sobre-tensiones de Impulso reflejadas y ellas ocasionan fallas inversas o “*Backflashovers*”, ver figura 2.9.
- Las fallas por flameo o interrupción Inversa puede darse en diversas formas, aun para líneas con estructuras en doble terna: a) falla simple, afecta una o ambas fases del nivel más bajo. b) falla múltiple, puede afectar a todas las fases en todos los niveles.

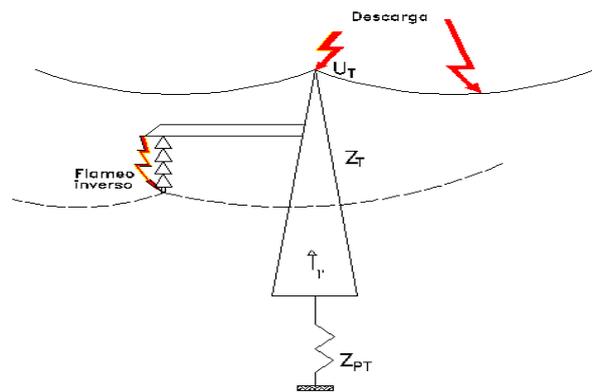


Figura 2.9 Flameo Inverso causado por una descarga sobre una Torre.

- El resto de la corriente de rayo viaja a ambos lados del cable de guarda dispersándose en las estructuras adyacentes hasta anularse, aproximadamente hasta la estructura N° 6. Ver figura 2.10.

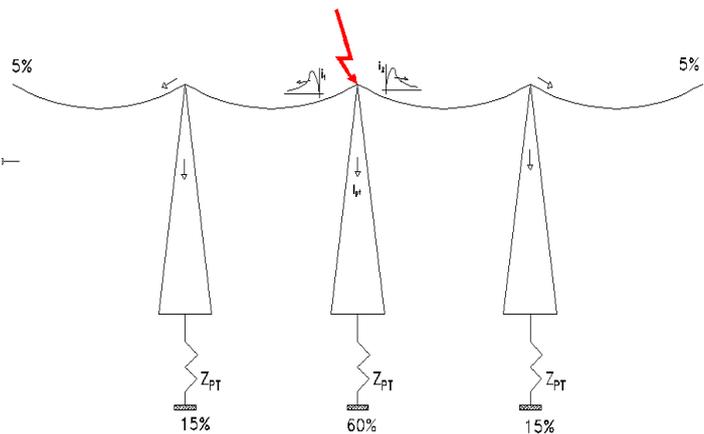


Figura 2.10 Caída de Rayo en estructuras de una Línea Eléctrica con Cable de Guarda.

- La impedancia de la PT al Impulso de rayo depende del armado que opera, es función de la corriente y el tiempo de propagación del frente de onda.
- En líneas de Extra Alta Tensión (EAT), ocurren pocos casos de interrupción Inversa por Sobre Tensiones de Rayo, debido al mayor nivel de aislamiento (BIL) externo.

- La Tensión que produce corona en el cable de guarda (U_G) se alcanza aproximadamente a $U_G = 1.8 \cdot U_{SI}$, el gradiente crítico de cese del efecto corona en el aire E_c , es cercano a 1500 kV /m.

- La Sobre tensión en la cima de la estructura $U_T(t)$ depende de:

- La Magnitud y forma de la onda de corriente de Rayo.
- La impedancia de la PT para la condición más desfavorable se da sin la ionización del suelo, siendo mas favorable con ionización del suelo.
- La Impedancia equivalente del cable de guarda con el efecto corona (ionización del aire).
- Configuración de conductores en el soporte.
- Distorsión de los parámetros de la red: capacitancia (cambia con los potenciales), L no cambia.
- La Tensión la cima de la Torre, esta dado por:

$$U_T = \frac{Z_T Z_G}{Z_T + Z_G} * I_R(t) + \frac{Z_T - Z_G}{Z_T + Z_G} * L \frac{dI_R(t)}{dt} \quad (2.13)$$

Para el caso de la LT 220 kV, se puede estimar la Tensión en la cima de la Torre, con 20 kA, $Z_t = 180 \Omega$, $Z_g = 400 \Omega$, el valor de U_T se tiene:

$$U_T = 180 * 200 * 20 \text{ kV} / (180 + 200) = 1894.74 \text{ kV}$$

- En análisis más complejos para estos fenómenos, se calcula la Tasa de Fallas Inversas en una línea eléctrica.

- La sobretensión en la ménsula $U_A(t)$ que soporta la cadena de aisladores depende de:

- Sobretensión en la cima de la Torre.
- Nivel de aislamiento de la cadena de Aisladores
- El valor instantáneo de la tensión de fase $U(t)$
- La inductancia equivalente de la Torre $L = 0,5 \mu\text{H/m}$
- El factor de acoplamiento entre conductores (k)

En la práctica actual para la Protección de las Líneas Eléctricas ante Rayos, se utilizan Modelos Convencionales de PT; en los acápites siguientes, se analizará la respuesta a las corrientes de rayos y su incidencia en la protección del aislamiento, los modelos mas utilizados se conocen como: Modelo CIGRE de Puesta a Tierra, Modelo R-L de Puesta a Tierra de JG Anderson, Modelo de circuito R-C de Puesta a Tierra.

2.4 Modelado CIGRE de Puesta a Tierra en Alta Frecuencia, Circuito R-L//R

2.4.1 Modelado y Parámetros de la Impedancia de Puesta a Tierra

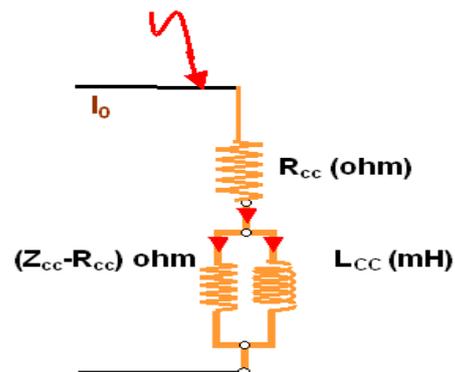
La Puesta a Tierra (PT) para respuesta ante Ondas de Rayo, se comporta como una Impedancia Transitoria, variando desde su valor inicial reactivo hasta el valor de Resistencia de estado estable o R_{CC} ; en la figura 2.11 se muestra el modelo analógico CIGRE de una Puesta a Tierra.

El electrodo de PT ante una onda de corriente de impulso presenta una impedancia inicial de impulso, que depende del armado y de las condiciones del suelo alcanzando, valores promedio de 100 Ohm a 200 Ohm y cuando termina su propagación a través del electrodo de PT, dicha Impedancia de impulso (Z_{CC}) se reduce hasta el valor de su Resistencia de dispersión (R_{CC}) o de estado estacionario, ver Figura N° 2.11. El tiempo depende del tamaño del conductor de PT y la velocidad de propagación de la descarga es cercana a la de la luz, y de los efectos de las reflexiones sucesivas en los puntos de transición o discontinuidad, produce el efecto “retardador”; dicho tiempo depende de la altura de la torre y longitud del electrodo en su recorrido de ida y vuelta [18].

El Modelo de PT CIGRE considera que la velocidad de propagación de la onda es del orden de 1/3 de la velocidad de la luz (c), de modo que en un electrodo horizontal de 305m, la impedancia de impulso es aproximadamente 150 ohm, este valor luego decae a la R_{CC} en el tiempo de 6.1 μ S; del mismo modo, un conductor contrapeso de 75 m tienen una Impedancia de Impulso de 150 ohm, este valor se reduce a su R_{CC} en un tiempo de 1,5 μ S.

En la figura 2.11 se presenta el circuito equivalente de la Impedancia de Puesta a Tierra dinámica propuesto por la CIGRE 2004.

Figura 2.11 Circuito equivalente de Impedancia de Puesta a Tierra (PT) con Respuesta Dinámica, Modelo CIGRE.



- El valor de la Inductancia (L_{CC}) del circuito se ha seleccionado para el transitorio al 95% en el periodo de tiempo, igual a $6 \cdot \ell / c$, la velocidad de la onda (v) seleccionada se hace igual a 67.1 m/ μ S, el intervalo de tiempo (t) para la prueba del circuito se calcula por : $t = 2 \cdot \ell / v$

Donde

ℓ : Longitud de recorrido de la onda de ida y retorno (m)

v : Velocidad de la onda (m/ μ S)

t : Tiempo de viaje de la onda (μ S)

El tiempo de propagación para longitudes típicas del electrodo se ha calculado:

$$\ell = 15 \text{ m} \implies t = 0,447 \mu\text{S} \quad \text{y} \quad \ell = 20 \text{ m} \implies t = 0,596 \mu\text{S}$$

- Para un modelado más real, la velocidad de propagación de la onda de corriente en el suelo se calcula por $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ en (m/s) donde C es la capacitancia y L es la

Inductancia del electrodo de PT en comportamiento transitorio.

- La Tensión en un extremo del electrodo de PT, por inyección de una onda de corriente de impulso de la Figura 2.15, se obtiene por la expresión de E (s) en el dominio de Laplace (s), por:

$$E(s) = [R_{cc} + \frac{(Z_{cc} - R_{cc}) * L_{cc} * s}{Z_{cc} - R_{cc} + L_{cc} * s}] * I \quad (2.14)$$

Donde:

s : Operador de Laplace ($s = j\omega$), con coeficiente de amortiguamiento = 0.

R_{cc} : Resistencia propia del conductor de PT (Ω), se calcula según [12]

L_{cc} : Inductancia del circuito (H)

Z_{cc} : Impedancia de onda o impulso del conductor de PT (Ω)

$$\boxed{Z_{cc} = Z_o = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (2.15)$$

- La tensión en la PT debido a la corriente de impulso en el dominio del tiempo, se calcula por la relación siguiente.

$$E(t) = Z(t) * I \quad (2.16)$$

$$E(t) = [R_{cc} + (Z_{cc} - R_{cc}) * e^{-\alpha * t}] * I$$

- Finalmente, la Impedancia Dinámica o Impedancia transitoria de la PT para el Modelo propuesto por CIGRE, se calcula por.

$$Z(t) = \frac{E(t)}{I} \quad (2.17.1)$$

$$Z(t) = R_{cc} + (Z_{cc} - R_{cc}) * e^{-t/\tau} \quad (2.17.2)$$

$$Z(t) = R_{cc} + (Z_{cc} - R_{cc}) * e^{-\frac{t}{2 * l * 10^{-8}}} \quad (2.17.3)$$

Donde:

ℓ : Longitud del electrodo conductor o contrapeso de PT (m)

t : Tiempo de viaje de la onda (s)

R_{cc} : Resistencia del contrapeso en cc (Ω)

- El valor de la inductancia L_{CC} se ha seleccionado para obtener el valor de “ α ” y se logre la convergencia de la impedancia transitoria $Z(t)$; dicho valor de “ α ” se ajusta con la constante de tiempo del circuito y se calcula por.

$$\alpha = \frac{Z_{cc} - R_{cc}}{L_{cc}} = \frac{Z_{cc} - R_{cc}}{2l * (Z_{cc} - R_{cc})} = \frac{1}{2 * l * 10^{-8}} \quad (2.18)$$

El valor de $\alpha = 1/\tau = 1/4E-07 = 2,5 \mu s^{-1}$

- La inductancia L_{CC} se calcula con los valores de la Tabla N° 2.1 por la expresión:

$$L_{CC} = 2 * l * (Z_{CC} - R_{CC}) * 10^{-8} \quad (\mu H) \quad (2.19)$$

$$L_{CC} = 2 * 20 * (72,30 - 21,40) * 10^{-8} = 20,30 \mu H$$

- Para el cálculo de la Resistencia (R_{CC}) en estado estacionario se ha utilizado las expresiones matemáticas del Anexo A1 y de [12], la Resistividad del suelo se considera constante y sin ionización.

- Para el electrodo de 35 mm^2 de 20 m de longitud y Resistividad del suelo de 500 Ohm-m, se ha calculado la impedancia dinámica $Z(t)$, obteniéndose la expresión:

$$Z(t) = 21,40 + 50,90 * e^{-2,5 * t}, \text{ el tiempo "t" está en } \mu s.$$

- En aplicación al modelo de PT con respuesta dinámica de CIGRE [6], se ha considerado electrodos de PT con conductores de 35 mm^2 (7,56 mm de diámetro) y 25 mm^2 (6,42 mm de diámetro) para varias longitudes, instalados ambos a 0.60 m en suelo con Resistividad de 1000 Ohm-m y permitividad relativa $\epsilon_r = 10$. Los parámetros de la PT se han calculado en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de electrodos de Puesta a Tierra con respuesta Dinámica, según Modelo CIGRE.

Sección (mm ²)	Longitud (m)	Tiempo viaje de Onda (μs)	Resistencia R _{CC} (Ω)	Inductancia L _{CC} (μH)	Impedancia impulso Z _{CC} (Ω)	Constante Tiempo τ(s)
25	20	0.420	43,52	6,70	103,76	4x10 ⁻⁰⁷
	40	0.84	24,52	54,30	116,91	8x10 ⁻⁰⁷
	60	1.26	17,42	107,70	124,60	1.2x10 ⁻⁰⁶
	80	1.68	13,64	186,27	130,06	1.6x10 ⁻⁰⁶
35	20	0.420	42,87	23,74	102,21	4x10 ⁻⁰⁷
	40	0.84	24,19	72,94	115,36	8x10 ⁻⁰⁷
	60	1.26	17,20	127,00	123,05	1.2x10 ⁻⁰⁶
	80	1.68	13,47	184,06	128,51	1.6x10 ⁻⁰⁶

Con el valor de los parámetros de los electrodos de PT de la tabla N° 2.1, utilizando la ecuación (2.19.2) para cada electrodo y con aplicación del MATLAB, se ha calculado y

graficando la Impedancia Transitoria de Puesta a Tierra en función del tiempo, para longitudes del electrodo de 20, 40, 60 y 80 m; en la Figura N° 2.12 se muestra las Impedancias dinámicas $Z_{cc}(t)$ para 25 mm^2 y en la Figura 2.13 se muestra las Impedancias dinámicas $Z_{cc}(t)$ para 35 mm^2 .

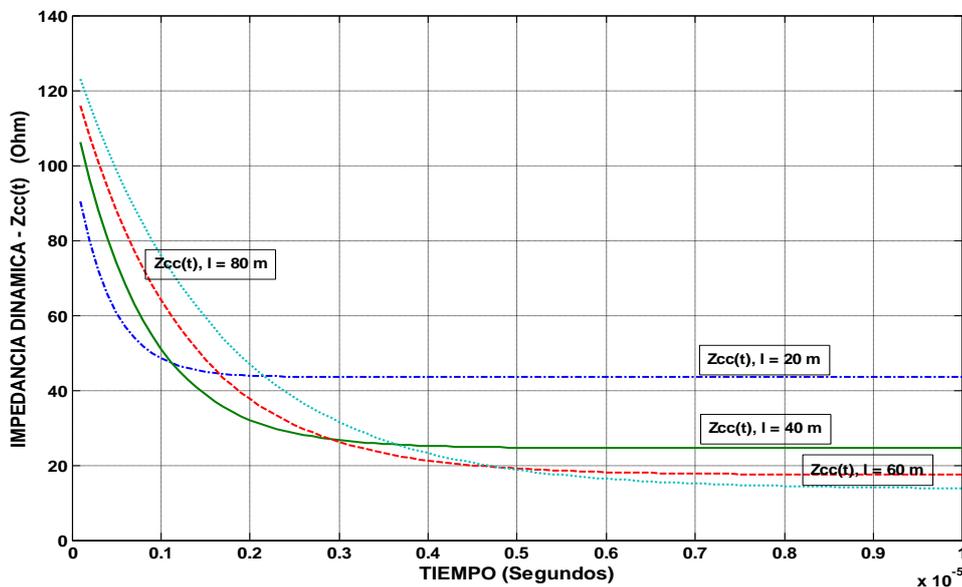


Figura 2.12 Impedancias Transitorias al Impulso de Rayo de Puesta a Tierra, para conductor horizontal de 25 mm^2 en suelo con Resistividad de $1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Modelo de PT-CIGRE.

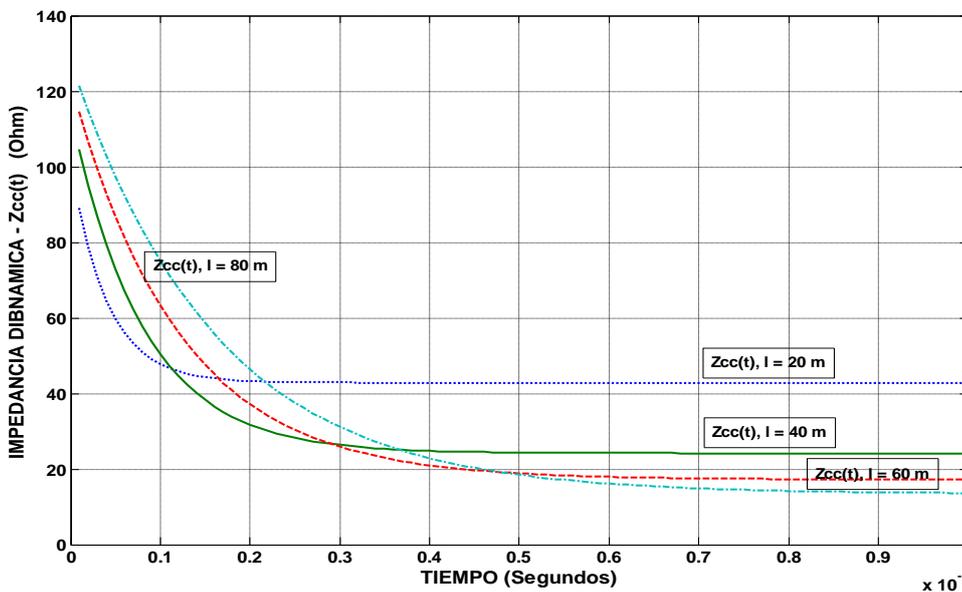


Figura 2.13 Impedancias Transitorias al Impulso de Rayo de Puesta a Tierra, para conductor horizontal de 35 mm^2 en suelo con Resistividad de $1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Modelo de PT-CIGRE.

La mejor utilización de los electrodos de PT en respuesta transitoria, se logra mediante la conexión en paralelo o ramificados con hileras de menor tamaño a cambio de un solo electrodo, en tal caso la impedancia de impulso equivalente se reduce y produce tensiones de impulso también menores; en el caso de varillas de puesta a tierra, la Resistencia R_{CC} se alcanza rápidamente con varillas cortas; varillas extensamente espaciadas no alcanzan

su valor de R_{CC} hasta que la onda de corriente alcance la varilla más distante.

2.4.2 Respuesta en Tensión y Corriente de la Puesta a Tierra por caída de Corriente de Rayo en Modelo CIGRE

Se ha calculado la Tensión en la cima de la torre usando el ATP para el modelo de PT de la Figura 2.11 y para la PT asociada a la torre de una LT de la Fig. 2.14, considerando una determinada cantidad de torres enlazadas con Cable de Guarda (CG) con vanos promedio de 400 m. El rayo que cae en la torre, se representa por una onda de corriente dada por la ecuación (2.20), que produce una tensión de impulso de amplitud dada por el producto de la corriente de rayo y el valor de la impedancia de impulso equivalente, visto desde el punto de inyección. Esta onda de tensión se propaga en dirección de las torres vecinas y desde estas se desplaza por la torre hacia la PT, ocasionando reflexiones en cada punto de discontinuidad.

En la Figura 2.14 se presenta el circuito equivalente utilizado para el cálculo de la Tensión (V) en la cima de la torre y en la Puesta a Tierra por descarga de Rayo, para la PT con electrodos de 25 mm² en configuración 2x40 m y conductor de 35 mm², en configuración 2x40 m en suelo de 1000 Ohm-m.

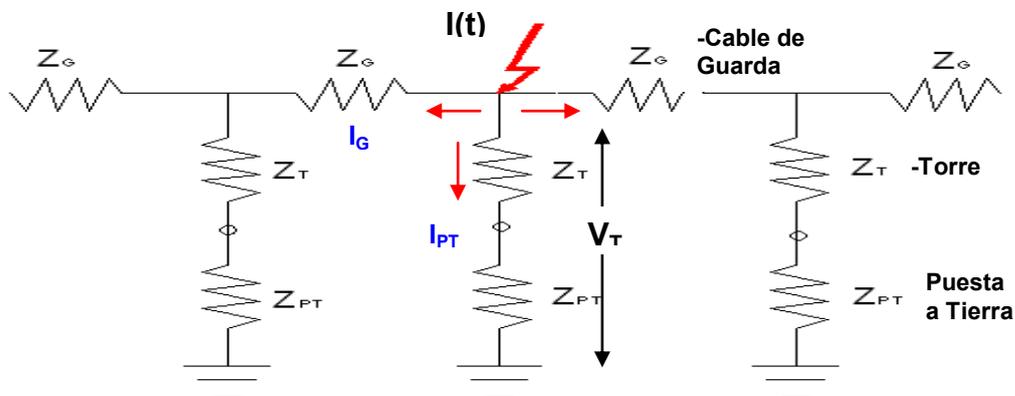


Figura 2.14 Circuito Equivalente de la Impedancia de Puesta a Tierra asociado al aterramiento de una LT, por caída de rayo en la cima de Torre.

Para la simulación del fenómeno transitorio, se ha inyectado una corriente de 20kA en la cima de la torre, con frente rápido de 2/ 50 μ S, dado por.

$$I(t) = 20000 * (e^{-15500*t} - e^{-999900*t}) \text{ A} \quad (2.20)$$

A continuación se presenta el valor de los componentes del circuito utilizado para el cálculo, que corresponde a componentes de una LT 138 kV.

- Z_g : Impedancia de onda de los cables de guarda (a 280 Ω)
- Z_T : Impedancia de onda de las torres (184 Ω), altura = 31.4 m

$I(t)$: Fuente de corriente de Rayo (20 kA) inyección en cima de la torre.

Los cálculos se han efectuado con el ATP, cuyos resultados para el electrodo 2x40 m-35mm², se muestra en la Figura 2.15; en el gráfico se observa que la tensión en la cima de la torre (V_T) es 1661.2 kV y la tensión en pie de torre (V_{PT-G}) es 253.8 kV, estos valores para el nivel de aislamiento ponen en riesgo el aislamiento de la Línea de 138 kV. En forma similar se ha calculado para el electrodo 2x40 m-25mm², el resultado se muestra en la figura 2.16, se observa que la tensión en la cima de la torre (V_A) es 1662 kV y la tensión en pie de torre (V_{PT-G}) es 256.9kV; estos valores son similares al caso anterior; si la respuesta dinámica de la PT se considera con ionización, mejora el comportamiento del aislamiento, presentando menor tensión de sostenimiento.

Figura 2.15 Tensión en Cima y Pie de Torre por inyección de corriente de 20kA, en Puesta a Tierra de 2x40 m, 35 mm², Resistividad del suelo de 1000 Ohm-m.

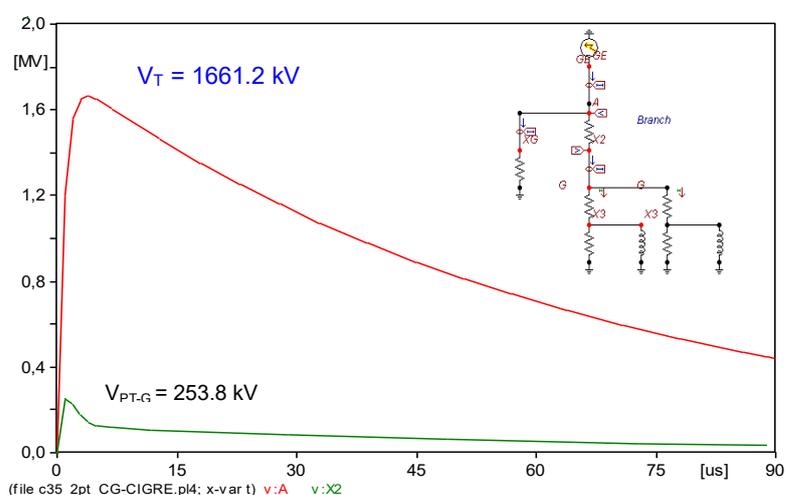
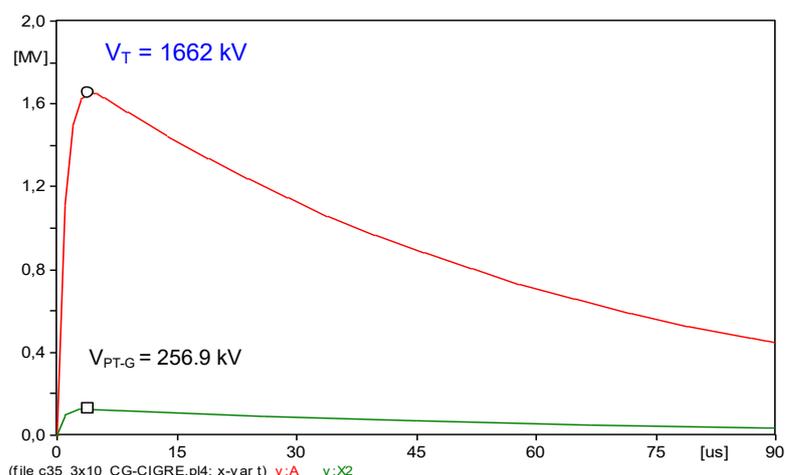
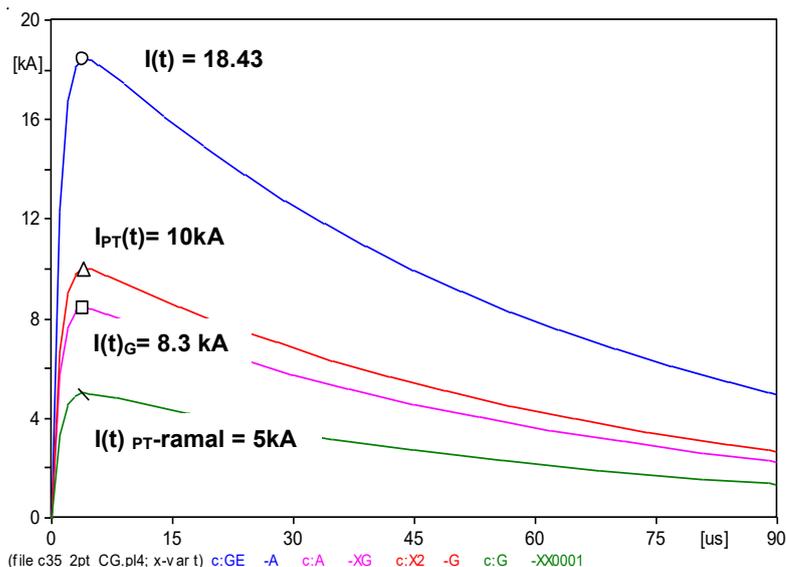


Figura 2.16 Tensión en Cima y Pie de Torre por inyección de corriente de 20kA, con Puesta a Tierra de 2x40m, 25mm², Resistividad del suelo de 1000 Ohm-m.



En el cálculo anterior se ha obtenido también, la distribución de corrientes en los elementos de PT ante la inyección de corriente de impulso en la cima de la torre, para electrodo de PT 2x40 m, 25mm²; los resultados se muestran en la figura 2.17, el valor máximo registrado es: $I(t)_{max} = 18431A$ (fuente de Impulso), $I_{G-max} = 8306 A$ (en cable de guarda), $I_{PT-max} = 10140 A$ (en torre y PT).

Figura 2.17 Disipación de la Corriente de Impulso en Cable de Guarda, Torre-Puesta a Tierra con electrodo de 25mm², 2x40 m, Resistividad 1000 Ω-m. Modelo de PT-CIGRE.



Discusión de Resultados de cálculo para Modelo de PT-CIGRE

- El Modelado CIGRE para el cálculo de la Impedancia Dinámica de la PT, presenta una adecuada respuesta en el tiempo, según valores obtenidos con simulaciones del ATP, los cuales son similares a las respuestas de aplicación en el modelado transitorio de la sección 4.8.2. Se concluye que este modelo es aplicable en régimen transitorio.
- Cuando la Impedancia Dinámica de PT supera al valor de su Impedancia Característica, se produce un coeficiente de reflexión negativo en la base de la torre, esto puede ocasionar sobretensiones que superan el Nivel Básico de Aislamiento (NBA) y producir descarga inversas fallas del aislamiento.
- En el cálculo de las sobretensiones de rayo en la cima de la torre, se utiliza el valor de Resistencia de PT, a pesar que tiene una condición de impedancia transitoria; dicho valor puede ser sustituida por una resistencia equivalente.
- El efecto de aterramiento de las estructuras será tanto mas sensible cuanto mayor sea el tiempo de recorrido de la corriente de rayo, esta influencia se observa en la distribución de las componentes de las corrientes, ver Figura 2.17.
- La velocidad de propagación de la onda es aproximada y para soluciones con metodología actual este depende de la inductancia (L) y Capacitancia (C) del electrodo de la PT.
- Las ondas de Tensiones reflejadas en las torres próximas también son de polaridad invertida, como el tiempo de propagación es aproximadamente 10 veces superior al tiempo de propagación en la torre, estas reflexiones amortiguan las sobretensiones en las torres adyacentes y aproximadamente entre 3 a 4 torres se reduce a un 5%.

2.5 Modelado de Puesta Tierra como circuito “R-L” desarrollado por J.G. Anderson

2.5.1 Criterios del Modelado en Circuito R-L

En esta sección se evalúa el estudio de la Puesta a Tierra para descargas de Rayo de J.G. Anderson [2], utilizando un Modelo de circuito de una Impedancia (Z_s) del cable de guarda en paralelo con la Inductancia (L) de la torre y ésta en serie con la Resistencia (R) de la PT; donde el modelo del circuito del aterramiento en baja frecuencia es equivalente al circuito en alta frecuencia con respuesta transitoria a las corrientes de impulso de rayo como en la Fig. 2.18; para la protección del aislamiento de la Línea Eléctrica se considera:

- En el diseño del aislamiento externo de líneas eléctricas, los componentes destinados a asegurar el sostenimiento ante las sobretensiones de rayo; se considera a explosores de aire (air gaps), longitud y línea de fuga de los aisladores y las sobretensiones de rayo, que dependen de la capacidad y el tiempo de desarrollo de la descarga en la PT.
- Las resistencias de pie de torre deben ser menor a 25 Ohmios (CNE) y los ángulos de blindaje (α) deben tener el valor adecuado, considerando que está relacionado con la configuración de la estructura y el coeficiente de interrupción (β) de avería a la distancia de descarga de Rayo; los autores han usado $\beta = 0.64$ para UAT y 0.80 para EAT por ser conservador, la característica de descarga Tensión-tiempo para los dispersores está definida por la ingeniería.
- Para el análisis de la respuesta transitoria de la Resistencia de PT a las corrientes de rayo, según las experiencias de Anderson-Darveniza, se determina el método para calcular la Impedancia de la Torre, proponiendo el Circuito R-L.

2.5.2 Parámetros de Puesta a Tierra y Torre de Transmisión en el modelo equivalente “R – L”

La respuesta de la Tensión y Corriente se analiza usando el circuito convencional Resistencia (R) – Inductancia (L) acoplados, el cual ha dado distintas ventajas para obtener soluciones con buena aproximación, sin resolver las ecuaciones de ondas viajeras, debido al problema de parámetros que no han sido definidos con precisión. El problema clave que surge es en la selección de los valores apropiados de la Inductancia de la torre y la Resistencia de pie de torre, para mayor exactitud.

Las figuras 2.18 a) y 2.18 b) representan dos circuitos equivalentes convencionales de la PT de una LT, conformada por el cable de guarda, la estructura o torre y la Resistencia de PT o pie de torre; en estos dos circuitos la torre tiene representaciones diferentes, en a) se

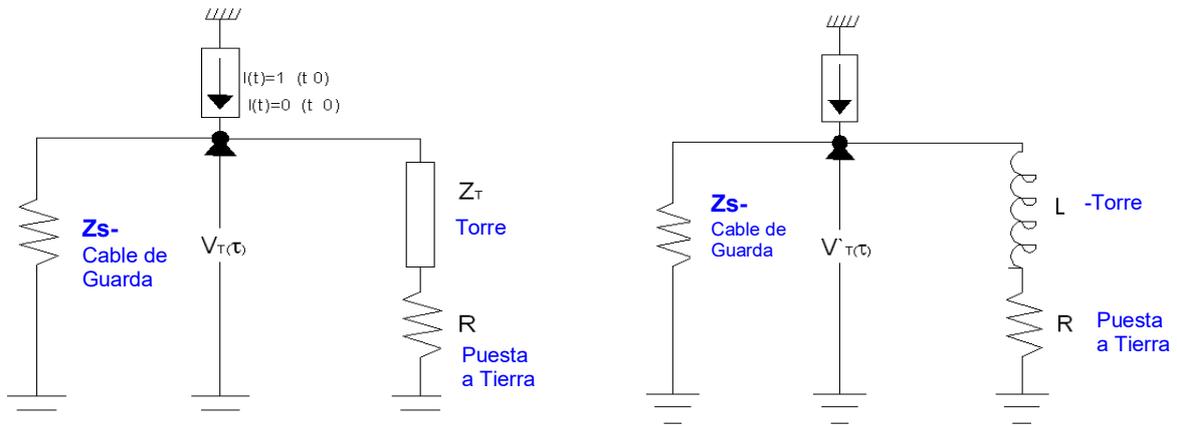
representa como impedancia de onda (Z_T) y en b) se representa como Inductancia (L), en ambos casos como conectados en serie con la Resistencia de PT y se obtiene el modelo de un circuito “R-L”.

Los componentes del circuito de la Figura 2.18 b) se ha seleccionado según el criterio de [2], considera que estos circuitos son equivalentes; en las condiciones de frontera debe cumplir que las respuestas de la Tensión inicial y final de ambos circuitos deben ser iguales. Según el modelado de [2] se ha seleccionado valores únicos para Z'_s y R' , expresados por las ecuaciones siguientes.

$$Z'_s = \frac{2 * Z_s * Z_T}{Z_s + 2Z_T} \quad (2.21)$$

$$R' = \frac{R * Z_T}{Z_T - R} \quad (2.22)$$

De igual forma se selecciona un valor único de la Inductancia (L), bajo el considerando que, el área bajo la curva de respuesta Tensión-tiempo del circuito R-L, para una función de paso tipo corriente de rayo, sea igual al área bajo la curva respuesta Tensión-tiempo en la cima de la torre, para el circuito convencional de la onda viajera.



- a) Torre representada como Impedancia de onda en baja frecuencia.
- b) Torre representada como Inductancia en alta frecuencia.

Figura 2.18 a) y b) Circuitos equivalentes de PT sometidos a Corriente de Rayo, Modelo en baja y alta frecuencia [2].

Para las condiciones equivalentes de respuesta de Tensión $V(t)$ de los circuitos 2.18a) y 2.18b) se ha seleccionado el valor de la Inductancia “L” equivalente, dada por la ecuación.

$$L = \left(\frac{Z'_s + 2R'}{Z'_s} \right)^2 * \frac{2Z_w * \tau_T}{(1 - \psi)^2} \quad (2.23)$$

Donde las variables utilizadas se identifican por:



- L : Inductancia Total de la torre (μ H) L/H_{pc} (μ H/m)
- τ_T : Tiempo de viaje de la onda en la torre (μ S) $\Leftrightarrow \tau_T = 3 H_{pc}/100(\mu$ S)
- Z_w : Impedancia de Impulso de la torre (no la impedancia de onda característica de torre)
- Z_s : Impedancia del Cable de Guarda (Ohm)
- ψ : Factor de acoplamiento.

De acuerdo al Modelo propuesto por [2], la Impedancia de Impulso de la Torre se ha definido como:

$$Z_w = \frac{(2 * Z_s^2 * Z_T)}{(Z_s + 2 * Z_T)^2} * \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (2.24)$$

El Factor de Acoplamiento de onda (Ψ), queda definido como:

$$\psi = \left(\frac{2 * Z_T - Z_s}{Z_s + 2 * Z_T} \right) * \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (2.25)$$

El factor de acoplamiento “ Ψ ”, puede ser negativo, cero y positivo, cero en los puntos críticos de: $Z_T = R$ y $Z_T = Z_s/2$

$\Psi < 0$, el sistema es no acoplado

$\Psi = 0$, el sistema es críticamente acoplado

$\Psi > 0$, el sistema decrece lentamente de valor inicial a valor final de la Tensión en cima de la torre $V_T(t)$, el sistema es sobre acoplado.

Si $R = R' = 0$, reemplazando las ecuaciones (2.24) y (2.25) en la ecuación (2.23), se reduce a la fórmula clásica de la inductancia de la torre.

$$L = Z_T * \tau_T \quad (2.26)$$

El tiempo de viaje, τ_T es determinado por la altura del cable de guarda al suelo (H_{pc}) y la velocidad de la onda. La Inductancia total es directamente proporcional a la altura del cable de guarda al suelo (tierra).

Aplicando las ecuaciones (23), (24) y (25) se ha calculado la Inductancia equivalente de la torre (L) en función de la Impedancia de onda de la torre (Z_T), para valores de la Resistencia de PT de 15 Ω , 25 Ω , 40 Ω , 60 Ω y 100 Ω ; el resultado de la simulación para cada valor de R se ha graficado en la Figura 2.19; se observa que los valores de la Inductancia Eficaz (L) cerca al origen crecen hacia el infinito (indeterminado) cuando la Resistencia de PT es igual a la Impedancia de Onda de la torre (Z_T).

A la derecha del origen los valores de “L” varían linealmente, para valores de la Resistencia de PT con $R > 0$. En casos específicos, los valores de la Inductancia de la Torre pueden utilizarse en el circuito de la Fig. 2.18 b) para el cálculo de la Tensión en la cima de la Torre.

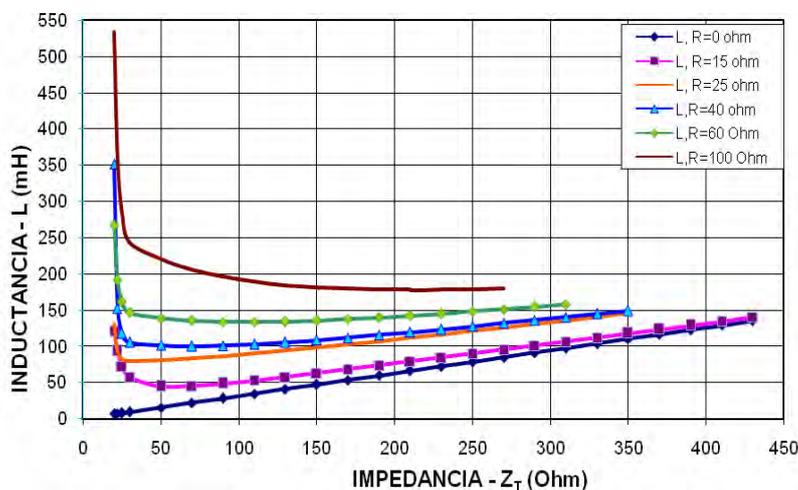


Figura 2.19 Inductancia Eficaz de la Torre como función de Impedancia de Onda de la Torre (Z_T) y Resistencia de Puesta a Tierra, para Impedancia de CG equivalente ($Z_{cg} = 200$ Ohm).

2.5.3 Cálculo de Parámetros del aterramiento de las Torres de Transmisión en Circuito R-L para Alta Frecuencia

Utilizando el método propuesto por [2] para el análisis transitorio de la Puesta a Tierra, se ha calculado los parámetros del circuito de aterramiento en alta frecuencia de la Figura 2.18 b) dado por R' , Z' s y L ; los valores de la Resistencia de PT (R) en corriente continua (CC) se ha calculado según [12] para electrodos de conductor horizontal en cobre de 25 mm^2 enterrado a $0,60\text{m}$ de profundidad, en suelo homogéneo de Resistividad de $1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Los resultados del cálculo se presentan en la Tabla 2.2, estos valores son constantes y se puede utilizar para el análisis transitorio simplificado producido por la caída de rayo.

Tabla 2.2 Valores de Parámetros del circuito de Puesta a Tierra-Torre para alta frecuencia, Modelo J.G. Anderson [2].

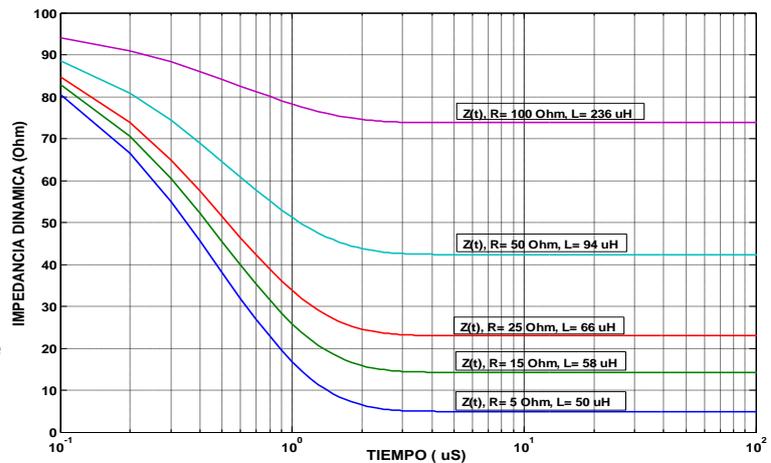
Longitud Electrodo (m)	Puesta Tierra (Ohm)	R' (Ohm)	Cable Guarda (Ohm)	$Z' w$ (Ohm)	Fact. Acoplam. Ψ	Torre L (μH)	α (μS^{-1})
210,00	5,0	5,2	195,6	119,3	-0,28436	50	2,06
71,00	15,0	16,7	195,6	104,3	-0,24873	58	1,974
40,00	25,0	30,1	195,6	91	-0,21703	66	1,938
16,80	50,0	74,7	195,6	63,9	-0,15237	94	1,835

La Impedancia Dinámica como respuesta a la corriente de rayo se obtiene por el cociente de la Tensión $V(t)$ y la corriente $I(t)$ dado por:

$$Z(t) = \frac{V_T(t)}{I(t)} = \frac{Z'_s}{2(Z'_s + 2R')} * \left[2 * R' + Z'_s * \exp^{-\left(\frac{2R' + Z'_s}{2 * L}\right) * t} \right] \quad (2.27)$$

En la Tabla N° 2.2 se han calculado las Inductancias Total de la torre (L) y los parámetros del circuito 2,18 para diferentes valores de Resistencia de PT, luego se ha calculado y simulando en MATLAB el comportamiento de la Impedancia Dinámica $Z(t)$ en el dominio del tiempo; los resultados se grafican en la Figura 2.20.

Figura 2.20 Impedancia Dinámica equivalente en la cima de la Torre para diversos valores de Inductancias de la Torre y electrodo de Puesta a Tierra de conductor 25 mm².



Se observa la Impedancia equivalente de Impulso en el punto de inyección de la corriente, este valor es el mas grande y se presenta en el instante del impulso o choque de la corriente, luego en tiempos muy cortos aproximadamente 4 µS, logra su valor de estado estable o R_{CC} ; este último valor es predominante con el valor de la Resistencia de PT, por cuanto la inductancia actúa solo en estado transitorio.

2.5.4 Modelo de PT en Circuito “R-L” con Respuesta a Corrientes de Impulso de Rayo

En el estudio de las descargas atmosféricas desarrollado por [2], la corriente de impulso tipo Rayo es una función impulso, la respuesta del circuito R – L se resuelve en el dominio del tiempo o la frecuencia; para torres convencionales la onda viaja de ida y retorno en décimos de microsegundos. Si la corriente inyectada es una Función Impulso $I(t) = I_0(t)$ deducido en [2], este impulso de corriente produce una Sobretensión $V_T(t)$ en la cima de la torre, dado por la expresión.

$$V_T(t) = \frac{Z'_s * I_0}{2(Z'_s + 2R')} * \left[2 * R' + Z'_s * \exp^{-\left(\frac{2R' + Z'_s}{2 * L}\right) * t} \right] \quad (2.28)$$

Con los valores de la Tabla N° 2.2, para $\ell = 40$ m, se calculo V_T :

$$\text{Para, } t = 0 \quad , \quad V_T = 196.5 \cdot 20 / 2 \text{ kV} = 1965 \text{ kV}$$

$$\text{Para, } t = 1.0 \text{ } \mu\text{s,} \quad V_T = 676 \text{ kV}$$

Aplicación del Modelo R-L para Respuesta de Puesta a Tierra en Alta Frecuencia

Para la aplicación se ha considerado una LT 138 kV de las siguientes características:

Conductores de fase	:	3x240 mm ² AAAC, simple terna
Cadena de aisladores	:	13 Unidades, 650 BIL.
Cota	:	2800 a 4000 msnm.
Cable de guarda	:	uno (01), 1x5/8" Diámetro, acero EHS.
Altura de CG H_{cg}	:	31.4 m
Estructura	:	Torre metálica de acero, disposición de conductores de fase tipo bandera.
Resistencia de PT (R)	:	< 25 Ohm
Impedancia del CG	:	400 Ohm
Corriente de Rayo	:	20 kA, ecuación (2.20)

La Tensión en la cima de la torre de la LT 138 kV, se ha calculado utilizando el circuito de la Fig. 2.18 b) y el valor de los parámetros de la Tabla 2.2. La simulación se ha efectuado para dos configuraciones de PT, aplicando la misma corriente de impulso de 20 kA de la ecuación (2.20).

- Un electrodo de 25 Ω , de 1x40 m, 25 mm².
- Un electrodo de 15 Ω , 2x40 m, 25 mm².
- La Impedancia de la torre se considera 66 μ H.

El cálculo se ha efectuado con el uso del ATP, para el electrodo 1x40m-25 mm² los resultados se muestran en la Fig. 2.21; se observa que la Tensión en la Cima de la torre tiene un valor máximo $V_T = 764.4$ kV, en un tiempo de aproximadamente 5 μ s se reduce sustancialmente hasta el valor máximo de la Tensión en pie de torre V_{PT} es 443.2 kV y este a su vez se disipa hasta la Tensión de tierra remota ($V_G =$ cero) en un tiempo de aproximadamente de 150 μ s. Se observa que el efecto de la Inductancia debido a la onda de corriente de frente escarpado, incrementa el valor de la tensión muy rápidamente, mientras que en la Impedancia de PT (pie de torre) su incremento es más lento.

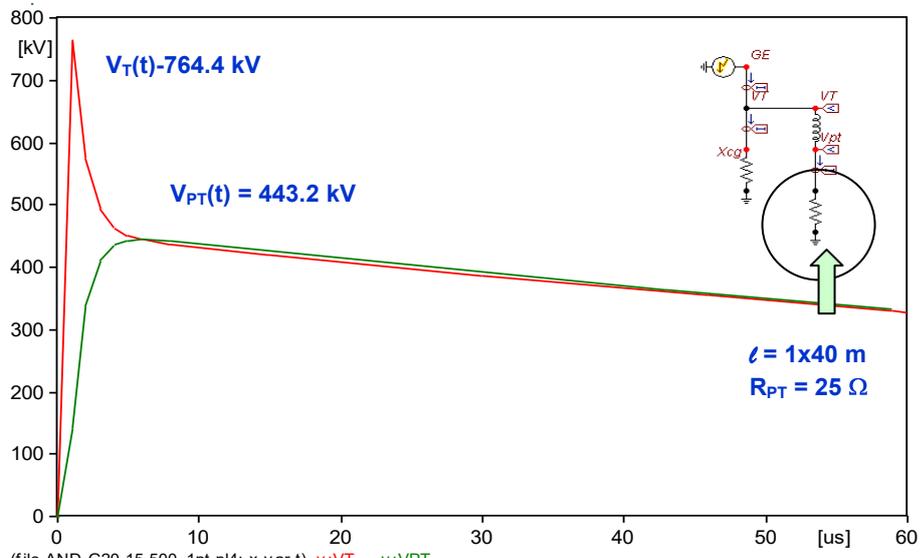


Figura 2.21 Tensiones en la cima $V_T(t)$ y en Pie de Torre $V_{pt}(t)$, producido por Corriente de Rayo con Puesta a Tierra de 25 Ohm. Modelo R-L de [2].

En forma similar se ha efectuado la simulación para el electrodo de PT de configuración $2 \times 40 \text{ m} \times 25 \text{ mm}^2$, los resultados se han graficado en la Figura 2.22; en este se observa también, que por efecto de la inductancia la tensión en la cima de la torre crece abruptamente y su valor máximo es $V_T = 736 \text{ kV}$; en los primeros $2 \mu\text{s}$ esta tensión cae muy rápidamente hasta el valor de la tensión en pie de la torre, cuyo valor máximo es $V_{PT} = 251 \text{ kV}$ en $5 \mu\text{s}$.

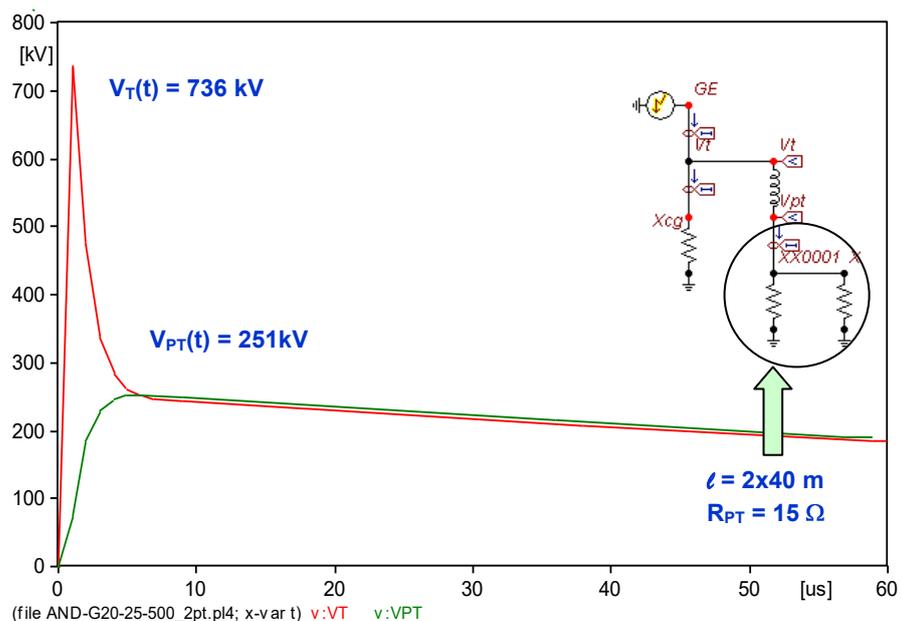


Figura 2.22 Tensiones en la cima $V_T(t)$ y en Pie de Torre $V_{pt}(t)$, producido por Corriente de Rayo con Puesta a Tierra de 15 Ohm. Modelo R-L de [2].

Discusión de Resultados para el Modelo de PT como Circuito R-L

- La respuesta transitoria de la PT ante la caída de Rayos sobre una torre de una Línea Eléctrica, se ha obtenido usando el Modelo de circuito R-L aproximado en alta frecuencia, sin resolver las ecuaciones de Onda. Este modelo permite lograr resultados bastante aceptables que puede ayudar a calcular el aislamiento en zonas de bajo riesgo contra rayos. Para niveles de descarga mayor a 20 kA, se debe buscar respuestas con mayor aproximación a los fenómenos físicos, por lo que se requiere resolver las ecuaciones de onda.
- El modelado de la impedancia de onda de la torre como inductancia, da respuesta de tensiones muy escarpadas al inicio debido a la corriente de impulso tipo Rayo y es predominante frente a la respuesta de la PT; sin embargo esta sobre tensión se reduce sustancialmente en tiempos muy cortos en el orden de los $5\mu\text{s}$ y se disipa en aproximadamente en $150\mu\text{s}$.
- El modelado de [2], como un Circuito Eléctrico simple, permite obtener respuestas aproximadas rápidas de las tensiones en el sistema de aterramiento, producido por Corrientes de impulso tipo Rayo.

2.6 Modelado de Puesta Tierra en Alta Frecuencia como Circuito R-C

2.6.1 Criterios Generales del Modelado R-C

La respuesta transitoria plantea un problema más complejo debido a los múltiples factores que influyen en el comportamiento de la PT, actualmente se llegan a soluciones aproximadas que requieren ser validados con modelados y pruebas experimentales.

En general, los diseños de PT buscan obtener solo valores bajos de Resistencia de dispersión, que son eficientes en el rango de frecuencia bajas (estado estable 50-60 Hz); sin embargo, en el Modelo R-C su comportamiento dinámico tiene los siguientes componentes fundamentales:

- Respuesta Resistente (depende de la conductancia del suelo).
- Respuesta Capacitiva (depende del armado de la PT).
- Respuesta Inductiva (depende del armado de la PT).

La literatura técnica muestra configuraciones del electrodo de Puesta a Tierra simples. La Figura 2.23 a) muestra solo el componente de la Resistencia en estado estable, la Fig. 2.23b) muestra un modelo para respuesta transitoria en altas frecuencias, con tres componentes: Resistencia, Inductancia y Capacitancia.

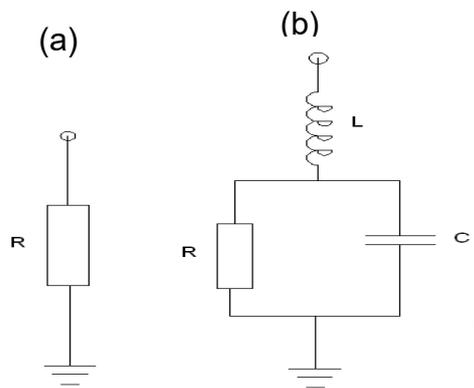


Figura 2.23 Modelado de Puesta a Tierra, a) Representado por R (estado estacionario);
 b) Representación R-C de componentes R, L, C para alta frecuencia.

Cuando una onda de corriente de gran crecimiento (di/dt) es aplicada a un electrodo de PT, en los primeros instantes el valor de la Impedancia de este tiene el mismo valor de su Impedancia de Onda; puede ser alto dependiendo de la Inductancia (L) y Capacitancia (C); por lo que, es importante tomar en consideración la respuesta transitoria de la PT y su desarrollo, dado que la Tensión transitoria es proporcional y puede alcanzar valores altos que podrían ocasionar una falla.

El desarrollo del modelado de PT que se persigue en esta sección, está enfocado para obtener modelos aproximados y simples, la exactitud de estos depende de los rangos de frecuencia del estímulo; los modelos con mejor aproximación no son los más simples, implican la solución de ecuaciones electromagnéticas; L. D. Grcev, F. Dawalibi, Nekhoul y otros [35, 36, 37, 42]; desarrollaron modelos con soluciones más exactas y cubriendo toda la gama de frecuencias, pero ello demanda un gran esfuerzo del cálculo, que difícilmente está al alcance del común de los profesionales.

El modelado como circuito R-C de parámetros concentrados carece de respaldo analítico, más bien está relacionado a la venta de compuestos con tratamiento del suelo para reducir la Resistencia de PT, por lo que se infiere que esta aplicación es meramente empírica. En esta sección se analizó la respuesta dinámica del circuito equivalente del modelo, con soporte del ATP.

2.6.2 Cálculo de los Parámetros del Circuito R - C

Los parámetros del electrodo de PT en estado transitorio dependen de la geometría del electrodo y de las características del suelo, representados por:

R-Resistencia por unidad de longitud (ohm/m), L-Inductancia por unidad de longitud (H/m),
 C-Capacitancia por unidad de longitud (F/m).

Para el cálculo de estos parámetros se ha considerado las características del suelo constantes, tales como: resistividad (ρ_s), permitividad dieléctrica (ϵ_r) y permeabilidad magnética (μ_s). El Modelo de circuito R-C se analizó para un conductor horizontal de longitud (ℓ), diámetro (d) enterrado a una profundidad "h", en suelo de Resistividad uniforme y sin ionización; el suelo considerado es tierra natural y tratada; los parámetros se consideran concentrados y constantes.

a) Cálculo de la Resistencia en Corriente Continua (CC)

El cálculo de la Resistencia de PT en estado estacionario se ha efectuado usando el Modelo de [12] que presenta una mejor convergencia, para ello se utilizó la ecuación (A1.2) del Anexo A1. Como parte aplicativa se ha calculado los parámetros de un electrodo de PT horizontal de conductor de cobre de 25mm^2 , diámetro 6,42 mm, enterrado horizontalmente a profundidad de 0,6 m en suelo uniforme con Resistividad de 1000 Ohm-m (suelo natural) y 5 Ohm-m (suelo tratado); los valores se presentan en la Tabla N° 2.3, 2.4 y 2.5.

b) Cálculo de la Capacitancia (C)

Tomando como base la geometría de un condensador cilíndrico, se le considera compuesto de un cilindro interior formado por el conductor de radio "a" enterrado a una profundidad "h", rodeado de un cilindro exterior (placa) de radio "b", conformado por el suelo natural o suelo tratado; se asume una superficie Gaussiana cilíndrica de radio "r", a lo largo de la longitud "L" del conductor, como se muestra en la figura 2.24.

Las ecuaciones de Maxwell que se utilizan para calcular los campos eléctrico y magnético, no son aplicables directamente cuando la interacción entre dichos campos y el medio (suelo) es compleja, por lo que no es muy simple obtener una solución analítica; L. Grecev y otros investigadores, han aplicado la Teoría de Campos Electromagnéticos para estudiar la respuesta dinámica de PT de [35, 36, 37 y 38].

- La longitud del radio del conductor es mucho menor que la longitud de onda y la propia longitud del conductor.
- El campo electromagnético alrededor de los conductores es considerado un medio isotrópico uniforme.
- El electrodo se considera un cilindro conductor de sección recta llena, radio "a" y longitud "ℓ", rodeado por una chaqueta conductora cilíndrica de radio interior "b" y de igual longitud, Figura 2.24.

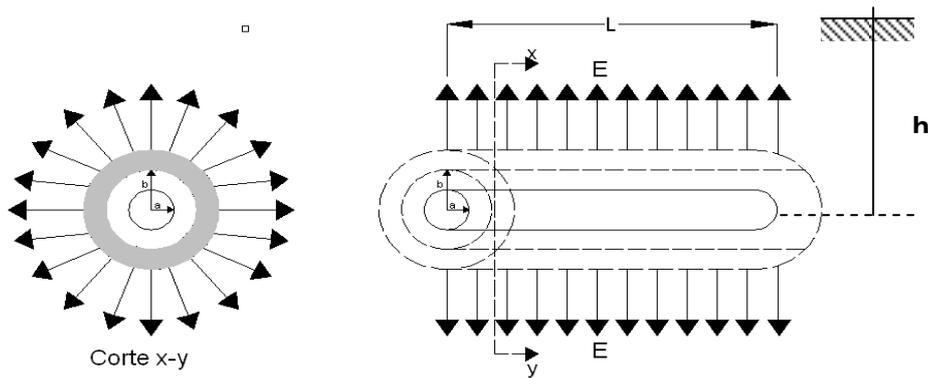


Figura 2.24 Distribución del Campo Eléctrico en una Capacitancia de forma Cilíndrica, de un conductor de PT enterrado a una profundidad h .

Para el cálculo de los parámetros del modelo de circuito R-C, se adoptan los siguientes criterios para representar el electrodo de PT enterrado en suelo uniforme en un lecho con material de reemplazo o suelo natural a una profundidad “h” mucho mayor que el radio del conductor.

Resolviendo las ecuaciones de Maxwell para un campo electromagnético estático, es posible calcular la Capacitancia del arreglo de Puesta a Tierra y relacionar este parámetro con otras magnitudes de interés.

Aplicando la primera ley de Gauss-Maxwell, se tiene:

$$\oint E^* dA = E^* \oint dA = \frac{1}{\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \quad (2.29)$$

Se efectúa la integración del campo eléctrico para el sistema de la figura (2.24):

$$\begin{aligned} E^* \oint dA &= E^* A_{\text{izquierda}} + E^* A_{\text{derecha}} + E^* A_{\text{cilindro}} \\ &= 0^* A_{\text{izquierda}} + 0^* A_{\text{derecha}} + E^* A_{\text{cilindro}} * \text{Cos } 0^\circ \\ E^* \oint dA &= 0 + 0 + E^*(2 \pi * r * \ell) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Entre los cilindros (placas) existe una distribución de carga eléctrica uniforme:

$$\lambda = dq/d\ell \quad \Rightarrow \quad Q = \lambda * \ell \quad (2.31)$$

Igualando las ecuaciones (2.29) y (2.31), se obtiene el campo eléctrico E dado por.

$$E = \frac{\lambda}{2 * \pi * \epsilon * r} \quad (2.32)$$

El potencial eléctrico entre los cilindros se obtiene considerando $V(a)=0$.

$$V(r) = - \int_a^r E(r) * dr = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \int_a^r \frac{dr}{r} = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} * \ln\left(\frac{r}{a}\right) \quad (2.33)$$

La diferencia de potencial entre los cilindros se determina por:

$$V = -V_+ - V_- = V(a) - V(b) = \frac{Q}{2\pi\epsilon * l} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.34)$$

Finalmente, la capacitancia para el conductor enterrado se obtiene por:

$$Q = CV \implies C = \frac{2\pi * \epsilon * l}{\ln(b/a)} \quad (2.35)$$

Además, se tiene la expresión de la Capacitancia, según [12], esta dado por:

$$C = 2\pi\epsilon * l * \left[\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{dh}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.36)$$

Para efectos comparativos se ha calculado los valores de “C” usando las ecuaciones (2.35) y (2.36), en la simulación del Modelo de Circuito R-C se utiliza los valores calculados por [12].

c) Cálculo de la Inductancia

La Inductancia (L) del electrodo de puesta a tierra para conductor horizontal enterrado en suelo uniforme a una profundidad “h” se calcula por la expresión matemática (2.37).

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2 * l}{\sqrt{2 * a * h}}\right) - 1 \right] \quad (2.37)$$

Se han calculado los parámetros C y L del electrodo de PT propuestos en 2.7.3 en la tabla N° 2.3, se presenta las características de los electrodos y los resultados del calculo en la Tabla N° 2.4 y 2.5.

2.6.3 Circuito Eléctrico R-C equivalente de la Puesta a Tierra

El circuito eléctrico de la PT para descarga de rayos del modelo R-C, se presenta en la Figura 2.25.

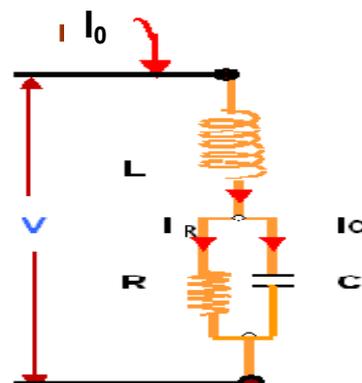


Figura 2.25 Modelo de Circuito Eléctrico R-C simplificado de la PT.

Tabla 2.3 Parámetros del electrodo de Puesta a Tierra y suelos.

Electrodo de Puesta a Tierra		Características Eléctricas del Suelo		
Conductor 25 mm ² , 7 hilos		ρ (Ω)	1000	Suelo Normal
ℓ (m)	variable	μ_r	1	
a (m)	0,00321	ϵ_r	10	
Instalación de conductor		ρ (Ω)	5	Suelo Tratado
Profundidad-h (m)	0,60	μ_r	1	
b (m)	0,25	ϵ_r	30	
		μ_0 (H/m)	$4\pi*10E-07$	Vacío
		ϵ_0 (F/m)	$8,859*10E-12$	

En la tabla 2.4 y 2.5 se ha calculado los parámetros de R, L y C del Modelado Circuito R-C de la Puesta a Tierra, para suelo normal y suelo tratado (con óxidos metálicos).

Tabla 2.4 Cálculo de Valores de R, L y C en Suelo normal

SUELO NORMAL		ρ (Ohm-m) = 1000		
Long. Electrodo - ℓ (m)	Resistencia- R (Ohm) E.D. Sunde [12]	Capacitancia (F)		Inductancia(H) Sunde [12], ecuac. (2.37)
		ED Sunde, ecuac.(2.36)	Modelo Deducido, ecuac.(2.35)	
2	251,90	4,000E-10	3,000E-10	1,266E-06
5	129,90	7,000E-10	6,000E-10	4,082E-06
7,5	95,20	9,000E-10	1,000E-09	6,731E-06
10	76,00	1,200E-09	1,300E-09	9,551E-06
16	52,20	1,700E-09	2,000E-09	1,679E-05
20	43,50	2,000E-09	2,600E-09	2,187E-05
25	36,20	2,400E-09	3,200E-09	2,846E-05
30	31,20	2,800E-09	3,800E-09	3,524E-05
35	27,40	3,200E-09	4,500E-09	4,220E-05
40	24,50	3,600E-09	5,100E-09	4,929E-05
45	22,20	4,000E-09	5,800E-09	5,651E-05
50	20,30	4,400E-09	6,400E-09	6,385E-05
60	17,40	5,100E-09	7,700E-09	7,880E-05

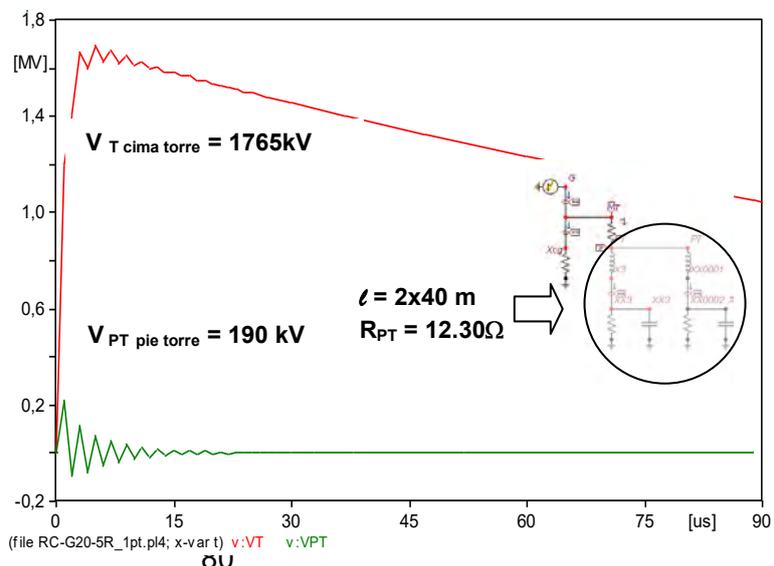
Tabla 2.5 Cálculo de Valores de R, L y C en Suelo Tratado

Suelo tratado - ρ (Ohm-m) = 5				
Long. Electrodo - ℓ (m)	Resistencia- R (Ohm) Sunde [12]	Capacitancia (F)		Inductancia(H) Sunde [12], ecuac. (2.37)
		ED Sunde, ecuac.(2.36)	Modelo Deducido, ecuac.(2.35)	
2	1,23	1,10E-09	8,00E-10	1,234E-06
2,5	1,05	2,10E-09	2,00E-09	1,654E-06
7,5	0,47	2,80E-09	3,00E-09	6,609E-06
10	0,37	3,60E-09	4,00E-09	9,387E-06
16	0,26	5,20E-09	6,40E-09	1,652E-05
20	0,21	6,20E-09	8,00E-09	2,155E-05
25	0,18	7,40E-09	1,00E-08	2,805E-05
30	0,15	8,60E-09	1,20E-08	3,475E-05
35	0,14	9,80E-09	1,39E-08	4,162E-05
40	0,12	1,10E-08	1,59E-08	4,864E-05
45	0,11	1,21E-08	1,79E-08	5,578E-05
50	0,10	1,32E-08	1,99E-08	6,303E-05

2.6.4 Aplicaciones del Modelo R-C de Puestas a Tierra

Para el cálculo y análisis de sensibilidad de respuesta transitoria de la Puesta a Tierra, se ha utilizado el ATP para un electrodo de 2x40 m, 25 mm² enterrado 0,60 m en suelo natural de 1000 Ohm; los parámetros de la PT se ha calculado en la Tabla N° 2.4, para la simulación se utilizó la corriente de impulso de 20 kA según la ecuación (2.20). Los resultados de respuesta transitoria de la Tensiones se presentan en la Figura 2.26, se observa la máxima Tensión en la cima de la torre V_T es 1765 kV y en pie de la torre (PT) la máxima Tensión V_{PT} es 190.2 kV. De los resultados se infiere que la sobretensión en la PT es moderada, mientras que en la cima de la torre relativamente elevada; además, en la Figura 2.27 se muestra la distribución de la onda de corriente de impulso I_G es 19323 A (Rayo), la corriente en la torre a PT I_{G-PT} es de 10405 A y la corriente del cable de guarda al suelo $I_{G-tierra}$ es 8918 A; la corriente que fluye por la PT representa el 54% de la corriente total de impulso.

Figura 2.26 Tensión en la cima y pie de la Torre por caída de Rayo de 20 kA, con Resistencia de PT de 12.3 Ω , suelo con Resistividad de 1000 Ω -m. Modelo de Puesta a Tierra circuito R-C.



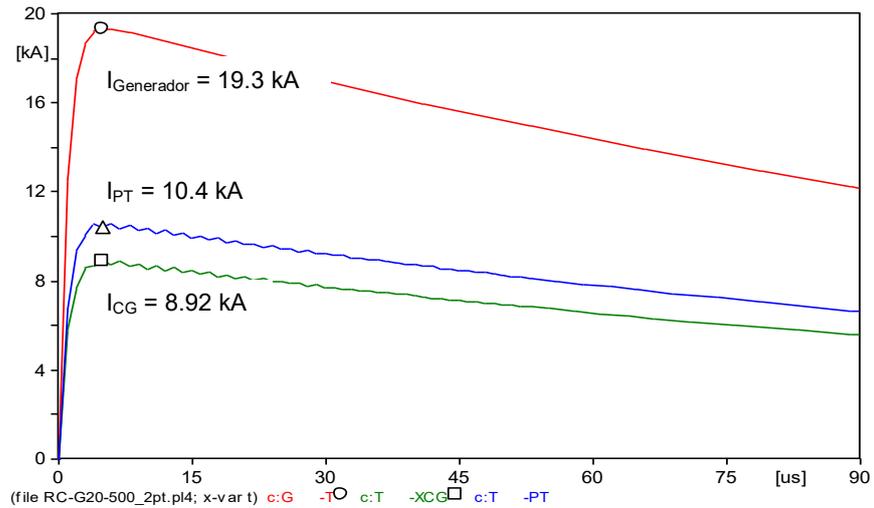


Figura 2.27 Distribución de corriente de Rayo en la Puesta a Tierra ramificada, en suelo con Resistividad de $1000 \Omega\text{-m}$. Modelado de PT en circuito R-C.

La misma corriente del caso anterior se aplicó al electrodo de 25 mm^2 , $1 \times 16 \text{ m}$ de longitud, enterrado en suelo tratado con óxidos metálicos de Resistividad de 5 Ohm-m ; para el tratamiento de los suelos también puede utilizarse con otros compuestos como la bentonita que tiene características más estables; los parámetros de la PT se ha calculado en la Tabla N° 2.5, estos valores se han utilizado para el cálculo de las tensiones en la PT; los resultados se muestra en la figura 2.28, donde se observa que la máxima Tensión en la cima de la torre es 1698 kV a $5 \mu\text{s}$ y en pie de la torre (PT) la Tensión máxima es 218 kV en $1.0 \mu\text{s}$ y 120 kV en $5 \mu\text{s}$. La sobretensión en la PT es relativamente baja, sin embargo, en la cima de la torre es aun elevada, la disipación es relativamente lenta en el orden de 1 ms .

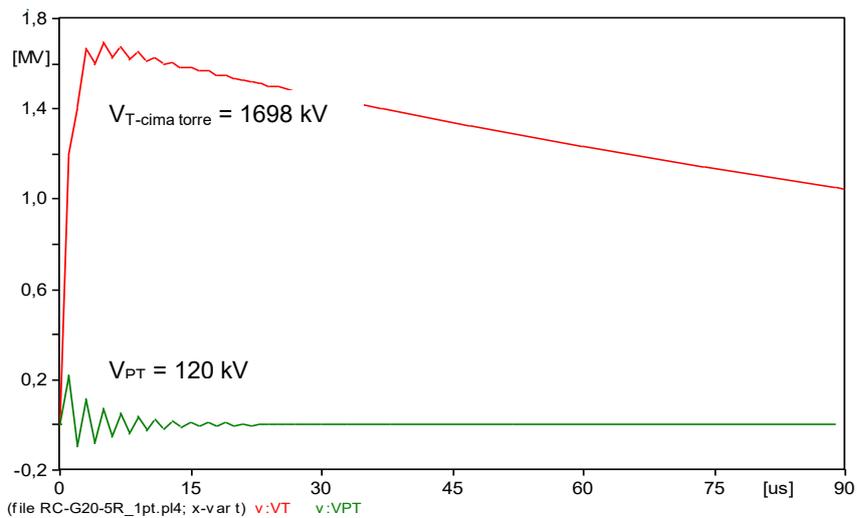


Figura 2.28 Tensión en la cima y pie de la Torre por caída de Rayo de 20 kA , con electrodo de PT de $1 \times 16 \text{ m}$ en suelo tratado con Resistividad de 5 Ohm-m .

A continuación se analizó la influencia de la Impedancia de la torre (Z_t) como Inductancia (se asume $L_t = 66$ mH, los demás elementos de la Tabla N° 2.4), para las mismas características del CG y Puesta a Tierra, se calculó la Tensión en la cima de la torre y pie de torre. Los resultados se presenta en la Figura 2.29, se observa que la Tensión máxima en la cima de la torre es 1134 kV en un tiempo de $2 \mu\text{s}$ y este se reduce abruptamente aproximadamente a 100 V en $6 \mu\text{s}$ disipándose en tiempo reducido; la tensión máxima en la puesta a tierra es 228.4 kV en $1.0 \mu\text{s}$, este se disipa en tiempos muy cortos aproximadamente $10 \mu\text{s}$.

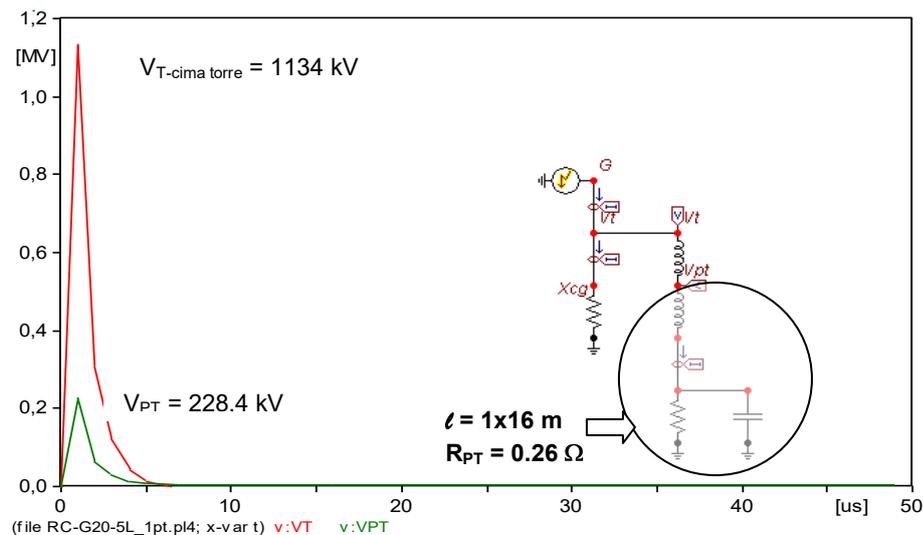


Figura 2.29 Tensión en la cima y pie de la torre por caída de Rayo de 20 kA, $Z_{\text{torre}} = 66 \mu\text{H}$, con electrodo de PT de 1×16 m en suelo tratado con Resistividad de 5 Ohm-m.

Discusión sobre el Modelo de PT como Circuito R-C

El presente modelo es el más simplificado y con aplicaciones básicas, con muchas restricciones:

- Se considera parámetros constantes, en un suelo uniforme.
- Las ondas de rayo son de alta frecuencia, el modelo es independiente de la frecuencia.
- Se ha considerado suelo natural uniforme y suelo tratado en ambos casos estables, con capacidad de conductividad y disipación de energía.
- El modelo no considera la ionización del suelo.
- En las aplicaciones comerciales de este modelo, los valores de la puesta a tierra se obtienen mediante aplicaciones empíricas con un análisis no concordante con los procesos físicos que se producen ante las descargas atmosféricas.
- En este modelado se muestra que el efecto capacitivo en suelo de baja resistividad y tratado, facilita la absorción y conducción de la energía transitoria de corta duración.

CAPÍTULO 3

EXAMEN A MODELADOS PRECURSORES DE PUESTAS A TIERRA CON RESPUESTA TRANSITORIA

3.1 Introducción

Este capítulo presenta un examen de los trabajos sobre el tema tratado a lo largo del tiempo, publicados con los diferentes métodos propuestos, con las herramientas técnicas necesarias para el desarrollo de estudios de aterramientos no extensos.

Primero se examinan los modelos más sustentados de Puesta a Tierra en estado estacionario, considerando que la normativa en nuestro país, solo comprende dichos alcances, prescritos en el Código Nacional de Electricidad (Suministros y Utilización); posteriormente se examinaron trabajos publicados sobre Modelado de Puesta a Tierra con respuesta transitoria ante corrientes de impulso, verificando las soluciones analíticas adoptadas con la creciente capacidad de procesamiento digital de las últimas décadas; asimismo, se examinaron las tres metodologías más estudiadas sobre PT con respuesta transitoria, con aproximación por: Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Líneas de Transmisión (TL) y Teoría de Circuitos Eléctricos (TC); identificando las ventajas, desventajas y límites de validación.

Es de notar que la aproximación por Teoría de Campos Electromagnéticos presenta elevado rigor físico y matemático, así como complejidad del análisis y largo tiempo de cálculo, que lo hace poco práctico y adaptable para el diseño de ingeniería no especializado; de otro lado, en los distintos trabajos revisados se ha observado que los resultados obtenidos a partir de modelos con aproximación por Teoría de Líneas de Transmisión, son más asequibles y presentan resultados con excelente concordancia, con la ventaja de requerir menos inversión de tiempo, o recursos económicos para adquirir programas, motivo por el cual se adoptó para el desarrollo como tema principal del presente trabajo.

3.2 Resistencia de Puesta a Tierra en Estado Estacionario

La Resistencia de Puesta a Tierra al pie de las torres o soportes de las Líneas Eléctricas donde hay alta incidencia de rayos, es muy importante en el desempeño del aislamiento de una línea de transmisión; un bajo valor es esencial para evitar la disrupción que

ocasionan las ondas de impulso de rayo, especialmente cuando los componentes reactivos inductivos de su armado son también pequeños.

3.2.1 Criterios Generales

El valor de la Resistencia de puesta a tierra varia con la Resistividad del suelo y en conjunto con sus componentes reactivos, con los valores que toma la corriente en el desarrollo de las ondas de impulso que fluyen en el armado de PT, el suelo en tal caso se comporta como un dieléctrico con muchas pérdidas, y, si la densidad de corriente es muy alta la falla de dicho dieléctrico también ocurrirá, causando una súbita reducción del valor de la Resistencia, pero alterando la Resistividad del suelo por la no linealidad de la Resistencia de puesta a tierra con la corriente; ello da una mayor complejidad al cálculo de la aplicación de las ondas de Corriente o Tensión producidas por las descargas de rayo.

En aplicaciones de ingeniería, los electrodos de Puesta a Tierra utilizados con mayor frecuencia para la protección de Líneas Eléctricas de Transmisión de Energía, son: contrapeso de conductor horizontal enterrado, solo o con terminales de varilla vertical.

a) Varilla Vertical de Puesta a Tierra

Se usan como electrodo en arreglos de dos o mas varillas de 6 a 12 pies de longitud y menos de 2.5 pulg de diámetro en paralelo y configuraciones rectilínea, en triangulo, cuadrado, circunferencia, etc. para obtener una PT con Resistencia menor a 25 Ohm (CNE Suministros y Utilización, en el Perú); también se usan electrodos verticales de mayor longitud por empalme.

Este tipo de electrodo ha sido estudiado por [12] y [14] experimentalmente y analíticamente, lográndose el modelado para estado estable y para respuesta transitoria a corrientes de rayo, se le usa para suelos de Resistividad de valores bajos (menores a 100 Ω -m), lo cual es raro encontrar en el Perú.

b) Contrapeso Horizontal Enterrado

Esta conformado por un conductor horizontal enterrado con arreglo de uno o más ramales o en trayectorias cerradas para obtener una baja Resistencia menor de 25 Ohm (CNE Suministros y Utilización, en Perú); este tipo de electrodo también ha sido estudiado ampliamente habiéndose logrado el modelado para el estado estable y para respuesta transitoria a corrientes de impulso tipo rayo hasta obtener diseños aproximados, que cumplen con la protección del aislamiento de los sistemas eléctricos; estando solo o combinado, en suelos con Resistividades baja, media y alta.

En esta sección se efectuará una revisión al cálculo de la Puesta a Tierra para los electrodos mas utilizados en LT, como son la varilla vertical y el conductor horizontal enterrados; así como, la combinación de ambos.

3.2.2 Modelado de Resistencia de Puesta a Tierra en Estado Estacionario

La configuración básica de electrodo simple para el análisis, es una esfera enterrada o un hemisferio enterrado; asumiendo uniforme la Resistividad (ρ) del suelo, la corriente (I) desde el hemisferio de radio (X) pasa al suelo con una densidad de corriente (i) dada por la ecuación (3.1).

$$i = \frac{I}{2\pi X^2} \quad (3.1)$$

Según la ley de Ohm, esta corriente produce en el suelo una intensidad de Campo Eléctrico, dada por la ecuación (3.2).

$$E = \rho * i = \frac{\rho * I}{2\pi X^2} \quad (3.2)$$

La variación de la tensión (V) se determina como la integral de línea de la intensidad del Campo Eléctrico entre dos superficies equipotenciales de radios (a y x), distintas a la distancia intermedia (X); el cual se calcula por la ecuación (3.3).

$$V = \int_a^x E dX = \frac{\rho * I}{2\pi} \int_a^x \frac{dX}{X^2} = \frac{\rho * I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{X} \right) \quad (3.3)$$

La tensión total entre el hemisferio y un punto muy distante, corresponde a $X = \infty$, dada por la ecuación (3.4).

$$V = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (3.4)$$

Y la Resistencia total que corresponde a las líneas de flujo que divergen del hemisferio, se obtiene según la ecuación (3.5).

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi * a} \quad (3.5)$$

En un fenómeno transitorio, el comportamiento satisfactorio de la Puesta a Tierra ante un impulso de rayo, que asegure la disipación de la corriente de rayo, está determinado por el valor de la Resistencia en el límite del tiempo, dado por el valor de convergencia en estado estacionario (R_{DC}).

3.2.2.1 Varilla conductora como electrodo vertical de Puesta a Tierra

a) **Aportes de R. Rudenberg y Dwight** han convergido después del análisis, a la expresión matemática de la Resistencia de dispersión para una varilla conductora dado por la ecuación de Lagrange (3.6).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} * \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \quad (3.6)$$

b) **Aporte de Erling Ditlef Sunde**, con el propósito de aplicarlo en la protección a los sistemas eléctricos y vidas humanas, ha logrado deducir otra expresión matemática para la Resistencia de Puesta a Tierra, dada por la ecuación (3.7).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} \left[\ln\left(\frac{8l}{d}\right) - 1 \right], \quad \text{si } l \gg d \quad (3.7)$$

Donde

- R : Resistencia en estado estable o R_{DC} (Ohm),
- ρ : Resistividad del suelo (ohm-m),
- l : Longitud de varilla conductora (m),
- d : Diámetro de la varilla conductora (m).

El examen de ambas ecuaciones (3.6) y (3.7), indica que el diámetro de la varilla es poco significativo pero no decisivo, afecta el término $\ln(4 * l/d)$ o $\ln(8 * l/d)$, pero la longitud “ l ” es más importante; debido a que la Resistencia de PT no disminuye directamente, pero si inversamente con la longitud, la Figura 3.1 muestra la Resistencia de Puesta a Tierra vs la longitud del electrodo, para los modelos de PT [12] y [14] con varilla de 16 mm ϕ en suelo de Resistividad de 100 Ohm-m.

Ambos modelos tienen similar convergencia y los valores experimentales corroboran el comportamiento físico del fenómeno, estos modelos tienen aplicaciones para los diseños de PT en ingeniería.

**MODELADO DE PUESTA A TIERRA EN ESTADO ESTACIONARIO
ELECTRODO CON VARILLA VERTICAL**

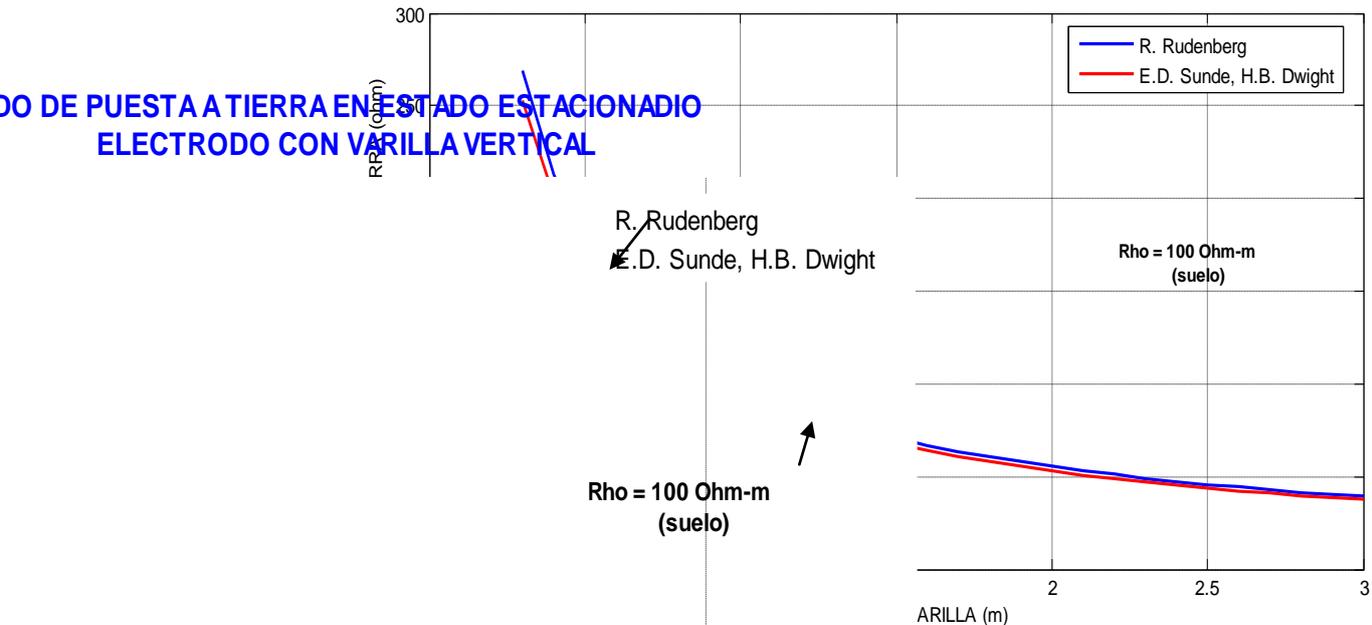


Figura 3.1 Resistencia de Puesta a Tierra vs Longitud de la varilla vertical con 16 mm de diámetro en suelo de $\rho = 100 \Omega\text{-m}$, según los Modelos de [12] y [14].

Utilizando el Modelo de [12], en la Figura 3.2 se ha graficado la Resistencia de Puesta a



Tierra para diversas secciones o diámetros de electrodos tipo varilla vertical en función de su longitud en suelo con Resistividad de Puesta a Tierra vs LONGITUD - MODELO E.D. SUNDE

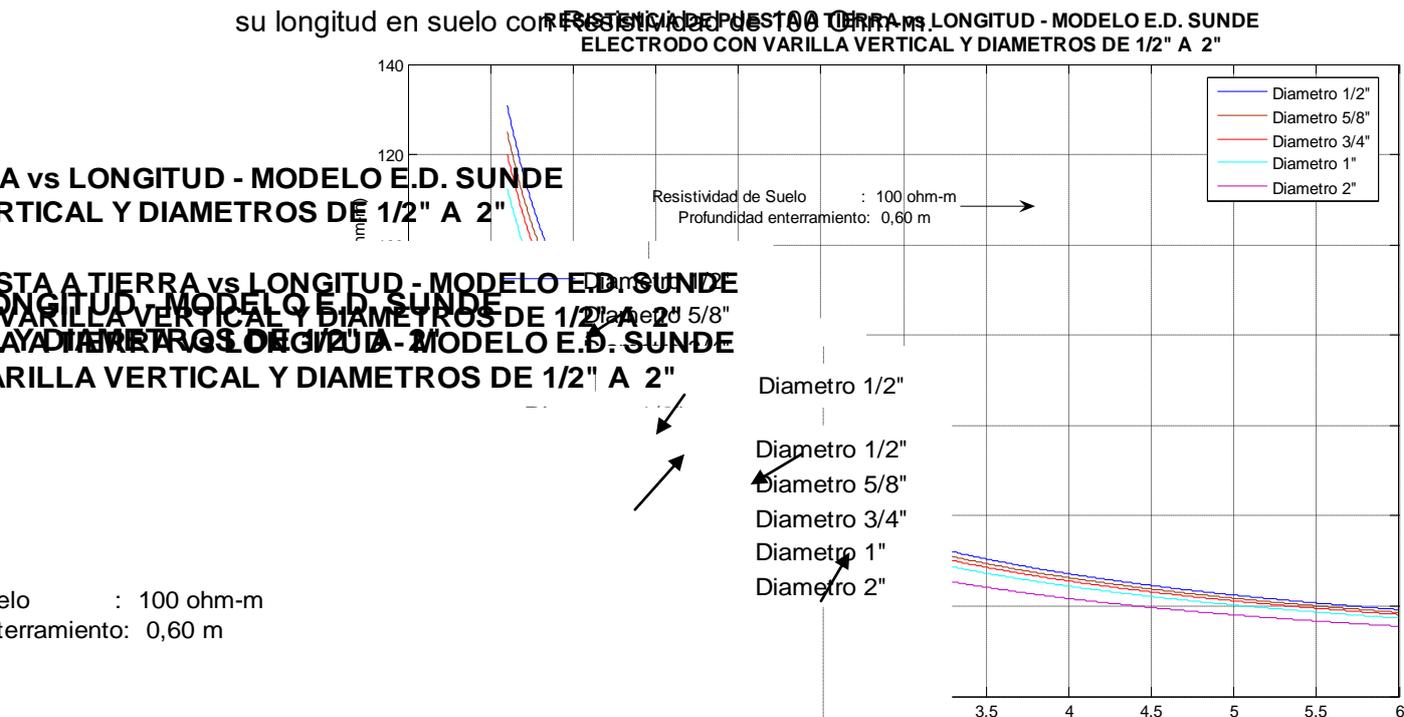


Figura 3.2 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, para varilla vertical con diámetros de 13mm (1/2") a 25 mm (2") en suelo de Resistividad de 100 Ohm-m.

La Resistencia de puesta a tierra de electrodos varilla vertical, también puede ser determinada para configuración de varias varillas verticales conectadas en paralelo; si el espaciado entre ellas es grande ($> 3 l_{varilla}$) comparado con la longitud individual, la Resistencia de PT se reduce en forma amortiguada en proporción al número de varillas, si las varillas están cercanas o juntas, funcionara como una PT única; no obstante, el numero óptimo de varillas para una PT puntual es 4, el uso de mas varillas se justifica como parte del diseño de Redes de Puesta a Tierra.

3.2.2.2 Electrodo de Puesta a Tierra de conductor simple horizontal enterrado

El valor de la Resistencia de Puesta a Tierra en estado estacionario del electrodo simple horizontal enterrado, en función de los parámetros del conductor, el suelo y la profundidad de enterramiento; fue analizado por [12], [14] y [10], los resultados se presentan a continuación.

a) Aporte de E.D. Sunde [12], la expresión de la Resistencia de PT de un conductor simple horizontal enterrado en el suelo, esta dada por (3.8).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} \left[\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{dh}}\right) - 1 \right], \quad \text{Si } h \ll l \quad (3.8)$$

b) Aporte de R. Rudenberg [14], la expresión de la Resistencia de PT de un electrodo

conductor simple horizontal enterrado en el suelo, esta dado por (3.9).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} * \ln\left(\frac{l}{\sqrt{dh}}\right) \quad (3.9)$$

c) **Aporte de H.B. Dwight [10]**, ha deducido la expresión de la Resistencia de PT de un electrodo conductor simple horizontal enterrado en el suelo, dado por (3.10).

$$R = \frac{\rho}{2\pi d} \left[\ln\left(\frac{2 * l^2}{\sqrt{d * h^3}}\right) - 2 + \frac{2 * h}{l} - \left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0.5 * \left(\frac{h}{l}\right)^4 \right] \quad (3.10)$$

Donde:

- ℓ : Longitud del conductor (m)
- d : Diámetro del conductor (m)
- h : Profundidad de enterrado (m).

En Líneas de Transmisión (LT) se usan electrodos enterrados en diversos arreglos, el más utilizado es **el conductor horizontal simple enterrado en el suelo a una profundidad “h”**, en aplicaciones de este trabajo se ha usado los datos de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de los conductores y Suelo, Dimensionamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra.

Electrodo conductor de Puesta a Tierra en Cobre			Suelo	Instalación bajo la Superficie h (m)
Longitud (m)	Sección (mm ²)	Diámetro (mm)	Resistividad (Ohm-m)	
Variable	25	6,42	1000.00	0,60
	35	7,56	500.00	

Para efectos comparativos de los Modelos de la Resistencia de PT obtenidos por [12], [14] y [10]; utilizando las ecuaciones (3.8), (3.9) y (3.10) se ha calculado y graficado la Resistencia de Puesta a Tierra vs Longitud; en la Figura 3.3 se muestra para conductor horizontal simple de 35 mm² en suelo uniforme de Resistividad de 500 Ohm-m y en la Figura 3.4 para conductor de 25 mm² en suelo uniforme de Resistividad de 1000 Ohm-m.

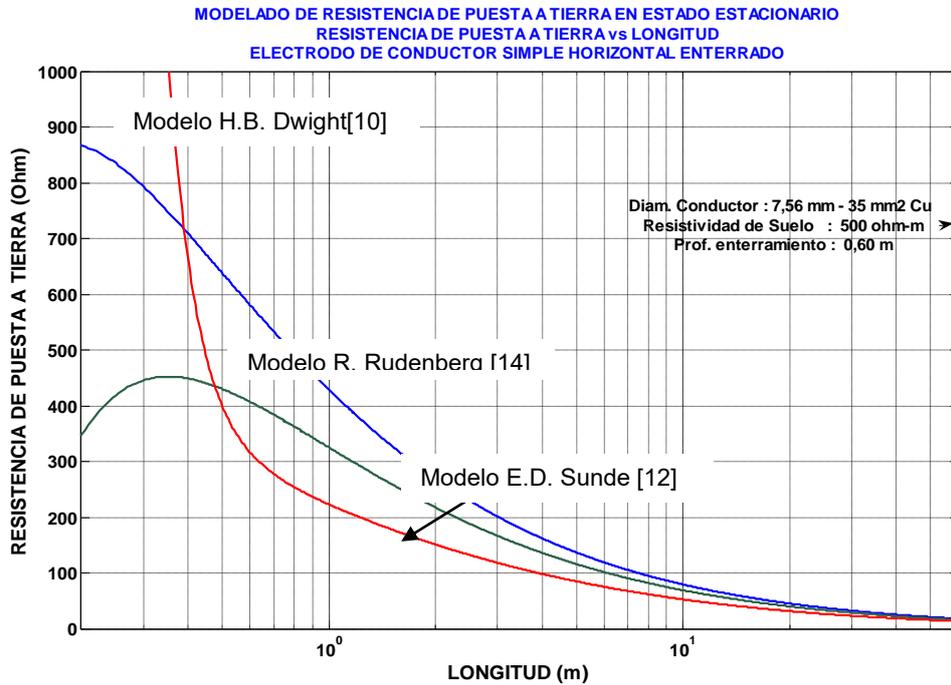


Figura 3.3 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductor simple horizontal 35 mm² -Cu enterrado 0,60 m, Resistividad del suelo 500 Ohm-m. Modelos de PT en [10], [12] y [14].

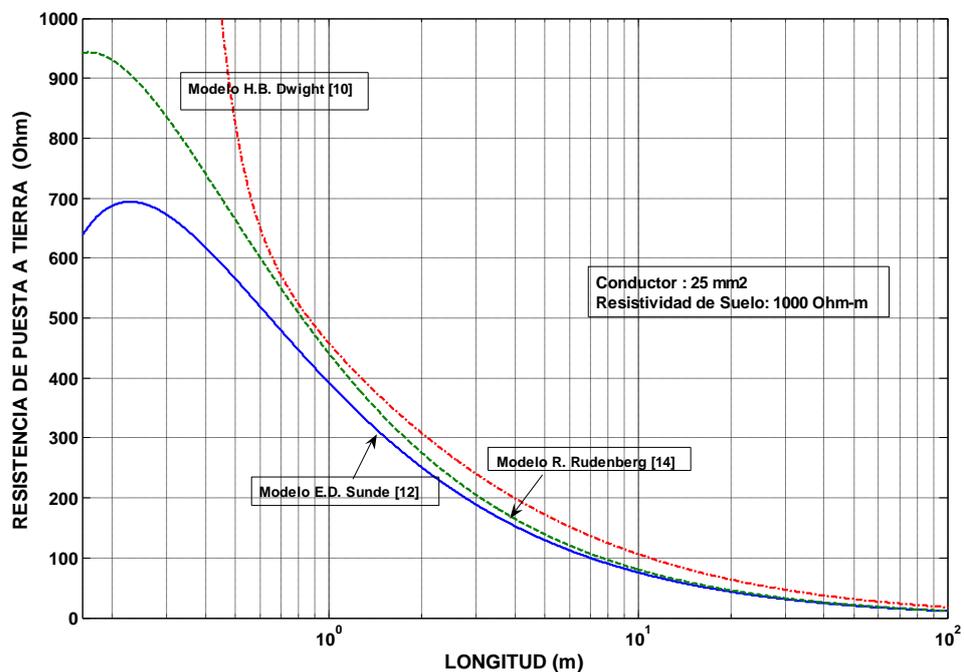


Figura 3.4 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductor simple horizontal 25 mm² -Cu enterrado a 0,60 m, Resistividad del suelo 1000 Ohm-m. Modelos de PT en [10], [12] y [14].

En las figuras 3.3 y 3.4 se observa que para el modelo de H.B. Dwight [10] presenta valores de la Resistencia de PT muy dispersos, para longitudes menores a 1 m tiende al infinito, para longitudes entre 1 m a 30 m los valores son menores a los otros dos modelos, y para longitudes mayores a 30 m se logra la convergencia; este modelo no presenta una adecuada convergencia respecto a los dos modelos analizados, por lo cual se le desestima.

Analizando los Modelos [12] y [14] se observa que el Modelo de [14] para una longitud del conductor menor a 1 m da una Resistencia el doble que el Modelo [12], para la longitud entre 3 m a 20 m esta diferencia es del 20% mayor y para longitudes mayores a 20m el valor de la Resistencia converge para los dos modelos y tiene idénticos valores. Se concluye que el modelado de E.D. Sunde [12] presenta mejor ajuste al fenómeno físico real; sin embargo en ingeniería ambos modelados son utilizados.

En aplicaciones del Modelado de [12] se han efectuado los cálculos de la Resistencia de PT en estado estacionario o CC, para electrodos horizontales con sección de conductor de 25mm^2 , 35mm^2 , 50mm^2 y 70mm^2 en material de cobre, en función de la longitud $R(\ell)$; la profundidad de enterramiento de 0,6 m y Resistividad del suelo homogéneo de 500 Ohm-m, para todos los electrodos.

Se ha calculado las Resistencias de PT para cada diámetro de conductor en función de la longitud del electrodo, usando el MATLAB; los resultados se presentan en la figura 3.5, se observa que la Resistencia de PT es ligeramente mayor en toda la longitud del electrodo para conductores de menor sección o diámetro. La selección de la sección deberá verificarse por capacidad de disipación de corriente, temperatura y tiempo de dispersión.

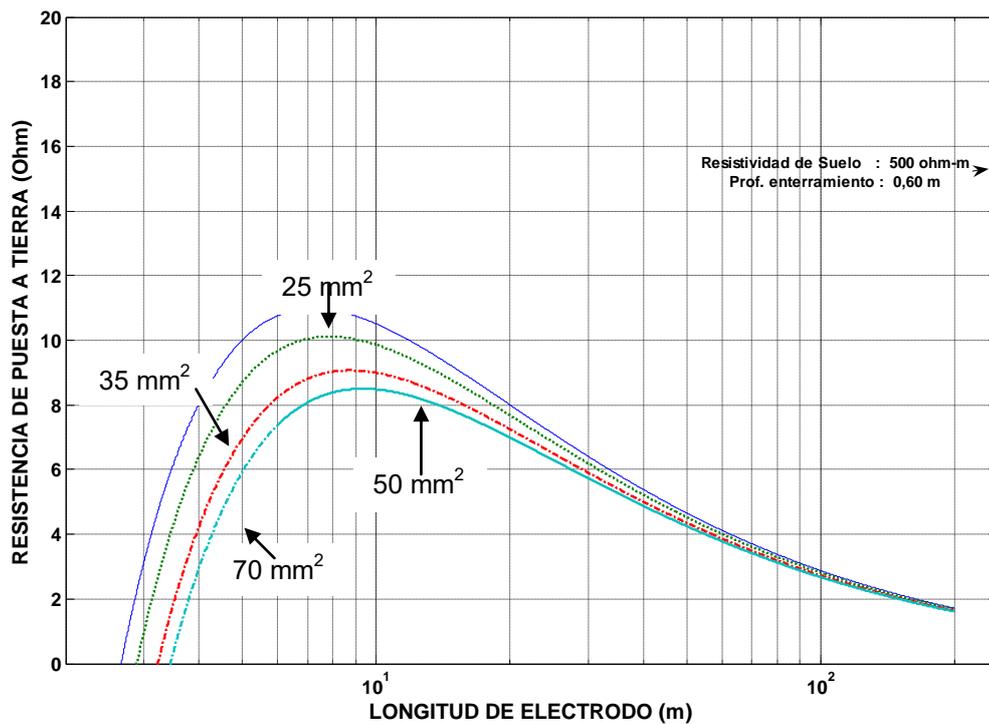


Figura 3.5 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductores de 25, 35, 50 y 70 mm²-Cu simple horizontal enterrado a 0,60m, Resistividad de 500 Ohm-m. Modelo de PT en [12].

3.3 Modelados Precursores de Impedancia de Puestas a Tierra con Respuesta Transitoria a Corrientes de Impulso

De la recopilación de los primeros estudios que datan del siglo pasado se ha encontrado que en 1954 surge el primer intento de establecer las normas y especificaciones mínimas para el diseño de instalaciones de puesta a tierra, a cargo del *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE), actual *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), con la publicación del artículo "*Application Guide on Methods of Substation Grounding*".

En el desarrollo del modelado de Puestas a Tierra se ha utilizado los métodos analíticos y empíricos, con investigación experimental y teórica del comportamiento transitorio de las Puestas a Tierra bajo descargas de impulso tipo rayo; comprende análisis complejos considerando la diversidad de factores que convergen en el proceso; temas de investigación en este tópico a lo largo del tiempo, se han identificado los métodos analíticos con base computacional de aproximación por: Teoría de Líneas de Transmisión (TL), Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Circuitos Eléctricos (TC). En las secciones siguientes se describen los trabajos más relevantes en el Modelado de PT con respuesta dinámica de estas tres teorías: TCE, TL, TC.

3.3.1 Modelado de Puesta a Tierra aproximado por Teoría de Líneas de Transmisión

El Modelo de Puesta a Tierra se aproxima al de una Línea de Transmisión (LT) aérea, para analizar su comportamiento transitorio de un conductor enterrado (contrapeso de PT) el cual tiene un comportamiento similar al de la Línea de Transmisión aérea; el Modelo final aplicando esta teoría será desarrollado en el capítulo 4.

Con este modelo se puede obtener la respuesta de la PT en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, e incluir la ionización del suelo en el dominio del tiempo, y en forma similar al modelado aproximado por Teoría del Circuito Eléctrico (TC) se pueden incluir los acoplamientos mutuos entre los diferentes tramos de los conductores de PT; asimismo, con el modelo aproximado a una LT se puede predecir el retraso de la propagación de onda, que se hace importante cuando la PT tiene gran tamaño, una ventaja adicional es que el tiempo de cálculo, es muy reducido comparado con el modelo aproximado por la Teoría del Campo Electromagnético (TCE).

El modelo preliminar presentado en esta sección está basado en la Teoría de Líneas de Transmisión, en esta sección se sintetiza el resultado logrado por los investigadores

predecesores que examinaron analíticamente con un nivel de complejidad dado, esto se describe a continuación:

A partir de 1934, **L.V. Bewley** en [18,19, 20], realizó trabajos sobre la protección de sistemas eléctricos contra los rayos y dedujo la impedancia de un conductor de puesta a tierra en el punto de inyección, para una tensión aplicada de escalón unitaria.

El conductor de puesta a tierra es representado por parámetros distribuidos de circuito PI, asociados entre sí en cascada, en un medio con pérdidas, según la figura 3.6.

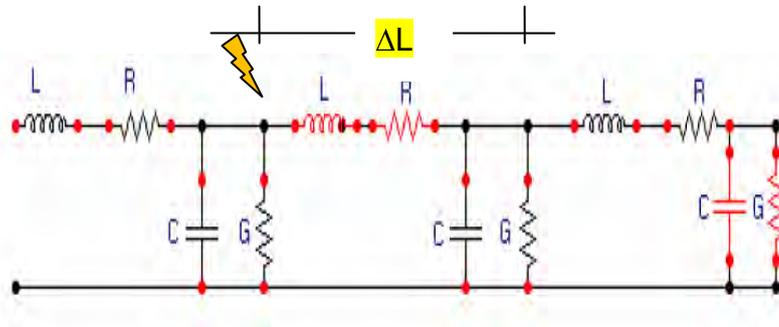


Figura 3.6 Circuito equivalente de la Línea de Transmisión con pérdidas, aproximado a un conductor de Puesta a Tierra.

El valor de la impedancia se ha deducido asumiendo que el conductor es de una Línea de Transmisión con grandes pérdidas y con parámetros constantes por unidad de longitud; la Impedancia Transitoria del conductor de PT, comienza con una Impedancia efectiva de onda $Z_s = \sqrt{L/C}$ inicial y termina con el efecto de Resistencia efectiva de fuga

($R = \frac{1}{G l_c}$) final; el tiempo de transición entre estos dos efectos depende de la

Resistividad del suelo y de la Onda de Tensión; las investigaciones relativas al conductor de PT fueron resumidos en "*Traveling waves in transmission systems*" [20].

El principal inconveniente de este modelado, es que no considera los acoplamientos existentes con electrodos cercanos de una red compleja de puesta a tierra, solo se puede aplicar a sistemas de puesta a tierra elementales.

Bellaschi y Armington [21] en 1943 desarrollaron el cálculo analítico de la respuesta de Tensión para una varilla de Puesta a Tierra, frente a corrientes de impulso, logrando determinar expresiones de Tensión en el punto de inyección, con una serie de convergencia lenta; asimismo, para varillas de puesta a tierra de gran longitud, determinaron el circuito equivalente con Resistencia distribuida, calcularon la Inductancia

del conductor de PT necesario para el cálculo de la impedancia de impulso; este modelo no consideró los efectos capacitivos.

Estos estudios sirvieron para calcular los valores bajos de las impedancias de impulso, íntimamente relacionados con la ionización del suelo, e inferir que las mismas fórmulas usadas en el cálculo de Resistencia medida en 60Hz, podrían ser usadas para calcular a Impedancia de Impulso efectuando pequeñas modificaciones

Erling Ditlef Sunde en 1949 desarrolló uno de los trabajos más importantes y clásicos de los sistemas de puesta a tierra, en *“Earth conduction effects in Transmission Systems”* [12], el cual hasta hoy es una sólida fuente de consulta para la solución de problemas de PT; este trabajo está basado en la Teoría del Campo Electromagnético que aplica las ecuaciones de James C. Maxwell.

E. D. Sunde presentó no sólo el cálculo de la Resistencia para corriente continua o estado estable de diferentes configuraciones de PT, sino que también desarrolló una exhaustiva teoría del comportamiento de la PT en alta frecuencia; fue uno de los primeros en introducir el concepto de Línea de Transmisión con parámetros por unidad de longitud, con dependencia de la frecuencia; para modelar el comportamiento transitorio del conductor de puesta a tierra simple horizontal, bajo la superficie del suelo, ante impulsos directos de corriente de Rayo; utilizando las ecuaciones del telegrafista o de Ondas viajeras, (3.11) y (3.12).

$$\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad (3.11)$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad (3.12)$$

Donde:

Z (Γ): Impedancia por unidad de longitud del conductor.

Y (Γ): Admitancia transversal por unidad de longitud del conductor.

Para un cable horizontal simple enterrado, la Impedancia (Z) y admitancia (Y) se calculan por las expresiones (3.13), (3.14) y (3.15).

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})} * \log\left(\frac{1,12}{\Gamma}\right) \right]^{-1} \quad (3.13)$$

$$Z(\Gamma) = Z_i + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} * \log\left(\frac{1,85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}}\right) \quad (3.14)$$

$$\gamma^2 = i\omega\mu_0(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil}) \quad (3.15)$$

Donde:

- Z_i : Impedancia interna por unidad de longitud
- Y_i : Admitancia por unidad de longitud del aislamiento del conductor, es cero cuando el cable está en perfecto contacto con el suelo.
- γ_c : Coeficiente de propagación característica de la onda.
- σ_{soil} : Conductividad eléctrica del suelo
- ϵ_{soil} : Permitividad eléctrica del suelo
- ω : frecuencia angular de la onda

La constante de propagación $\Gamma(Z, Y)$ está dada por la ecuación (3.16).

$$\Gamma = \sqrt{Z(\Gamma) * Y(\Gamma)} \quad (3.16)$$

El modelado del comportamiento transitorio de la puesta a tierra, es adaptado con el principio de la Teoría de Línea de Transmisión, y fue derivado analíticamente bajo ciertas aproximaciones para soluciones rápidas, debido que en esa época no se contaba con ordenadores con alta capacidad. De ahí, que estudios analíticos de modelados fueron limitados a sistemas de puesta a tierra simples, como el conductor de PT simple o varilla de puesta a tierra.

Verma [49], Mazzetti [50] y Velázquez [51] aplicaron el concepto de pérdidas de la Línea de Transmisión en el conductor de puesta a tierra horizontal, descrito a partir de las ecuaciones de Onda, dado por.

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dt} + r_c I = 0 \quad (3.17.1)$$

$$\frac{dI}{dx} + C \frac{dV}{dt} + GV = 0 \quad (3.17.2)$$

La solución de las ecuaciones (3.17.1) y (3.17.2) se orientaron para obtener analíticamente la corriente y tensión distribuida a lo largo del conductor de PT en el dominio de Laplace (s), se obtiene por Transformada de Laplace y luego se convierte al dominio del tiempo, mediante el uso de la Transformada Inversa de Laplace.

Trabajos de **Lorentzou [52]**, partiendo de las ecuaciones de Onda o D'Alembert (3.17) derivó directamente las ecuaciones de corriente y tensión distribuido a lo largo del conductor en el dominio de tiempo, aproximando el modelado de PT a la LT; previamente se calcula los parámetros de R, L, C, G en valores p.u. de longitud uniforme a lo largo de los conductores de puesta a tierra.

Menter y Grcev [53] para el cálculo de la impedancia de PT, mediante el análisis transitorio, también aproximó por la Teoría de Líneas de Transmisión, reemplazando en las ecuaciones dependientes de la frecuencia de [12], para la impedancia longitudinal $Z(\Gamma)$ y admitancia transversal $Y(\Gamma)$ en p.u de longitud que es dependiente de la frecuencia, dado por las ecuaciones (3.13) y (3.14). Los parámetros fueron calculados numéricamente, usando el modelo de la PT aproximado a LT y combinando el conductor contrapeso con otras partes, para una subestación en 123 kV con aplicación del EMTP.

3.3.2 Modelo de Puesta a Tierra aproximado por Teoría del Campo Electromagnético

El cálculo de la impedancia de PT con aproximación por Teoría del Campo Electromagnético (TCE), es el método más riguroso física y matemáticamente para modelar el comportamiento transitorio de la Puesta a Tierra (PT), porque este resuelve todas las ecuaciones de Maxwell con grandes aproximaciones; utilizando el Método de Momentos (MoM) o el Método de Elementos Finitos (FEM).

El problema transitorio se resuelve en el dominio de la frecuencia aplicado a sistemas lineales y a cada frecuencia se asocia una función de transferencia. La solución en el dominio del tiempo es obtenida con la Transformada Inversa de Fourier. El modelo está basado en la solución aproximada de los campos electromagnéticos para segmentos cilíndricos de conductores, con inyección de corrientes incrementales. Para cada segmento, se calcula el campo eléctrico debido a la corriente distribuida a lo largo de la superficie y carga del conductor, por medio del potencial eléctrico escalar y del potencial magnético vectorial.

El modelo para el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra basado en el MoM fue desarrollado por **L.D. Grcev** en [35, 38]. Este método parte de la ecuación integral del Maxwell del campo eléctrico dado por.

$$E = \frac{1}{4\pi j\omega \epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int t' * I_L(r) G_n(r, r') dl \quad (3.18)$$

$$G_n(r, r') = G_1(r, r') + G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (3.19)$$

Donde:

E : Campo eléctrico total dispersado a lo largo de la superficie del conductor.

$I_L(r)$: Corriente longitudinal que fluyendo a lo largo del conductor.

$G_n(r, r')$: Función completa de Green.

$G_i(r,r')$, $G_i(r,r')$: Función Dinámica de Green, para el campo eléctrico en la posición r , debido al elemento corriente y su imagen.

$G_s(r,r')$: Corrección de la función de Green, como función de las Integrales de Somnerfeld en la interfase aire-suelo.

La Permitividad eléctrica media compleja, determinado por

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \quad (3.20)$$

La Constante de Propagación de onda (γ) en el medio material, dado por:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (3.21)$$

Donde:

- σ : conductividad eléctrica,
- ε : permitividad eléctrica y
- μ : permeabilidad magnética.

Si las fuentes de corriente para cada segmento del conductor de PT son conocidas, el campo eléctrico alrededor del electrodo de PT y la corriente de fuga del segmento conductor de puesta a tierra al suelo puede ser calculado. El potencial en puntos diferentes sobre la superficie del conductor de puesta a tierra podría ser calculado por la integración del campo eléctrico normal del punto sobre la superficie del conductor a la tierra remota. El componente longitudinal del campo eléctrico no está incluido, como es dependiente del camino y su contribución es insignificante comparada a la del campo eléctrico normal para estudios de rayos. Finalmente, la respuesta en el dominio del tiempo por la teoría del campo electromagnético aproximado basado en el Método de Momento (MoM) resuelve todas las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, esto tiene suposiciones mínimas. Cuanto más alto es la frecuencia de las fuentes de entrada, mayor es la exactitud del campo electromagnético aproximado. Este modelo es demasiado complejo para ser puesto en práctica; sin embargo, cuando la estructura de PT es grande, el tiempo de cómputo es muy grande. Otra desventaja de la TCE es su procedimiento de solución del dominio de la frecuencia que no puede ser fácilmente modificado para incluir la no linealidad debido a la ionización de suelo, y combinar otros dispositivos no lineales que tienen modelos en el dominio de tiempo.

L. Grcev y Dawalibi [35] en 1990 desarrollaron un trabajo muy importante sobre el Modelo de PT basado en la TCE aplicado para electrodos horizontales, donde el Modelo electromagnético es descrito en forma detallada, el problema transitorio es resuelto en el dominio de la frecuencia, aplicándose a sistemas lineales; para cada frecuencia se asocia

una función de transferencia, la solución en el dominio del tiempo es obtenida con la Transformada Inversa de Fourier. El modelo esta basado en la solución de campos electromagnéticos para segmentos conductores cilíndricos con aproximaciones de corrientes filamentosas, para cada segmento se calcula el campo eléctrico debido a distribuciones de corriente y carga a lo largo de la superficie del conductor, por medio del potencial escalar y potencial vectorial.

B. Nekhoul, P. Labie [43] en 1996 desarrollaron otro método de aplicación aproximada por la TCE para el análisis transitorio de la PT, el modelo parte de las ecuaciones de energía eléctricas o magnéticas, referidas a las ecuaciones diferenciales parciales de Maxwell, con respecto al Vector Potencial Magnético (\bar{A}) y el Potencial Eléctrico escalar (V) en los diferentes volúmenes del sistema. Se pone en práctica utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM) para las soluciones, basadas en el principio físico de reducir al mínimo la energía en el sistema. Las funciones finales de \bar{A} y V están dados en las ecuaciones 3.22.1 y 3.22.2 para el campo en el suelo y 3.22.3 para el Campo en el aire, que involucra la función de ponderación (\bar{W}) y (w), para el potencial vectorial y potencial escalar respectivamente.

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla_x \bar{W})^* (\nabla_x \bar{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla^* \bar{W}) (\nabla^* \bar{A}) + (\sigma_{soil} + \varepsilon_{soil}) (j\omega \bar{W}^* \bar{A} + \bar{W}^* \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (3.22.1)$$

$$\int_{\Omega} (\sigma_{soil} + \varepsilon_{soil}) \nabla w (j\omega \bar{A} + \nabla V) d\Omega = 0 \quad (3.22.2)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla_x w)^* (\nabla_x \bar{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla^* w) (\nabla^* \bar{A}) \right) d\Omega = 0 \quad (3.22.3)$$

Donde:

$d\Omega$: Diferencial volumétrico del sistema

La solución numérica de las referidas ecuaciones fue transformada a ecuaciones lineales, dividiendo todo el sistema en N pequeños volúmenes o elementos; la dificultad en esta aproximación es transformar las fronteras abiertas de ambos ambientes aire y suelo, es un problema de frontera cerrado que simplificará el problema usando la transformación espacial; la ventaja principal de esta aproximación de campo electromagnético basado en el FEM consiste en que la discretización del dominio (la geometría o el medio) pueden ser sumamente flexibles con parches no uniformes o elementos que fácilmente pueden describir formas complejas y la ionización del suelo puede ser incluida en el modelado [43]. Sin embargo, este método aún es más complicado que el Método de Momento (MoM), porque directamente no resuelve las ecuaciones del Maxwell.

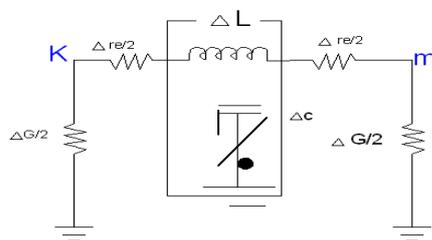
3.3.3 Modelo de Puesta Tierra aproximado por Teoría del Circuito Eléctrico

Uno de los métodos usado con mucha frecuencia, para modelar el comportamiento transitorio de la Puesta a Tierra con geometría compleja, con aproximación por Teoría de Circuitos Eléctricos (TC), toma en cuenta las siguientes consideraciones:

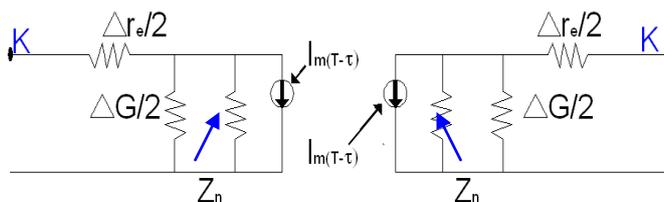
- Dividir el conductor de puesta a tierra en muchos segmentos finitos.
- Crear el circuito equivalente con parámetros concentrados para cada segmento y calcular los valores de la Inductancia propia y mutua (ΔL), Capacitancia (ΔC), Conductancia (ΔG) y Resistencia interna (Δr_e).
- Utilizar las leyes de Kirchoff para resolver las ecuaciones nodales del circuito equivalente o red, el cual representa toda la estructura de la Puesta a Tierra.

A. P. Meliopoulos [28] en 1983 desarrolló el modelo aproximado a circuito eléctrico para el análisis transitorio de la PT al impulso de Rayo, para ello uso el valor de los parámetros en p.u. de longitud (ΔL , ΔC , ΔG y Δr_e) para cada segmento, independientes de la frecuencia. Para el cálculo en el medio conductorivo semi-infinito de la tierra, utilizó la ecuación de Laplace del potencial ($\nabla^2 V = 0$).

Lo interesante de este trabajo es que cada segmento del conductor de puesta a tierra fue substituido como una línea de transmisión sin pérdidas y dos elementos suplementarios shunt (conductancia y capacitancia) de fuga a tierra, según se muestra en la figura 3.7 a) que fue transformado al circuito en la figura 3.7 b).



3.7 a) Circuito Eléctrico elemental



3.7 b) Circuito Eléctrico

Figura 3.7 a) y b) Puesta a Tierra aproximado a Circuito Eléctrico equivalente por cada segmento, Modelo propuesto por [28].

La ecuación nodal del circuito equivalente esta dado por (3.23).

$$[Y] [V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t), \dots] \quad (3.23)$$

Donde:

- [Y] : Matriz de admitancia nodal del circuito equivalente.
- [V(t)] : Vector Tensión en el tiempo (t) para los nodos.
- [I_s(t)] : Vector Corriente externa inyectada en los nodos del circuito,
- [b(t-Δt,...)] : Historia del vector corriente.

El modelo descrito en [28] fue ampliado para el análisis del desempeño de mallas de PT frente a fenómenos transitorios a partir de la división de los electrodos en diversos segmentos, cada uno de ellos fueron caracterizados por un circuito equivalente de los parámetros concentrados de L y G, la conexión de todos los circuitos equivalentes representa una red de PT. La solución de la red es procesada mediante la aplicación por la Teoría de Circuitos Eléctricos (TC), el cálculo de la respuesta transitoria de la puesta a tierra es compatible con la metodología de solución del Programa Análisis Transitorio Electromagnético (EMTP/ATP) [55]; presentando una ventaja para investigar el comportamiento transitorio de los sistemas eléctricos de potencia (subestaciones, líneas de transmisión, etc.).

M. Ramamoorthy [31] en 1989, desarrolló un circuito simplificado aproximado para malla de puesta a tierra, donde todo el sistema de puesta tierra lo divide en “n” segmentos, cada segmento fue presentado por un circuito concentrado con sus parámetros inductancias media y mutua (ΔL) y conductancia propia de fuga a tierra (ΔG); como se muestra en la figura 3.8. La ecuación nodal del circuito equivalente del sistema de puesta a tierra es dada por.

$$\frac{d[V]}{dt} = [G] \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1} [V] \right\} \quad (3.24)$$

Donde:

- [V] : Matriz Tensión nodal.
- [I_s] : Matriz de corriente de inyección nodal.
- [G] : Matriz de Conductancia nodal.
- [L] : Matriz de Inductancia nodal.

Este modelo no toma en cuenta el acoplamiento capacitivo, pero tiene una razonable aproximación para el análisis transitorio de la puesta a tierra en suelos de baja Resistividad.

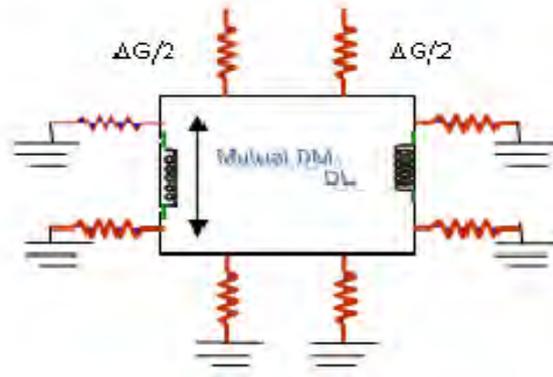


Figura 3.8 Circuito Equivalente de una red cuadrada de la malla de PT.

Geri [32] y **A.F. Otero [56]** en 1999 desarrollaron dos modificaciones al circuito aproximado basado en los trabajos de [28] y [30]; Geri usó un circuito equivalente diferente para representar cada segmento del conductor de puesta a tierra; el cual comprendía una conductancia equivalente paralela con un tensión ideal controlada por fuente de corriente para representar cada conductancia-capacitancia, y las ramas de resistencia-inductancia del circuito. Como se muestra en las figuras 3.9 y 3.10. En sus modelos, ambos trabajos han incluido el fenómeno de ionización del suelo. Basado en el nuevo circuito equivalente resistivo, la ecuación nodal de la puesta a tierra puede fácilmente resolverse.

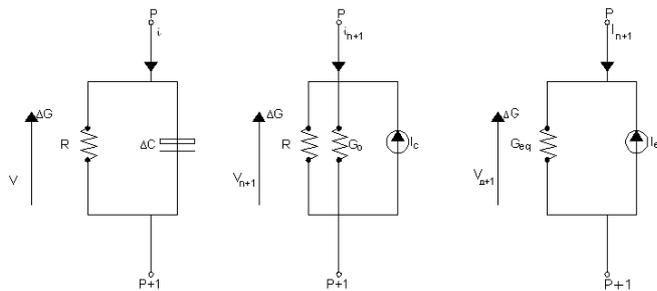


Figura 3.9 Circuitos Equivalentes de la rama Conductancia-Capacitancia de la Puesta a Tierra. Modelo CE de [32].

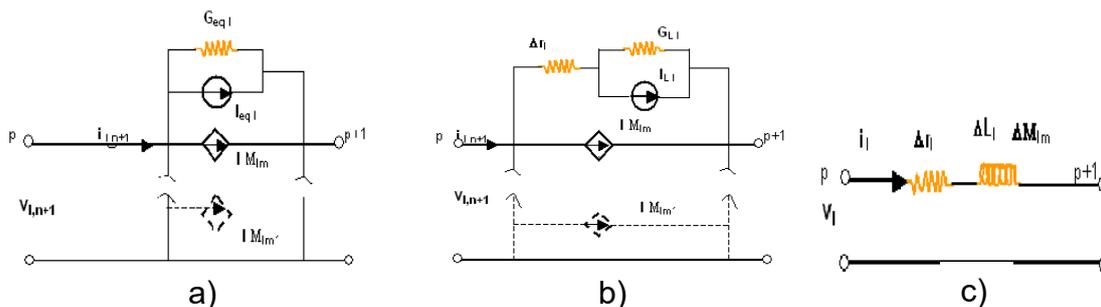


Figura 3.10 a), b) y c) Circuitos Equivalentes de Puesta a Tierra, rama Resistencia-Inductancia en el Modelo de [32].

El circuito equivalente de la puesta a tierra de [54] responde a la ecuación nodal para el circuito equivalente de la ecuación (3.25), en modelo de circuito eléctrico aproximado.

$$[I_s] = [K] * [G] * [K] * [V] + [Y] * [V] \quad (3.25.1)$$

$$[V_{ave}] = [K] * [V] \quad (3.25.2)$$

Donde

- [I_s] : Matriz de la fuente de corriente externa
- [K] : Matriz constante que es relacionada al vector columna de rama de Tensiones
- [V_{ave}] : Matriz columna del nodo de Tensiones
- [V]*[G] : Matriz que incluye efectos Conductivos y Capacitivos
- [Y] : Matriz admitancia del circuito incluye efectos Resistivos e Inductivos.

El circuito aproximado de puesta a tierra en transitorio complejo es transformado a un análisis transitorio simple de circuitos equivalentes, esta transformación hace el problema más observable. El circuito aproximado fácilmente puede incorporar los fenómenos de ionización no lineales del suelo e incluso pueden incluir todo el acoplamiento mutuo entre los conductores de tierra. La desventaja principal de esta aproximación consiste en que no puede predecir el retraso o desplazamiento de la propagación de onda.

3.4 Análisis comparativo de los Modelados de Puesta Tierra con Respuesta Transitoria a corriente de Impulso

El Modelo de la respuesta dinámica de la Puesta a Tierra encierra una complejidad considerable para la solución ante los fenómenos transitorios de tipo impulso, debido a la diversidad de factores a ser considerados en su realización; de la revisión bibliográfica sobre el tratado de Puesta a Tierra con respuesta dinámica presentada en los acápites anteriores, se ha identificado los métodos más destacados propuestos a lo largo del tiempo, se obtiene los criterios que dan soporte al presente trabajo, sus diferencias y ventajas serán descritos a continuación.

Se ha determinado que:

- El Modelado de la PT con aproximación por Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), presenta un elevado rigor físico y matemático, pero normalmente su uso requiere de alta capacidad del procesador y un tiempo largo para los cálculos.

- El Modelado de la PT con aproximación por Teoría de Líneas de Transmisión (TL) está basado en la Teoría de Líneas de Transmisión, puede incluir el acoplamiento mutuo, el efecto de la ionización, predecir el retraso de las ondas y tiene el atractivo que los recursos computacionales son modestos para su utilización.
- El Modelado de PT aproximado por Teoría de Circuitos Eléctricos (TC) para la solución de la Puesta a Tierra, tiene limitaciones porque no resuelve el desplazamiento de la propagación de las ondas de tensión y corriente.

De estos tres modelados examinados, se ha efectuado una comparación entre ellos, para seleccionar el Modelo que tenga una respuesta coherente, tanto física como matemáticamente y no presente mucha complejidad en el análisis; este criterio considera los trabajos desarrollados en [44] donde se ha efectuado una comparación de los resultados obtenidos a través de los modelos basados en la Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Líneas de Transmisión (TL) y Teoría de Circuitos (TC) en los dominios del tiempo y de la frecuencia.

a) Análisis teórico comparativo

En esta sección se analizaron las Puestas a Tierra para configuraciones base, conformada por electrodos de varilla verticales y conductores horizontales; ambos de variadas longitudes, enterrados en suelos de Resistividades también variadas. Los parámetros de Resistencia (R), Inductancia (L) y Capacitancia (C) utilizados en los modelos TL y TC se han calculado a partir de las ecuaciones desarrolladas por [12].

Las simulaciones efectuadas por [44] para electrodos de varilla vertical y conductor horizontal enterrados de la misma longitud, han calculado el módulo de las Impedancias armónicas normalizadas con la Resistencia en baja frecuencia o CC, en función de la frecuencia para el rango de 100Hz a 10MHz; para suelos con baja y alta Resistividad.

En el cálculo para electrodos de PT con varillas verticales, se ha considerado material de cobre, 25 mm de diámetro con longitudes de 1 m, 10 m y 30 m y Resistividades del suelo con Permitividad eléctrica relativa de 10 en todos los tipos. Para estos electrodos se ha efectuado los cálculos para los tres modelados de TCE, TL y TC; los resultados se han graficado en las figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

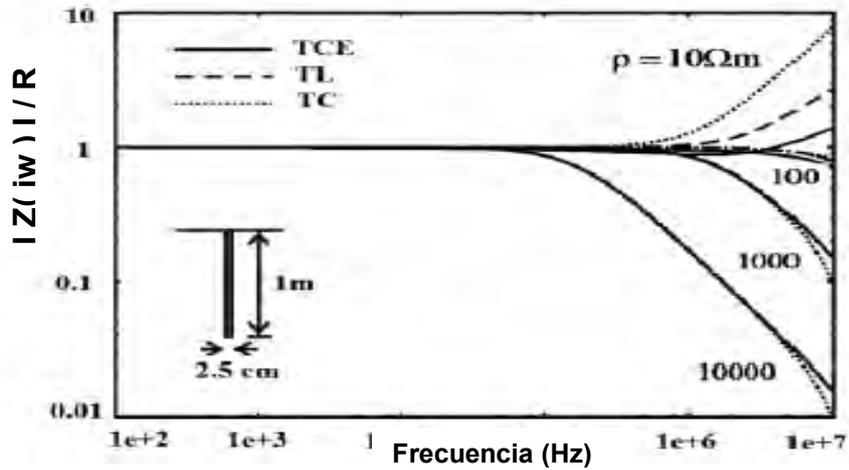


Figura 3.11 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 1 m. Fuente de [44].

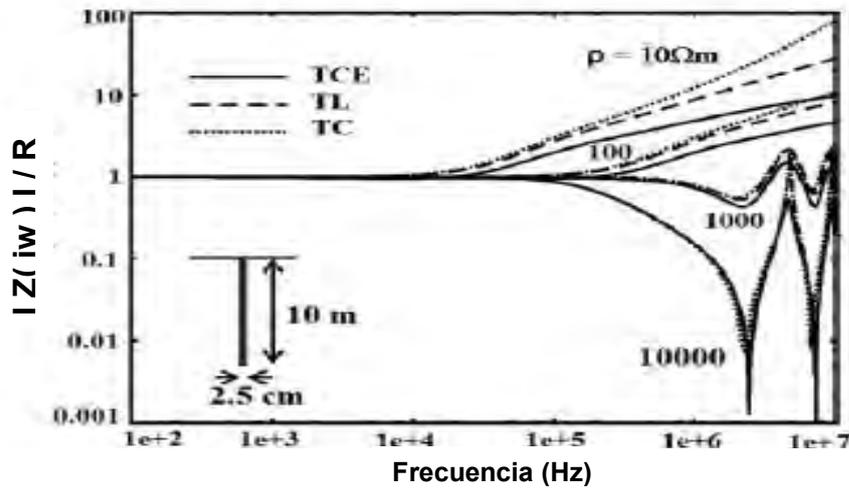
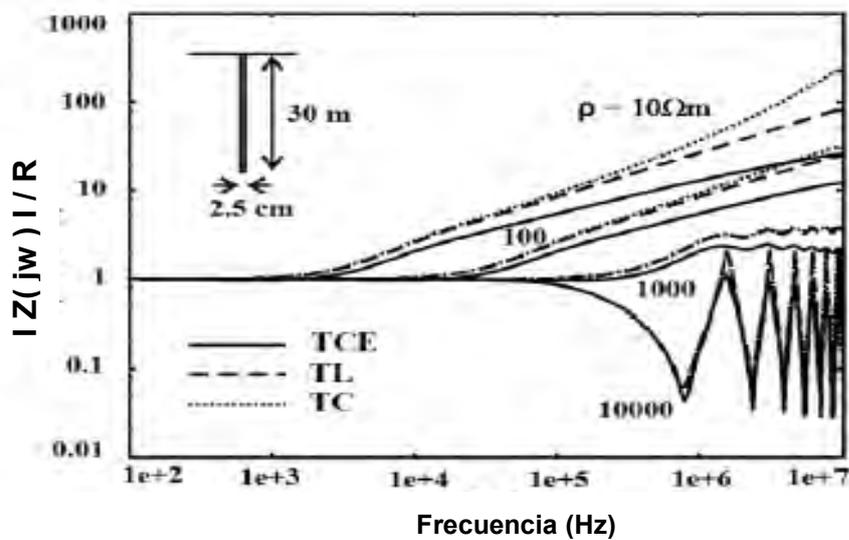


Figura 3.12 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 10 m. Fuente de [44].



Figuras 3.13 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 30 m. Fuente de [44].

En forma similar, para los electrodos horizontales de PT con material de cobre de 14 mm de diámetro, enterrado a 0,8 m y los mismos suelos que en el caso de varilla vertical; se ha efectuado los cálculos para los tres modelos de TCE, TL y TC; los resultados se muestra en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16.

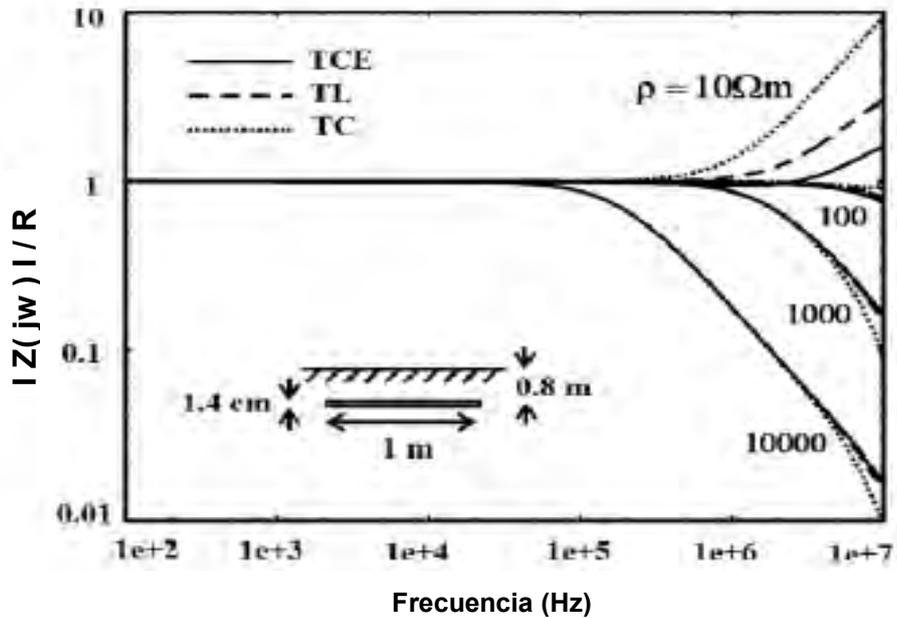


Figura 3.14 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 1 m. Fuente de [44].

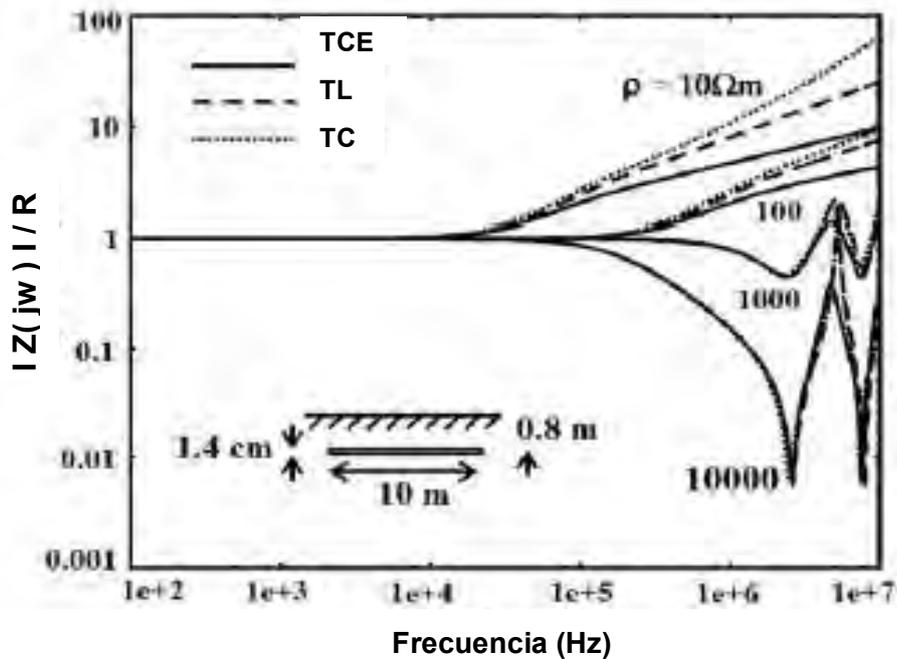


Figura 3.15 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 10 m. Fuente de [44].

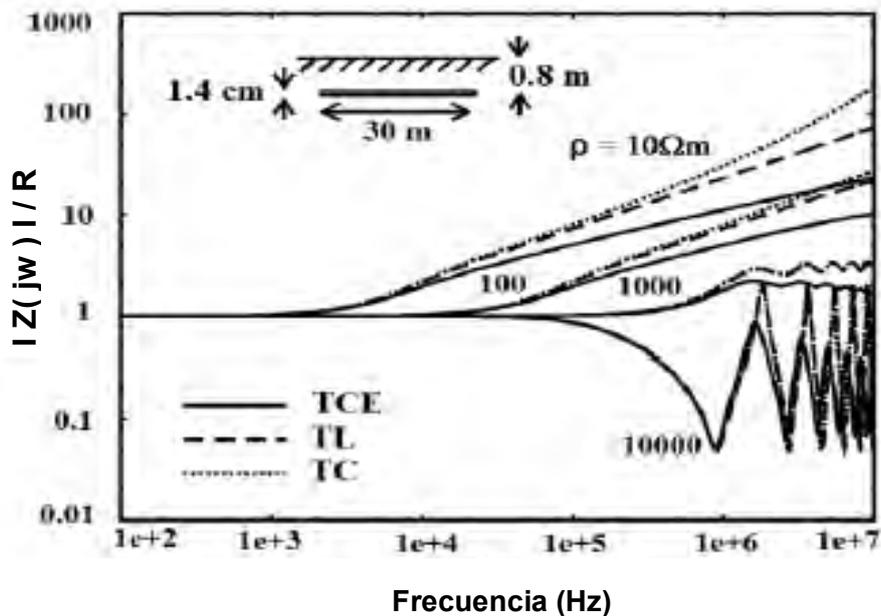


Figura 3.16 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 30 m. Fuente de [44].

Comparando los valores de los módulos de las Impedancias $|Z|/R$ de las Figuras 3.11 al 3.16, para las PT con electrodos horizontal y vertical de la misma longitud, se muestra que en todas las situaciones para la frecuencia menor a 5 kHz la Z es constante, es de notar que existe una frecuencia límite bajo la cual la respuesta de PT no varía, no existiendo dependencia a la frecuencia ($|Z| \approx R$). Sin embargo, encima de esta frecuencia existe dependencia, donde la respuesta tiene característica Inductiva ($|Z| > R$) y/o Capacitiva ($|Z| < R$). Esa frecuencia límite fue denotada como Frecuencia Característica (F_c) por [32] a partir del modelo TC; también por [44] se determinó la Frecuencia Característica en forma empírica desarrollado a partir del modelo TCE.

Es importante señalar la característica Inductiva/Capacitiva de la PT en respuesta transitoria, obtenido a partir de los análisis comparativos; esta depende principalmente de la Resistividad del suelo, se hace predominante el efecto Capacitivo en suelos de altas Resistividades.

Los estudios comparativos para los Modelados de TCE, TL y TC muestran que en los tres modelos la Impedancia dinámica de PT en alta frecuencia y a bajas Resistividades presentan diferencias notorias; mientras que para altas Resistividades (mayores a $1000 \Omega m$) los tres modelos tienen tendencias similares. Destacando los resultados obtenidos a partir de los modelos TL y TCE en los cuales las Impedancias dinámicas de PT son muy próximas, a medida que la Resistividad del suelo aumenta. Esto lo hace muy interesante al

Modelo de PT aproximado por TL, por que sin tener la complejidad de la TCE nos da aproximaciones aceptables y con un sustento físico matemático aceptable.

b) Análisis comparativo teórico-experimental

Para validar el Modelo de la Puesta a Tierra con respuesta transitoria se ha tomado como referencia los resultados experimentales obtenidos por Electricite de Francia (EDF), sobre un extenso registro de mediciones de campo de Tensiones Transitorias del comportamiento a tierra remota; estos estudios han sido utilizados por muchos investigadores para verificar los modelos de TCE y TL.

En las pruebas efectuados por la EDF se utilizó un electrodo de PT con conductor de cobre de 50 mm² insertado en agujeros 62 mm de diámetro, lleno de una mezcla de bentonita y agua. La capa o chaqueta de la mezcla semilíquida de los electrodos de PT tenía una resistividad aproximadamente 1 Ω -m, mientras la resistividad del suelo circundante era de 1300 Ω -m. Para las simulaciones, la Resistividad promedio del suelo equivalente homogéneo es fijada a 450 Ω -m, la permitividad relativa del suelo es fijada a 10. Las corrientes de impulso resultantes tenían aproximadamente un valor pico 30 A y dependientes de tiempo ajustables de 0.2 μ s a 3 μ s.

Las simulaciones efectuadas por [25] mediante cálculos analíticos usando los modelos de TCE y TL, así como los registros de mediciones de EDF; los resultados se han graficado en la Figura 3.17, donde se observa que las respuestas del Módulo de la Impedancia de PT y su ángulo en el dominio de la frecuencia, son similares para el Modelo TL y TCE; mostrando un buen ajuste respecto a las pruebas experimentales medidas por EDF en toda la gama de frecuencia observada de 1 kHz a 100 MHz.

En la Figura 3.17, se muestra la verificación del Modelo de PT con respuesta dinámica mediante las mediciones de las Pruebas experimentales de la EDF, se observa una mejor aproximación al Modelo por Teoría de Líneas de Transmisión; este resultado en cierta forma es sorprendente, por que mediante los resultados experimentales de la EDF se confirma el buen comportamiento del Modelo de PT aproximado por TL, con mejor aproximación que el modelo TCE. Por lo tanto, el Modelo de PT aproximado por TL tiene ventajas comparativas respecto al Modelado TCE y nos da soluciones muy aproximadas a este último. Se concluye, que el Modelado de la Puesta a Tierra aproximado por teoría de Líneas de Transmisión (TL) se ha verificado teórica y experimentalmente su validez; por el cual se ha seleccionado como tema principal de esta Tesis, ha ser desarrollado en el Capítulo 4.

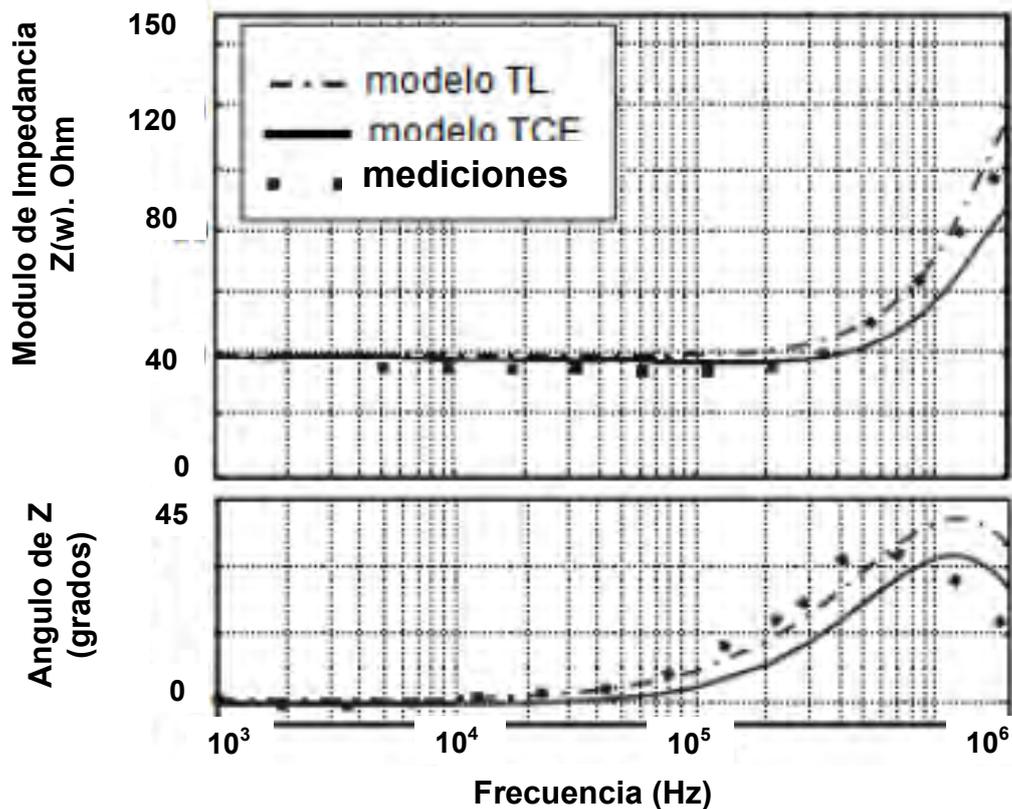


Figura 3.17 Módulo y ángulo de la Impedancia de Puesta a Tierra medida por EDF y simulada, para el Modelo TL y TCE por [25].

3.5 Ventajas y Desventajas de los Modelados de Puesta a Tierra con Respuesta Transitoria.

Después de haber revisado y evaluado la literatura especializada de los modelados predecesores descritos en este Capítulo y los análisis comparativos desarrollados en 3.4, se han identificado diferentes aproximaciones, sus ventajas y desventajas. En la Tabla N° 3.2 se ha sistematizado las características y nivel de complejidad de los Modelos de la Puesta Tierra con respuesta dinámica; determinándose que el modelo de PT aproximado por TL es el mas simple, Razonablemente preciso físico y matemáticamente, eficaz en la solución; este Modelo será desarrollado en el capítulo 4.

Tabla 3.2 Comparación de Niveles de Complejidad del Modelado de Puesta a Tierra en régimen transitorio.

Modelado de Puesta a Tierra (PT)	Nivel de complejidad de análisis de respuesta transitoria o dinámica de la Puesta a Tierra				
	Algoritmos Matemáticas	Nivel de Entendimiento	Procesamiento para Solución	Capacidad del computador requerido	Nivel de Exactitud
1. Aproximación por Teoría de Campo Electromagnético (TCE)	Complicado	Dificultad para Entender	Dificulta incluir ionización del suelo, puede predecirse el retraso de la propagación de onda.	Especial, alta capacidad, tiempo de cómputo largo.	Confianza de ser más preciso.
2. Aproximación por Teoría de Circuitos Eléctricos (CE)	Simple	Fácil de entender	Permite incluir la ionización de suelo, no puede predecir el retraso de propagación de onda.	Normal, Capacidad media, tiempo de cálculo pequeño.	Razonablemente preciso.
3. Aproximación por Teoría de Línea de Transmisión (TL)	El más simple.	Muy fácil de entender.	Fácil para incluir la ionización de suelo. Se puede predecir el retraso de propagación de onda.	Normal, capacidad media, tiempo de cálculo pequeño.	Razonablemente preciso. Eficaz en la solución.

CAPÍTULO 3

EXAMEN A MODELADOS PRECURSORES DE PUESTAS A TIERRA CON RESPUESTA TRANSITORIA

3.1 Introducción

Este capítulo presenta un examen de los trabajos sobre el tema tratado a lo largo del tiempo, publicados con los diferentes métodos propuestos, con las herramientas técnicas necesarias para el desarrollo de estudios de aterramientos no extensos.

Primero se examinan los modelos más sustentados de Puesta a Tierra en estado estacionario, considerando que la normativa en nuestro país, solo comprende dichos alcances, prescritos en el Código Nacional de Electricidad (Suministros y Utilización); posteriormente se examinaron trabajos publicados sobre Modelado de Puesta a Tierra con respuesta transitoria ante corrientes de impulso, verificando las soluciones analíticas adoptadas con la creciente capacidad de procesamiento digital de las últimas décadas; asimismo, se examinaron las tres metodologías más estudiadas sobre PT con respuesta transitoria, con aproximación por: Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Líneas de Transmisión (TL) y Teoría de Circuitos Eléctricos (TC); identificando las ventajas, desventajas y límites de validación.

Es de notar que la aproximación por Teoría de Campos Electromagnéticos presenta elevado rigor físico y matemático, así como complejidad del análisis y largo tiempo de cálculo, que lo hace poco práctico y adaptable para el diseño de ingeniería no especializado; de otro lado, en los distintos trabajos revisados se ha observado que los resultados obtenidos a partir de modelos con aproximación por Teoría de Líneas de Transmisión, son más asequibles y presentan resultados con excelente concordancia, con la ventaja de requerir menos inversión de tiempo, o recursos económicos para adquirir programas, motivo por el cual se adoptó para el desarrollo como tema principal del presente trabajo.

3.2 Resistencia de Puesta a Tierra en Estado Estacionario

La Resistencia de Puesta a Tierra al pie de las torres o soportes de las Líneas Eléctricas donde hay alta incidencia de rayos, es muy importante en el desempeño del aislamiento de una línea de transmisión; un bajo valor es esencial para evitar la disrupción que

ocasionan las ondas de impulso de rayo, especialmente cuando los componentes reactivos inductivos de su armado son también pequeños.

3.2.1 Criterios Generales

El valor de la Resistencia de puesta a tierra varia con la Resistividad del suelo y en conjunto con sus componentes reactivos, con los valores que toma la corriente en el desarrollo de las ondas de impulso que fluyen en el armado de PT, el suelo en tal caso se comporta como un dieléctrico con muchas pérdidas, y, si la densidad de corriente es muy alta la falla de dicho dieléctrico también ocurrirá, causando una súbita reducción del valor de la Resistencia, pero alterando la Resistividad del suelo por la no linealidad de la Resistencia de puesta a tierra con la corriente; ello da una mayor complejidad al cálculo de la aplicación de las ondas de Corriente o Tensión producidas por las descargas de rayo.

En aplicaciones de ingeniería, los electrodos de Puesta a Tierra utilizados con mayor frecuencia para la protección de Líneas Eléctricas de Transmisión de Energía, son: contrapeso de conductor horizontal enterrado, solo o con terminales de varilla vertical.

a) Varilla Vertical de Puesta a Tierra

Se usan como electrodo en arreglos de dos o mas varillas de 6 a 12 pies de longitud y menos de 2.5 pulg de diámetro en paralelo y configuraciones rectilínea, en triangulo, cuadrado, circunferencia, etc. para obtener una PT con Resistencia menor a 25 Ohm (CNE Suministros y Utilización, en el Perú); también se usan electrodos verticales de mayor longitud por empalme.

Este tipo de electrodo ha sido estudiado por [12] y [14] experimentalmente y analíticamente, lográndose el modelado para estado estable y para respuesta transitoria a corrientes de rayo, se le usa para suelos de Resistividad de valores bajos (menores a 100 Ω -m), lo cual es raro encontrar en el Perú.

b) Contrapeso Horizontal Enterrado

Esta conformado por un conductor horizontal enterrado con arreglo de uno o más ramales o en trayectorias cerradas para obtener una baja Resistencia menor de 25 Ohm (CNE Suministros y Utilización, en Perú); este tipo de electrodo también ha sido estudiado ampliamente habiéndose logrado el modelado para el estado estable y para respuesta transitoria a corrientes de impulso tipo rayo hasta obtener diseños aproximados, que cumplen con la protección del aislamiento de los sistemas eléctricos; estando solo o combinado, en suelos con Resistividades baja, media y alta.

En esta sección se efectuará una revisión al cálculo de la Puesta a Tierra para los electrodos mas utilizados en LT, como son la varilla vertical y el conductor horizontal enterrados; así como, la combinación de ambos.

3.2.2 Modelado de Resistencia de Puesta a Tierra en Estado Estacionario

La configuración básica de electrodo simple para el análisis, es una esfera enterrada o un hemisferio enterrado; asumiendo uniforme la Resistividad (ρ) del suelo, la corriente (I) desde el hemisferio de radio (X) pasa al suelo con una densidad de corriente (i) dada por la ecuación (3.1).

$$i = \frac{I}{2\pi X^2} \quad (3.1)$$

Según la ley de Ohm, esta corriente produce en el suelo una intensidad de Campo Eléctrico, dada por la ecuación (3.2).

$$E = \rho * i = \frac{\rho * I}{2\pi X^2} \quad (3.2)$$

La variación de la tensión (V) se determina como la integral de línea de la intensidad del Campo Eléctrico entre dos superficies equipotenciales de radios (a y x), distintas a la distancia intermedia (X); el cual se calcula por la ecuación (3.3).

$$V = \int_a^x E dX = \frac{\rho * I}{2\pi} \int_a^x \frac{dX}{X^2} = \frac{\rho * I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{X} \right) \quad (3.3)$$

La tensión total entre el hemisferio y un punto muy distante, corresponde a $X = \infty$, dada por la ecuación (3.4).

$$V = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (3.4)$$

Y la Resistencia total que corresponde a las líneas de flujo que divergen del hemisferio, se obtiene según la ecuación (3.5).

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi * a} \quad (3.5)$$

En un fenómeno transitorio, el comportamiento satisfactorio de la Puesta a Tierra ante un impulso de rayo, que asegure la disipación de la corriente de rayo, está determinado por el valor de la Resistencia en el límite del tiempo, dado por el valor de convergencia en estado estacionario (R_{DC}).

3.2.2.1 Varilla conductora como electrodo vertical de Puesta a Tierra

a) **Aportes de R. Rudenberg y Dwight** han convergido después del análisis, a la expresión matemática de la Resistencia de dispersión para una varilla conductora dado por la ecuación de Lagrange (3.6).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} * \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \quad (3.6)$$

b) **Aporte de Erling Ditlef Sunde**, con el propósito de aplicarlo en la protección a los sistemas eléctricos y vidas humanas, ha logrado deducir otra expresión matemática para la Resistencia de Puesta a Tierra, dada por la ecuación (3.7).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} \left[\ln\left(\frac{8l}{d}\right) - 1 \right], \quad \text{si } l \gg d \quad (3.7)$$

Donde

- R : Resistencia en estado estable o R_{DC} (Ohm),
- ρ : Resistividad del suelo (ohm-m),
- l : Longitud de varilla conductora (m),
- d : Diámetro de la varilla conductora (m).

El examen de ambas ecuaciones (3.6) y (3.7), indica que el diámetro de la varilla es poco significativo pero no decisivo, afecta el término $\ln(4 * l/d)$ o $\ln(8 * l/d)$, pero la longitud “ l ” es más importante; debido a que la Resistencia de PT no disminuye directamente, pero si inversamente con la longitud, la Figura 3.1 muestra la Resistencia de Puesta a Tierra vs la longitud del electrodo, para los modelos de PT [12] y [14] con varilla de 16 mm ϕ en suelo de Resistividad de 100 Ohm-m.

Ambos modelos tienen similar convergencia y los valores experimentales corroboran el comportamiento físico del fenómeno, estos modelos tienen aplicaciones para los diseños de PT en ingeniería.

**MODELADO DE PUESTA A TIERRA EN ESTADO ESTACIONARIO
ELECTRODO CON VARILLA VERTICAL**

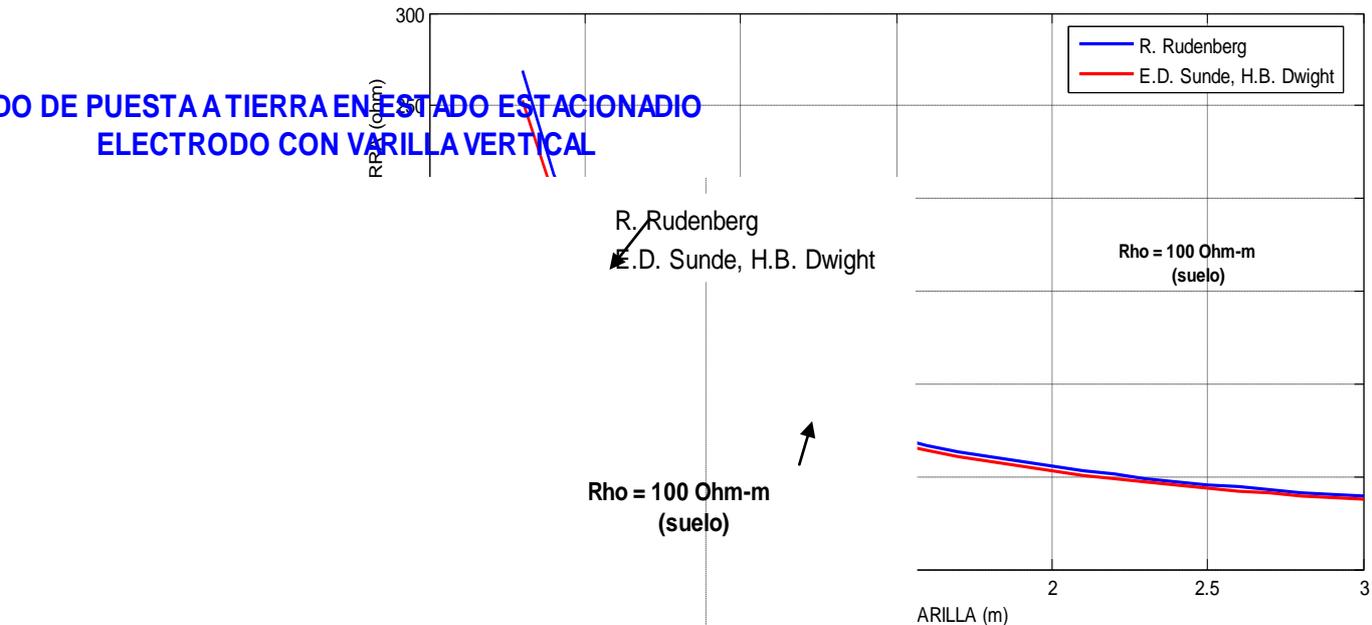


Figura 3.1 Resistencia de Puesta a Tierra vs Longitud de la varilla vertical con 16 mm de diámetro en suelo de $\rho = 100 \Omega\text{-m}$, según los Modelos de [12] y [14].

Utilizando el Modelo de [12], en la Figura 3.2 se ha graficado la Resistencia de Puesta a



Tierra para diversas secciones o diámetros de electrodos tipo varilla vertical en función de su longitud en suelo con Resistividad de Puesta a Tierra vs LONGITUD - MODELO E.D. SUNDE

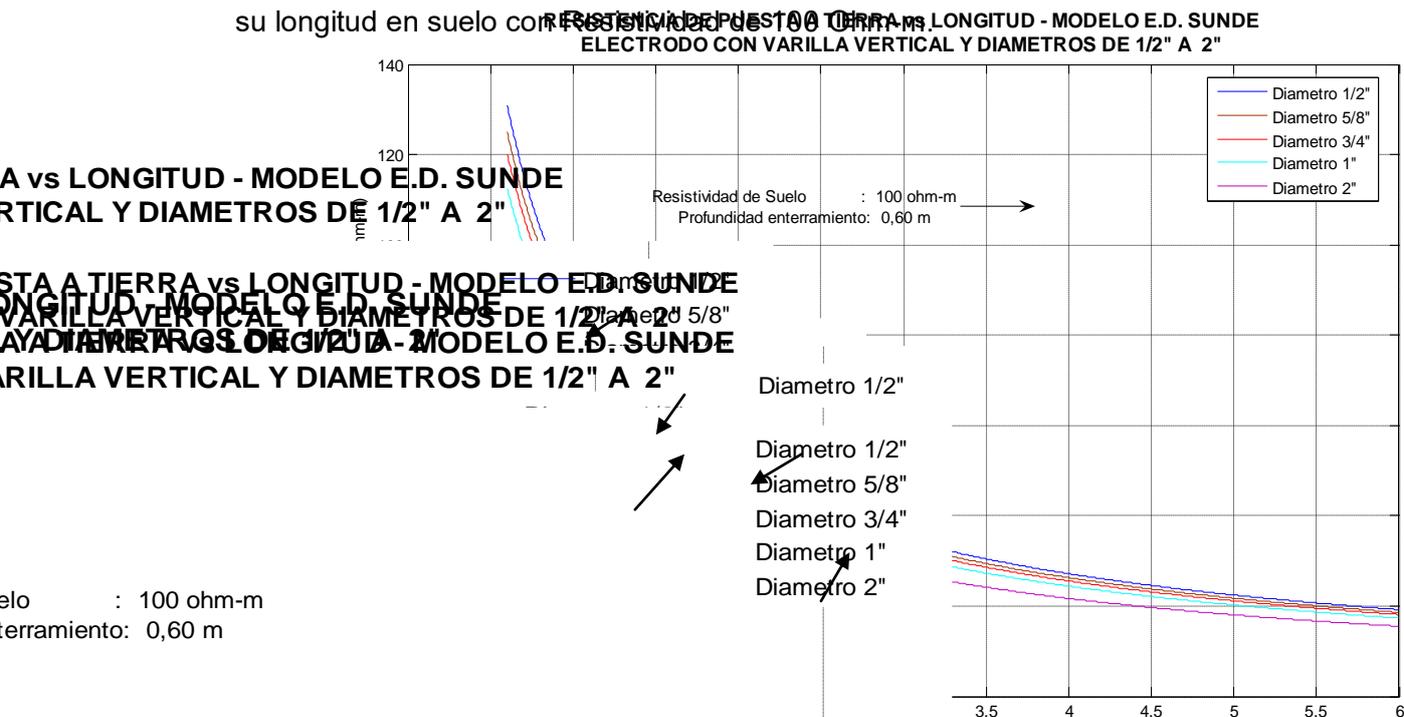


Figura 3.2 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, para varilla vertical con diámetros de 13mm (1/2") a 25 mm (2") en suelo de Resistividad de 100 Ohm-m.

La Resistencia de puesta a tierra de electrodos varilla vertical, también puede ser determinada para configuración de varias varillas verticales conectadas en paralelo; si el espaciado entre ellas es grande ($> 3 l_{varilla}$) comparado con la longitud individual, la Resistencia de PT se reduce en forma amortiguada en proporción al número de varillas, si las varillas están cercanas o juntas, funcionara como una PT única; no obstante, el numero óptimo de varillas para una PT puntual es 4, el uso de mas varillas se justifica como parte del diseño de Redes de Puesta a Tierra.

3.2.2.2 Electrodo de Puesta a Tierra de conductor simple horizontal enterrado

El valor de la Resistencia de Puesta a Tierra en estado estacionario del electrodo simple horizontal enterrado, en función de los parámetros del conductor, el suelo y la profundidad de enterramiento; fue analizado por [12], [14] y [10], los resultados se presentan a continuación.

a) Aporte de E.D. Sunde [12], la expresión de la Resistencia de PT de un conductor simple horizontal enterrado en el suelo, esta dada por (3.8).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} \left[\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{dh}}\right) - 1 \right], \quad \text{Si } h \ll l \quad (3.8)$$

b) Aporte de R. Rudenberg [14], la expresión de la Resistencia de PT de un electrodo

conductor simple horizontal enterrado en el suelo, esta dado por (3.9).

$$R = \frac{\rho}{2\pi * l} * \ln\left(\frac{l}{\sqrt{dh}}\right) \quad (3.9)$$

c) **Aporte de H.B. Dwight [10]**, ha deducido la expresión de la Resistencia de PT de un electrodo conductor simple horizontal enterrado en el suelo, dado por (3.10).

$$R = \frac{\rho}{2\pi d} \left[\ln\left(\frac{2 * l^2}{\sqrt{d * h^3}}\right) - 2 + \frac{2 * h}{l} - \left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0.5 * \left(\frac{h}{l}\right)^4 \right] \quad (3.10)$$

Donde:

- ℓ : Longitud del conductor (m)
- d : Diámetro del conductor (m)
- h : Profundidad de enterrado (m).

En Líneas de Transmisión (LT) se usan electrodos enterrados en diversos arreglos, el más utilizado es **el conductor horizontal simple enterrado en el suelo a una profundidad “h”**, en aplicaciones de este trabajo se ha usado los datos de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de los conductores y Suelo, Dimensionamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra.

Electrodo conductor de Puesta a Tierra en Cobre			Suelo	Instalación bajo la Superficie h (m)
Longitud (m)	Sección (mm ²)	Diámetro (mm)	Resistividad (Ohm-m)	
Variable	25	6,42	1000.00	0,60
	35	7,56	500.00	

Para efectos comparativos de los Modelos de la Resistencia de PT obtenidos por [12], [14] y [10]; utilizando las ecuaciones (3.8), (3.9) y (3.10) se ha calculado y graficado la Resistencia de Puesta a Tierra vs Longitud; en la Figura 3.3 se muestra para conductor horizontal simple de 35 mm² en suelo uniforme de Resistividad de 500 Ohm-m y en la Figura 3.4 para conductor de 25 mm² en suelo uniforme de Resistividad de 1000 Ohm-m.

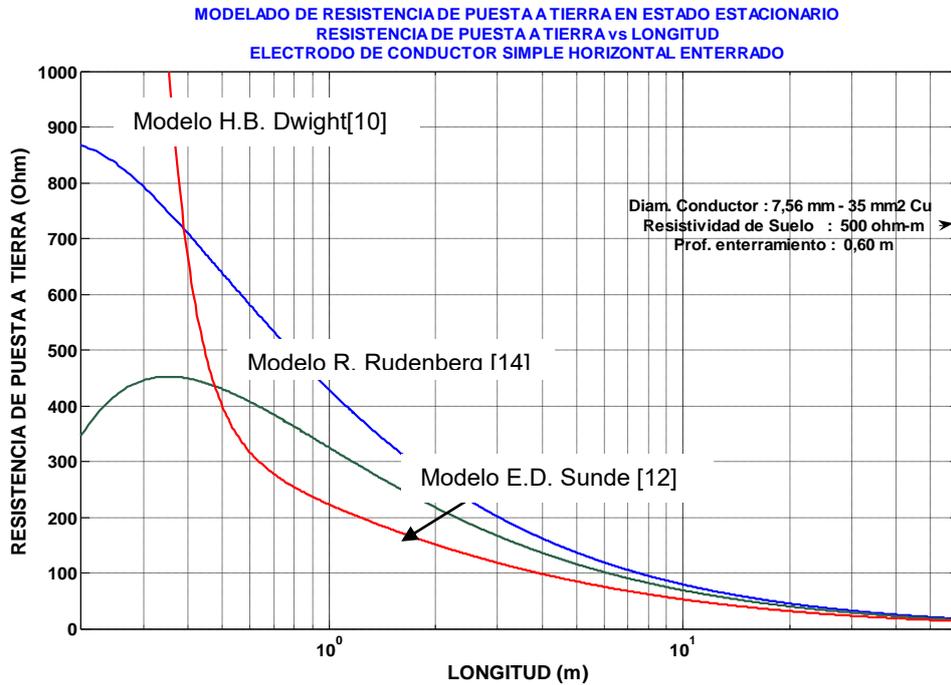


Figura 3.3 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductor simple horizontal 35 mm² -Cu enterrado 0,60 m, Resistividad del suelo 500 Ohm-m. Modelos de PT en [10], [12] y [14].

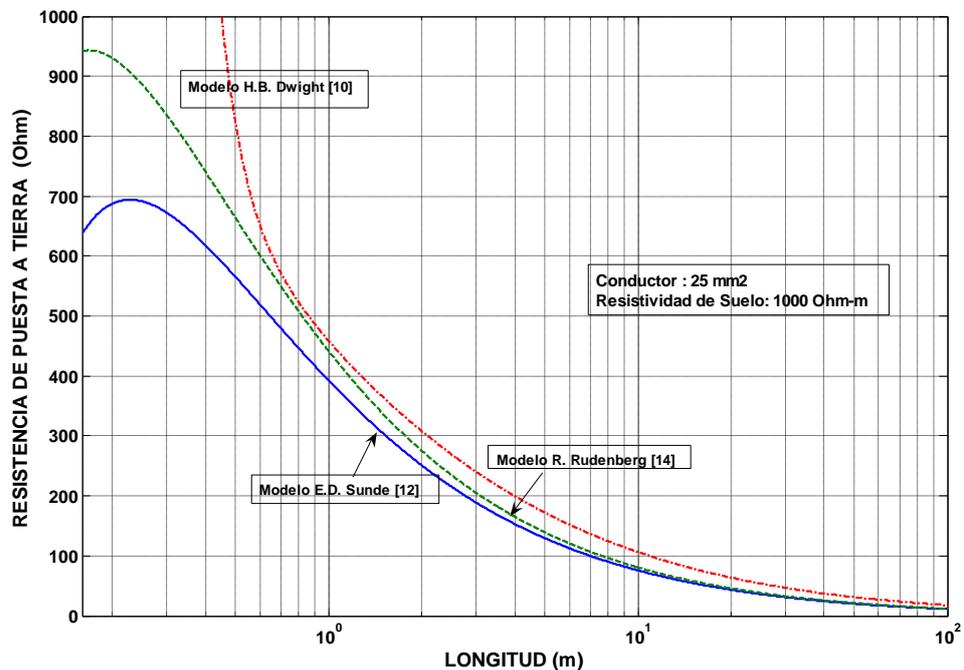


Figura 3.4 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductor simple horizontal 25 mm² -Cu enterrado a 0,60 m, Resistividad del suelo 1000 Ohm-m. Modelos de PT en [10], [12] y [14].

En las figuras 3.3 y 3.4 se observa que para el modelo de H.B. Dwight [10] presenta valores de la Resistencia de PT muy dispersos, para longitudes menores a 1 m tiende al infinito, para longitudes entre 1 m a 30 m los valores son menores a los otros dos modelos, y para longitudes mayores a 30 m se logra la convergencia; este modelo no presenta una adecuada convergencia respecto a los dos modelos analizados, por lo cual se le desestima.

Analizando los Modelos [12] y [14] se observa que el Modelo de [14] para una longitud del conductor menor a 1 m da una Resistencia el doble que el Modelo [12], para la longitud entre 3 m a 20 m esta diferencia es del 20% mayor y para longitudes mayores a 20m el valor de la Resistencia converge para los dos modelos y tiene idénticos valores. Se concluye que el modelado de E.D. Sunde [12] presenta mejor ajuste al fenómeno físico real; sin embargo en ingeniería ambos modelados son utilizados.

En aplicaciones del Modelado de [12] se han efectuado los cálculos de la Resistencia de PT en estado estacionario o CC, para electrodos horizontales con sección de conductor de 25mm^2 , 35mm^2 , 50mm^2 y 70mm^2 en material de cobre, en función de la longitud $R(\ell)$; la profundidad de enterramiento de 0,6 m y Resistividad del suelo homogéneo de 500 Ohm-m, para todos los electrodos.

Se ha calculado las Resistencias de PT para cada diámetro de conductor en función de la longitud del electrodo, usando el MATLAB; los resultados se presentan en la figura 3.5, se observa que la Resistencia de PT es ligeramente mayor en toda la longitud del electrodo para conductores de menor sección o diámetro. La selección de la sección deberá verificarse por capacidad de disipación de corriente, temperatura y tiempo de dispersión.

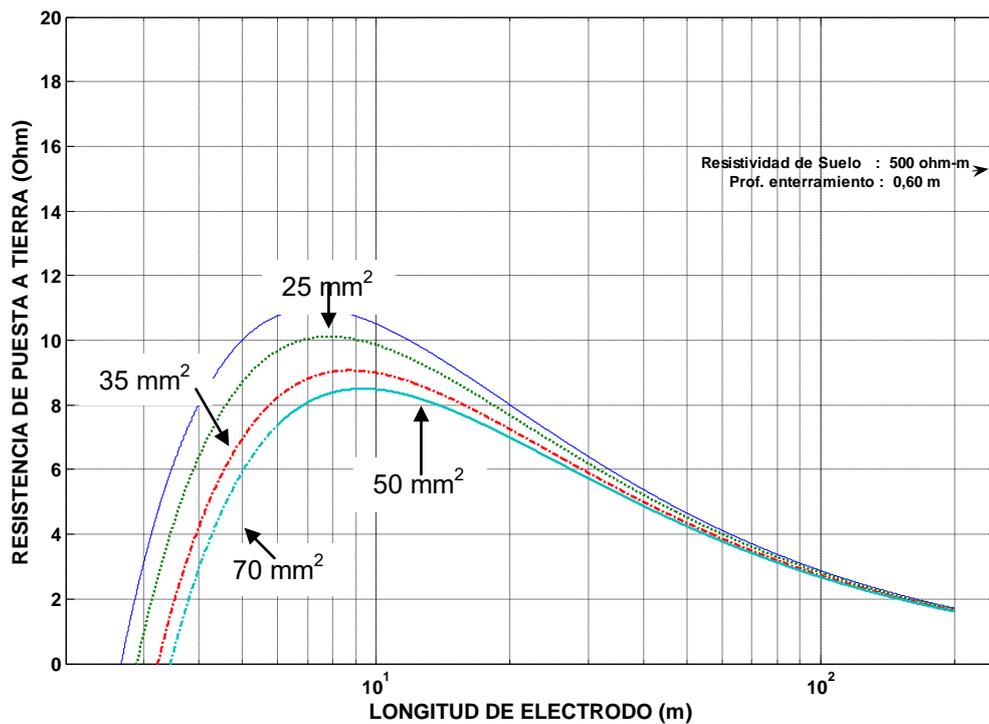


Figura 3.5 Resistencia de Puesta a Tierra vs longitud, conductores de 25, 35, 50 y 70 mm²-Cu simple horizontal enterrado a 0,60m, Resistividad de 500 Ohm-m. Modelo de PT en [12].

3.3 Modelados Precursores de Impedancia de Puestas a Tierra con Respuesta Transitoria a Corrientes de Impulso

De la recopilación de los primeros estudios que datan del siglo pasado se ha encontrado que en 1954 surge el primer intento de establecer las normas y especificaciones mínimas para el diseño de instalaciones de puesta a tierra, a cargo del *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE), actual *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), con la publicación del artículo "*Application Guide on Methods of Substation Grounding*".

En el desarrollo del modelado de Puestas a Tierra se ha utilizado los métodos analíticos y empíricos, con investigación experimental y teórica del comportamiento transitorio de las Puestas a Tierra bajo descargas de impulso tipo rayo; comprende análisis complejos considerando la diversidad de factores que convergen en el proceso; temas de investigación en este tópico a lo largo del tiempo, se han identificado los métodos analíticos con base computacional de aproximación por: Teoría de Líneas de Transmisión (TL), Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Circuitos Eléctricos (TC). En las secciones siguientes se describen los trabajos más relevantes en el Modelado de PT con respuesta dinámica de estas tres teorías: TCE, TL, TC.

3.3.1 Modelado de Puesta a Tierra aproximado por Teoría de Líneas de Transmisión

El Modelo de Puesta a Tierra se aproxima al de una Línea de Transmisión (LT) aérea, para analizar su comportamiento transitorio de un conductor enterrado (contrapeso de PT) el cual tiene un comportamiento similar al de la Línea de Transmisión aérea; el Modelo final aplicando esta teoría será desarrollado en el capítulo 4.

Con este modelo se puede obtener la respuesta de la PT en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, e incluir la ionización del suelo en el dominio del tiempo, y en forma similar al modelado aproximado por Teoría del Circuito Eléctrico (TC) se pueden incluir los acoplamientos mutuos entre los diferentes tramos de los conductores de PT; asimismo, con el modelo aproximado a una LT se puede predecir el retraso de la propagación de onda, que se hace importante cuando la PT tiene gran tamaño, una ventaja adicional es que el tiempo de cálculo, es muy reducido comparado con el modelo aproximado por la Teoría del Campo Electromagnético (TCE).

El modelo preliminar presentado en esta sección está basado en la Teoría de Líneas de Transmisión, en esta sección se sintetiza el resultado logrado por los investigadores

predecesores que examinaron analíticamente con un nivel de complejidad dado, esto se describe a continuación:

A partir de 1934, **L.V. Bewley** en [18,19, 20], realizó trabajos sobre la protección de sistemas eléctricos contra los rayos y dedujo la impedancia de un conductor de puesta a tierra en el punto de inyección, para una tensión aplicada de escalón unitaria.

El conductor de puesta a tierra es representado por parámetros distribuidos de circuito PI, asociados entre sí en cascada, en un medio con pérdidas, según la figura 3.6.

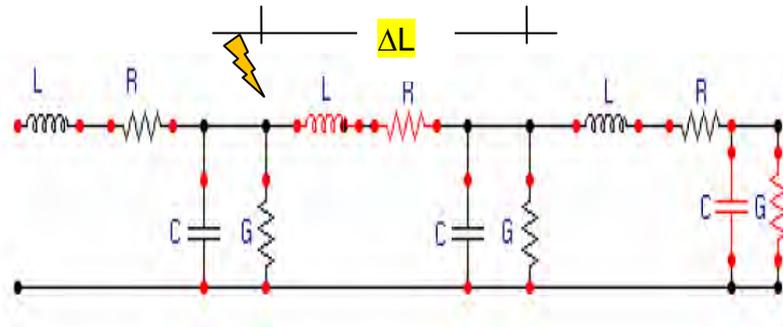


Figura 3.6 Circuito equivalente de la Línea de Transmisión con pérdidas, aproximado a un conductor de Puesta a Tierra.

El valor de la impedancia se ha deducido asumiendo que el conductor es de una Línea de Transmisión con grandes pérdidas y con parámetros constantes por unidad de longitud; la Impedancia Transitoria del conductor de PT, comienza con una Impedancia efectiva de onda $Z_s = \sqrt{L/C}$ inicial y termina con el efecto de Resistencia efectiva de fuga

($R = \frac{1}{Gl_c}$) final; el tiempo de transición entre estos dos efectos depende de la Resistividad del suelo y de la Onda de Tensión; las investigaciones relativas al conductor de PT fueron resumidos en *"Traveling waves in transmission systems"* [20].

El principal inconveniente de este modelado, es que no considera los acoplamientos existentes con electrodos cercanos de una red compleja de puesta a tierra, solo se puede aplicar a sistemas de puesta a tierra elementales.

El principal inconveniente de este modelado, es que no considera los acoplamientos existentes con electrodos cercanos de una red compleja de puesta a tierra, solo se puede aplicar a sistemas de puesta a tierra elementales.

Bellaschi y Armingtom [21] en 1943 desarrollaron el cálculo analítico de la respuesta de Tensión para una varilla de Puesta a Tierra, frente a corrientes de impulso, logrando determinar expresiones de Tensión en el punto de inyección, con una serie de convergencia lenta; asimismo, para varillas de puesta a tierra de gran longitud, determinaron el circuito equivalente con Resistencia distribuida, calcularon la Inductancia

del conductor de PT necesario para el cálculo de la impedancia de impulso; este modelo no consideró los efectos capacitivos.

Estos estudios sirvieron para calcular los valores bajos de las impedancias de impulso, íntimamente relacionados con la ionización del suelo, e inferir que las mismas fórmulas usadas en el cálculo de Resistencia medida en 60Hz, podrían ser usadas para calcular a Impedancia de Impulso efectuando pequeñas modificaciones

Erling Ditlef Sunde en 1949 desarrolló uno de los trabajos más importantes y clásicos de los sistemas de puesta a tierra, en *“Earth conduction effects in Transmission Systems”* [12], el cual hasta hoy es una sólida fuente de consulta para la solución de problemas de PT; este trabajo está basado en la Teoría del Campo Electromagnético que aplica las ecuaciones de James C. Maxwell.

E. D. Sunde presentó no sólo el cálculo de la Resistencia para corriente continua o estado estable de diferentes configuraciones de PT, sino que también desarrolló una exhaustiva teoría del comportamiento de la PT en alta frecuencia; fue uno de los primeros en introducir el concepto de Línea de Transmisión con parámetros por unidad de longitud, con dependencia de la frecuencia; para modelar el comportamiento transitorio del conductor de puesta a tierra simple horizontal, bajo la superficie del suelo, ante impulsos directos de corriente de Rayo; utilizando las ecuaciones del telegrafista o de Ondas viajeras, (3.11) y (3.12).

$$\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad (3.11)$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad (3.12)$$

Donde:

Z (Γ): Impedancia por unidad de longitud del conductor.

Y (Γ): Admitancia transversal por unidad de longitud del conductor.

Para un cable horizontal simple enterrado, la Impedancia (Z) y admitancia (Y) se calculan por las expresiones (3.13), (3.14) y (3.15).

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})} * \log\left(\frac{1,12}{\Gamma}\right) \right]^{-1} \quad (3.13)$$

$$Z(\Gamma) = Z_i + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} * \log\left(\frac{1,85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}}\right) \quad (3.14)$$

$$\gamma^2 = i\omega\mu_0(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil}) \quad (3.15)$$

Donde:

- Z_i : Impedancia interna por unidad de longitud
- Y_i : Admitancia por unidad de longitud del aislamiento del conductor, es cero cuando el cable está en perfecto contacto con el suelo.
- γ_c : Coeficiente de propagación característica de la onda.
- σ_{soil} : Conductividad eléctrica del suelo
- ϵ_{soil} : Permitividad eléctrica del suelo
- ω : frecuencia angular de la onda

La constante de propagación $\Gamma(Z, Y)$ está dada por la ecuación (3.16).

$$\Gamma = \sqrt{Z(\Gamma) * Y(\Gamma)} \quad (3.16)$$

El modelado del comportamiento transitorio de la puesta a tierra, es adaptado con el principio de la Teoría de Línea de Transmisión, y fue derivado analíticamente bajo ciertas aproximaciones para soluciones rápidas, debido que en esa época no se contaba con ordenadores con alta capacidad. De ahí, que estudios analíticos de modelados fueron limitados a sistemas de puesta a tierra simples, como el conductor de PT simple o varilla de puesta a tierra.

Verma [49], Mazzetti [50] y Velázquez [51] aplicaron el concepto de pérdidas de la Línea de Transmisión en el conductor de puesta a tierra horizontal, descrito a partir de las ecuaciones de Onda, dado por.

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dt} + r_c I = 0 \quad (3.17.1)$$

$$\frac{dI}{dx} + C \frac{dV}{dt} + GV = 0 \quad (3.17.2)$$

La solución de las ecuaciones (3.17.1) y (3.17.2) se orientaron para obtener analíticamente la corriente y tensión distribuida a lo largo del conductor de PT en el dominio de Laplace (s), se obtiene por Transformada de Laplace y luego se convierte al dominio del tiempo, mediante el uso de la Transformada Inversa de Laplace.

Trabajos de **Lorentzou [52]**, partiendo de las ecuaciones de Onda o D'Alembert (3.17) derivó directamente las ecuaciones de corriente y tensión distribuido a lo largo del conductor en el dominio de tiempo, aproximando el modelado de PT a la LT; previamente se calcula los parámetros de R, L, C, G en valores p.u. de longitud uniforme a lo largo de los conductores de puesta a tierra.

Menter y Grcev [53] para el cálculo de la impedancia de PT, mediante el análisis transitorio, también aproximó por la Teoría de Líneas de Transmisión, reemplazando en las ecuaciones dependientes de la frecuencia de [12], para la impedancia longitudinal $Z(\Gamma)$ y admitancia transversal $Y(\Gamma)$ en p.u de longitud que es dependiente de la frecuencia, dado por las ecuaciones (3.13) y (3.14). Los parámetros fueron calculados numéricamente, usando el modelo de la PT aproximado a LT y combinando el conductor contrapeso con otras partes, para una subestación en 123 kV con aplicación del EMTP.

3.3.2 Modelo de Puesta a Tierra aproximado por Teoría del Campo Electromagnético

El cálculo de la impedancia de PT con aproximación por Teoría del Campo Electromagnético (TCE), es el método más riguroso física y matemáticamente para modelar el comportamiento transitorio de la Puesta a Tierra (PT), porque este resuelve todas las ecuaciones de Maxwell con grandes aproximaciones; utilizando el Método de Momentos (MoM) o el Método de Elementos Finitos (FEM).

El problema transitorio se resuelve en el dominio de la frecuencia aplicado a sistemas lineales y a cada frecuencia se asocia una función de transferencia. La solución en el dominio del tiempo es obtenida con la Transformada Inversa de Fourier. El modelo está basado en la solución aproximada de los campos electromagnéticos para segmentos cilíndricos de conductores, con inyección de corrientes incrementales. Para cada segmento, se calcula el campo eléctrico debido a la corriente distribuida a lo largo de la superficie y carga del conductor, por medio del potencial eléctrico escalar y del potencial magnético vectorial.

El modelo para el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra basado en el MoM fue desarrollado por **L.D. Grcev** en [35, 38]. Este método parte de la ecuación integral del Maxwell del campo eléctrico dado por.

$$E = \frac{1}{4\pi j\omega \epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int t' * I_L(r) G_n(r, r') dl \quad (3.18)$$

$$G_n(r, r') = G_1(r, r') + G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (3.19)$$

Donde:

E : Campo eléctrico total dispersado a lo largo de la superficie del conductor.

$I_L(r)$: Corriente longitudinal que fluyendo a lo largo del conductor.

$G_n(r, r')$: Función completa de Green.

$G_i(r,r')$, $G_i(r,r')$: Función Dinámica de Green, para el campo eléctrico en la posición r , debido al elemento corriente y su imagen.

$G_s(r,r')$: Corrección de la función de Green, como función de las Integrales de Somnerfeld en la interfase aire-suelo.

La Permitividad eléctrica media compleja, determinado por

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \quad (3.20)$$

La Constante de Propagación de onda (γ) en el medio material, dado por:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (3.21)$$

Donde:

- σ : conductividad eléctrica,
- ε : permitividad eléctrica y
- μ : permeabilidad magnética.

Si las fuentes de corriente para cada segmento del conductor de PT son conocidas, el campo eléctrico alrededor del electrodo de PT y la corriente de fuga del segmento conductor de puesta a tierra al suelo puede ser calculado. El potencial en puntos diferentes sobre la superficie del conductor de puesta a tierra podría ser calculado por la integración del campo eléctrico normal del punto sobre la superficie del conductor a la tierra remota. El componente longitudinal del campo eléctrico no está incluido, como es dependiente del camino y su contribución es insignificante comparada a la del campo eléctrico normal para estudios de rayos. Finalmente, la respuesta en el dominio del tiempo por la teoría del campo electromagnético aproximado basado en el Método de Momento (MoM) resuelve todas las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, esto tiene suposiciones mínimas. Cuanto más alto es la frecuencia de las fuentes de entrada, mayor es la exactitud del campo electromagnético aproximado. Este modelo es demasiado complejo para ser puesto en práctica; sin embargo, cuando la estructura de PT es grande, el tiempo de cómputo es muy grande. Otra desventaja de la TCE es su procedimiento de solución del dominio de la frecuencia que no puede ser fácilmente modificado para incluir la no linealidad debido a la ionización de suelo, y combinar otros dispositivos no lineales que tienen modelos en el dominio de tiempo.

L. Grcev y Dawalibi [35] en 1990 desarrollaron un trabajo muy importante sobre el Modelo de PT basado en la TCE aplicado para electrodos horizontales, donde el Modelo electromagnético es descrito en forma detallada, el problema transitorio es resuelto en el dominio de la frecuencia, aplicándose a sistemas lineales; para cada frecuencia se asocia

una función de transferencia, la solución en el dominio del tiempo es obtenida con la Transformada Inversa de Fourier. El modelo esta basado en la solución de campos electromagnéticos para segmentos conductores cilíndricos con aproximaciones de corrientes filamentosas, para cada segmento se calcula el campo eléctrico debido a distribuciones de corriente y carga a lo largo de la superficie del conductor, por medio del potencial escalar y potencial vectorial.

B. Nekhoul, P. Labie [43] en 1996 desarrollaron otro método de aplicación aproximada por la TCE para el análisis transitorio de la PT, el modelo parte de las ecuaciones de energía eléctricas o magnéticas, referidas a las ecuaciones diferenciales parciales de Maxwell, con respecto al Vector Potencial Magnético (\bar{A}) y el Potencial Eléctrico escalar (V) en los diferentes volúmenes del sistema. Se pone en práctica utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM) para las soluciones, basadas en el principio físico de reducir al mínimo la energía en el sistema. Las funciones finales de \bar{A} y V están dados en las ecuaciones 3.22.1 y 3.22.2 para el campo en el suelo y 3.22.3 para el Campo en el aire, que involucra la función de ponderación (\bar{W}) y (w), para el potencial vectorial y potencial escalar respectivamente.

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla_x \bar{W})^* (\nabla_x \bar{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla^* \bar{W}) (\nabla^* \bar{A}) + (\sigma_{soil} + \varepsilon_{soil}) (j\omega \bar{W}^* \bar{A} + \bar{W}^* \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (3.22.1)$$

$$\int_{\Omega} (\sigma_{soil} + \varepsilon_{soil}) \nabla w (j\omega \bar{A} + \nabla V) d\Omega = 0 \quad (3.22.2)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla_x w)^* (\nabla_x \bar{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla^* w) (\nabla^* \bar{A}) \right) d\Omega = 0 \quad (3.22.3)$$

Donde:

$d\Omega$: Diferencial volumétrico del sistema

La solución numérica de las referidas ecuaciones fue transformada a ecuaciones lineales, dividiendo todo el sistema en N pequeños volúmenes o elementos; la dificultad en esta aproximación es transformar las fronteras abiertas de ambos ambientes aire y suelo, es un problema de frontera cerrado que simplificará el problema usando la transformación espacial; la ventaja principal de esta aproximación de campo electromagnético basado en el FEM consiste en que la discretización del dominio (la geometría o el medio) pueden ser sumamente flexibles con parches no uniformes o elementos que fácilmente pueden describir formas complejas y la ionización del suelo puede ser incluida en el modelado [43]. Sin embargo, este método aún es más complicado que el Método de Momento (MoM), porque directamente no resuelve las ecuaciones del Maxwell.

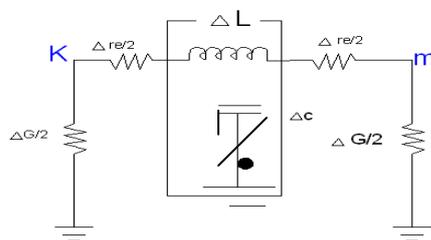
3.3.3 Modelo de Puesta Tierra aproximado por Teoría del Circuito Eléctrico

Uno de los métodos usado con mucha frecuencia, para modelar el comportamiento transitorio de la Puesta a Tierra con geometría compleja, con aproximación por Teoría de Circuitos Eléctricos (TC), toma en cuenta las siguientes consideraciones:

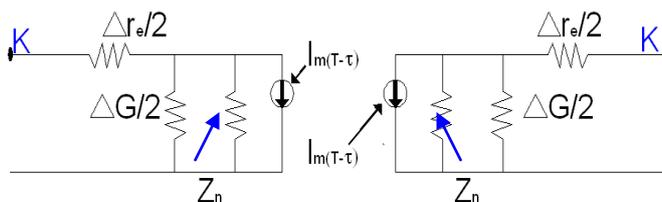
- Dividir el conductor de puesta a tierra en muchos segmentos finitos.
- Crear el circuito equivalente con parámetros concentrados para cada segmento y calcular los valores de la Inductancia propia y mutua (ΔL), Capacitancia (ΔC), Conductancia (ΔG) y Resistencia interna (Δr_e).
- Utilizar las leyes de Kirchoff para resolver las ecuaciones nodales del circuito equivalente o red, el cual representa toda la estructura de la Puesta a Tierra.

A. P. Meliopoulos [28] en 1983 desarrolló el modelo aproximado a circuito eléctrico para el análisis transitorio de la PT al impulso de Rayo, para ello uso el valor de los parámetros en p.u. de longitud (ΔL , ΔC , ΔG y Δr_e) para cada segmento, independientes de la frecuencia. Para el cálculo en el medio conductorivo semi-infinito de la tierra, utilizó la ecuación de Laplace del potencial ($\nabla^2 V = 0$).

Lo interesante de este trabajo es que cada segmento del conductor de puesta a tierra fue substituido como una línea de transmisión sin pérdidas y dos elementos suplementarios shunt (conductancia y capacitancia) de fuga a tierra, según se muestra en la figura 3.7 a) que fue transformado al circuito en la figura 3.7 b).



3.7 a) Circuito Eléctrico elemental



3.7 b) Circuito Eléctrico

Figura 3.7 a) y b) Puesta a Tierra aproximado a Circuito Eléctrico equivalente por cada segmento, Modelo propuesto por [28].

La ecuación nodal del circuito equivalente esta dado por (3.23).

$$[Y] [V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t), \dots] \quad (3.23)$$

Donde:

- [Y] : Matriz de admitancia nodal del circuito equivalente.
- [V(t)] : Vector Tensión en el tiempo (t) para los nodos.
- [I_s(t)] : Vector Corriente externa inyectada en los nodos del circuito,
- [b(t-Δt,...)] : Historia del vector corriente.

El modelo descrito en [28] fue ampliado para el análisis del desempeño de mallas de PT frente a fenómenos transitorios a partir de la división de los electrodos en diversos segmentos, cada uno de ellos fueron caracterizados por un circuito equivalente de los parámetros concentrados de L y G, la conexión de todos los circuitos equivalentes representa una red de PT. La solución de la red es procesada mediante la aplicación por la Teoría de Circuitos Eléctricos (TC), el cálculo de la respuesta transitoria de la puesta a tierra es compatible con la metodología de solución del Programa Análisis Transitorio Electromagnético (EMTP/ATP) [55]; presentando una ventaja para investigar el comportamiento transitorio de los sistemas eléctricos de potencia (subestaciones, líneas de transmisión, etc.).

M. Ramamoorthy [31] en 1989, desarrolló un circuito simplificado aproximado para malla de puesta a tierra, donde todo el sistema de puesta tierra lo divide en “n” segmentos, cada segmento fue presentado por un circuito concentrado con sus parámetros inductancias media y mutua (ΔL) y conductancia propia de fuga a tierra (ΔG); como se muestra en la figura 3.8. La ecuación nodal del circuito equivalente del sistema de puesta a tierra es dada por.

$$\frac{d[V]}{dt} = [G] \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1} [V] \right\} \quad (3.24)$$

Donde:

- [V] : Matriz Tensión nodal.
- [I_s] : Matriz de corriente de inyección nodal.
- [G] : Matriz de Conductancia nodal.
- [L] : Matriz de Inductancia nodal.

Este modelo no toma en cuenta el acoplamiento capacitivo, pero tiene una razonable aproximación para el análisis transitorio de la puesta a tierra en suelos de baja Resistividad.

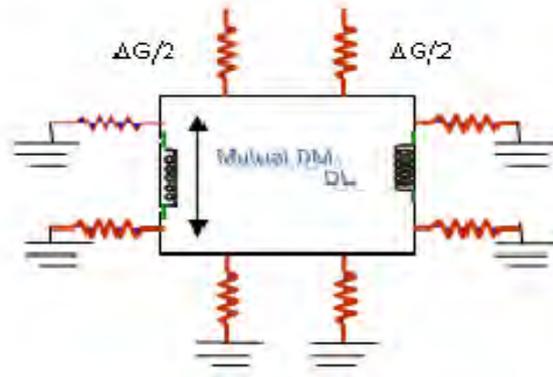


Figura 3.8 Circuito Equivalente de una red cuadrada de la malla de PT.

Geri [32] y **A.F. Otero [56]** en 1999 desarrollaron dos modificaciones al circuito aproximado basado en los trabajos de [28] y [30]; Geri usó un circuito equivalente diferente para representar cada segmento del conductor de puesta a tierra; el cual comprendía una conductancia equivalente paralela con un tensión ideal controlada por fuente de corriente para representar cada conductancia-capacitancia, y las ramas de resistencia-inductancia del circuito. Como se muestra en las figuras 3.9 y 3.10. En sus modelos, ambos trabajos han incluido el fenómeno de ionización del suelo. Basado en el nuevo circuito equivalente resistivo, la ecuación nodal de la puesta a tierra puede fácilmente resolverse.

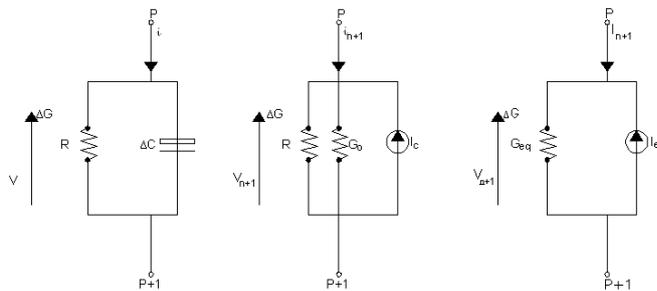


Figura 3.9 Circuitos Equivalentes de la rama Conductancia-Capacitancia de la Puesta a Tierra. Modelo CE de [32].

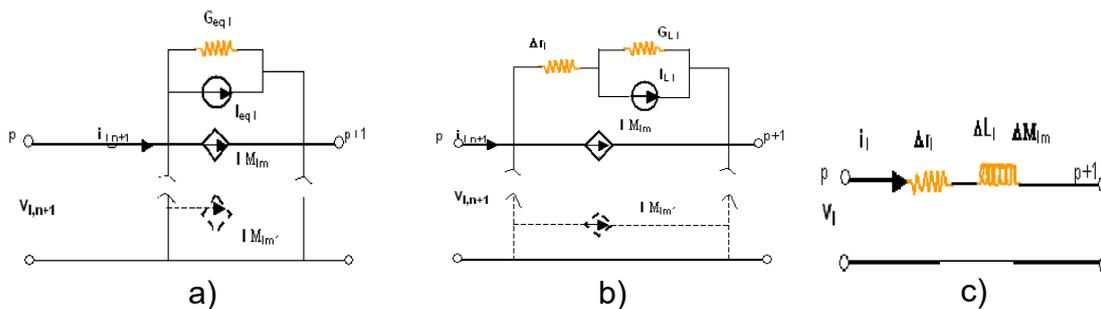


Figura 3.10 a), b) y c) Circuitos Equivalentes de Puesta a Tierra, rama Resistencia-Inductancia en el Modelo de [32].

El circuito equivalente de la puesta a tierra de [54] responde a la ecuación nodal para el circuito equivalente de la ecuación (3.25), en modelo de circuito eléctrico aproximado.

$$[I_s] = [K] * [G] * [K] * [V] + [Y] * [V] \quad (3.25.1)$$

$$[V_{ave}] = [K] * [V] \quad (3.25.2)$$

Donde

- [I_s] : Matriz de la fuente de corriente externa
- [K] : Matriz constante que es relacionada al vector columna de rama de Tensiones
- [V_{ave}] : Matriz columna del nodo de Tensiones
- [V]*[G] : Matriz que incluye efectos Conductivos y Capacitivos
- [Y] : Matriz admitancia del circuito incluye efectos Resistivos e Inductivos.

El circuito aproximado de puesta a tierra en transitorio complejo es transformado a un análisis transitorio simple de circuitos equivalentes, esta transformación hace el problema más observable. El circuito aproximado fácilmente puede incorporar los fenómenos de ionización no lineales del suelo e incluso pueden incluir todo el acoplamiento mutuo entre los conductores de tierra. La desventaja principal de esta aproximación consiste en que no puede predecir el retraso o desplazamiento de la propagación de onda.

3.4 Análisis comparativo de los Modelados de Puesta Tierra con Respuesta Transitoria a corriente de Impulso

El Modelo de la respuesta dinámica de la Puesta a Tierra encierra una complejidad considerable para la solución ante los fenómenos transitorios de tipo impulso, debido a la diversidad de factores a ser considerados en su realización; de la revisión bibliográfica sobre el tratado de Puesta a Tierra con respuesta dinámica presentada en los acápites anteriores, se ha identificado los métodos más destacados propuestos a lo largo del tiempo, se obtiene los criterios que dan soporte al presente trabajo, sus diferencias y ventajas serán descritos a continuación.

Se ha determinado que:

- El Modelado de la PT con aproximación por Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), presenta un elevado rigor físico y matemático, pero normalmente su uso requiere de alta capacidad del procesador y un tiempo largo para los cálculos.

- El Modelado de la PT con aproximación por Teoría de Líneas de Transmisión (TL) está basado en la Teoría de Líneas de Transmisión, puede incluir el acoplamiento mutuo, el efecto de la ionización, predecir el retraso de las ondas y tiene el atractivo que los recursos computacionales son modestos para su utilización.
- El Modelado de PT aproximado por Teoría de Circuitos Eléctricos (TC) para la solución de la Puesta a Tierra, tiene limitaciones porque no resuelve el desplazamiento de la propagación de las ondas de tensión y corriente.

De estos tres modelados examinados, se ha efectuado una comparación entre ellos, para seleccionar el Modelo que tenga una respuesta coherente, tanto física como matemáticamente y no presente mucha complejidad en el análisis; este criterio considera los trabajos desarrollados en [44] donde se ha efectuado una comparación de los resultados obtenidos a través de los modelos basados en la Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), Teoría de Líneas de Transmisión (TL) y Teoría de Circuitos (TC) en los dominios del tiempo y de la frecuencia.

a) Análisis teórico comparativo

En esta sección se analizaron las Puestas a Tierra para configuraciones base, conformada por electrodos de varilla verticales y conductores horizontales; ambos de variadas longitudes, enterrados en suelos de Resistividades también variadas. Los parámetros de Resistencia (R), Inductancia (L) y Capacitancia (C) utilizados en los modelos TL y TC se han calculado a partir de las ecuaciones desarrolladas por [12].

Las simulaciones efectuadas por [44] para electrodos de varilla vertical y conductor horizontal enterrados de la misma longitud, han calculado el módulo de las Impedancias armónicas normalizadas con la Resistencia en baja frecuencia o CC, en función de la frecuencia para el rango de 100Hz a 10MHz; para suelos con baja y alta Resistividad.

En el cálculo para electrodos de PT con varillas verticales, se ha considerado material de cobre, 25 mm de diámetro con longitudes de 1 m, 10 m y 30 m y Resistividades del suelo con Permitividad eléctrica relativa de 10 en todos los tipos. Para estos electrodos se ha efectuado los cálculos para los tres modelados de TCE, TL y TC; los resultados se han graficado en las figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

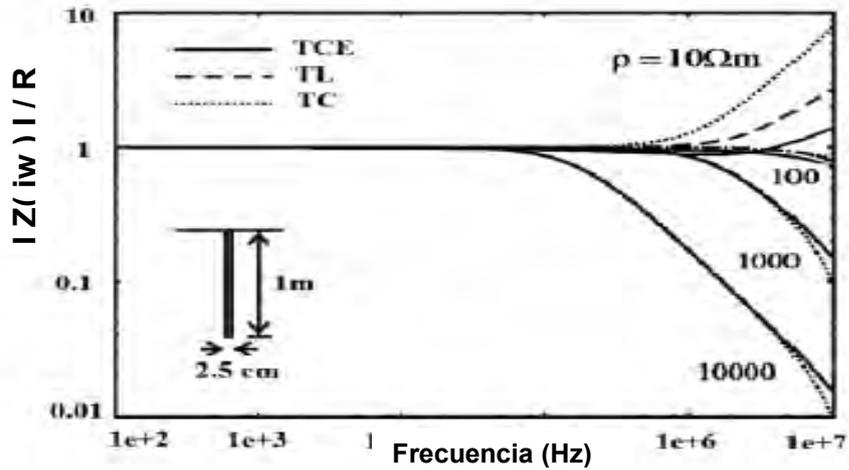


Figura 3.11 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 1 m. Fuente de [44].

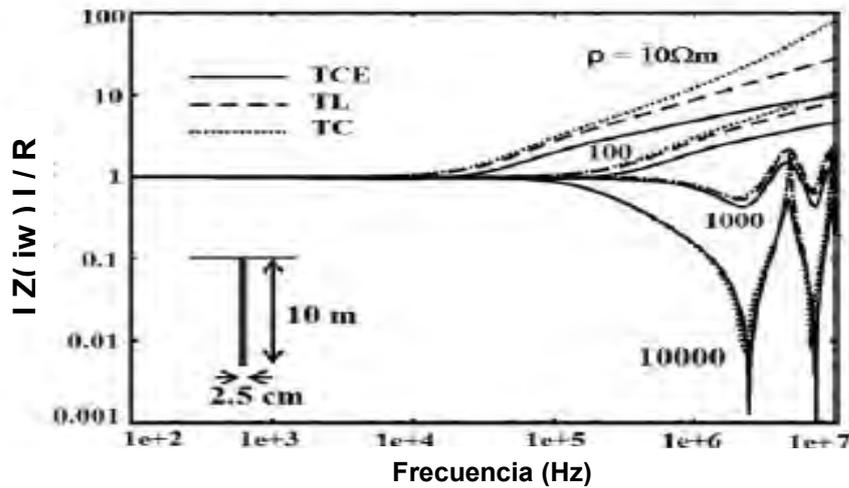
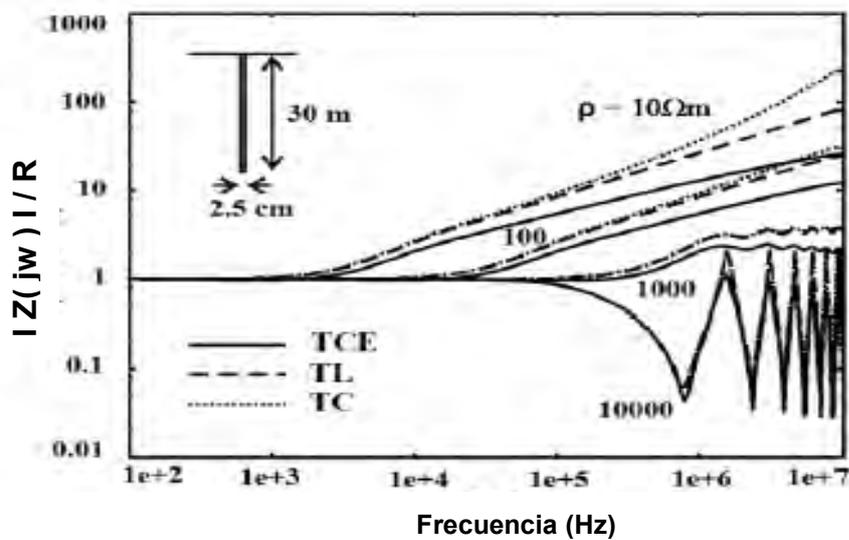


Figura 3.12 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 10 m. Fuente de [44].



Figuras 3.13 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo de varilla vertical de 30 m. Fuente de [44].

En forma similar, para los electrodos horizontales de PT con material de cobre de 14 mm de diámetro, enterrado a 0,8 m y los mismos suelos que en el caso de varilla vertical; se ha efectuado los cálculos para los tres modelos de TCE, TL y TC; los resultados se muestra en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16.

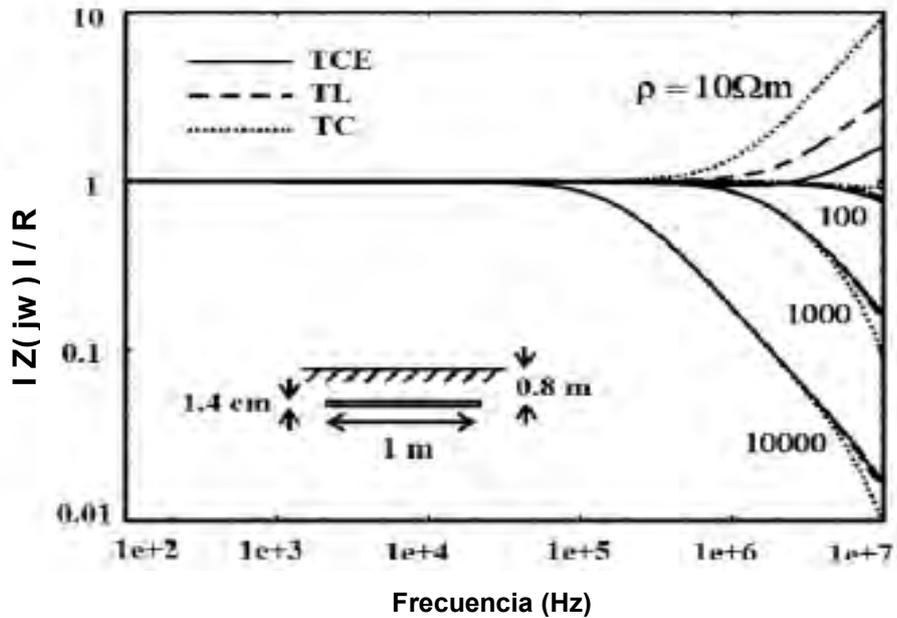


Figura 3.14 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 1 m. Fuente de [44].

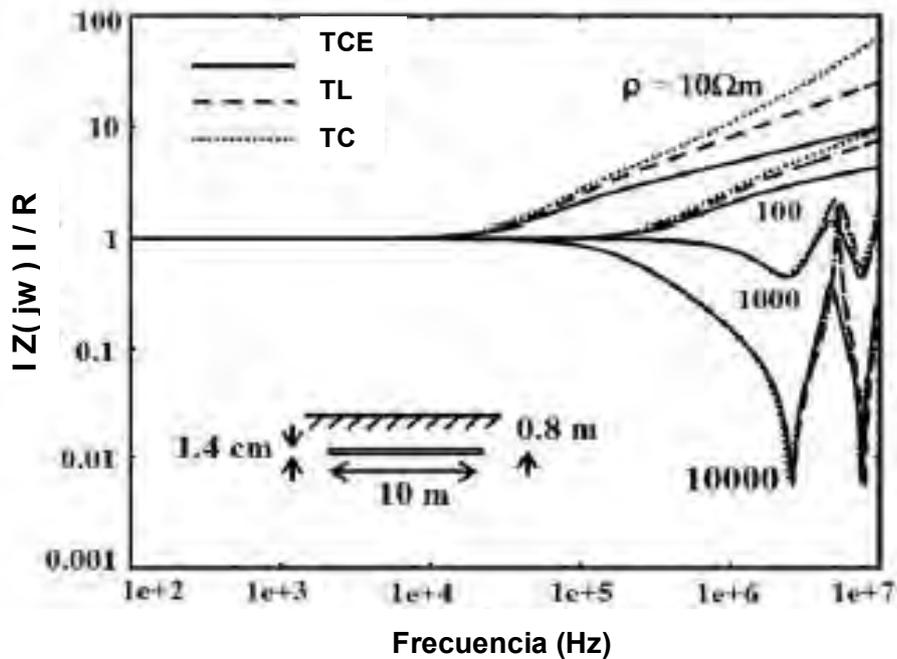


Figura 3.15 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 10 m. Fuente de [44].

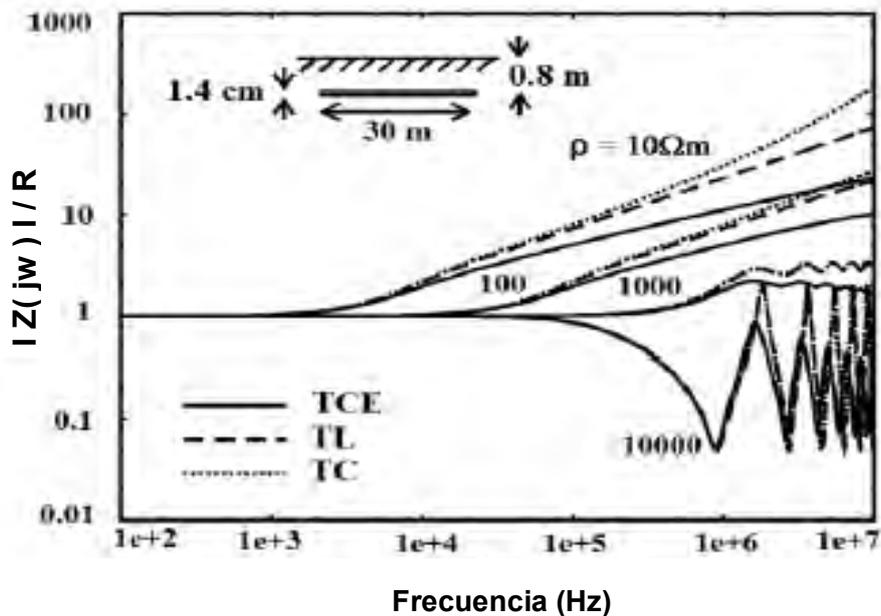


Figura 3.16 Módulo de Impedancia normalizada con Resistencia en CC versus Frecuencia, para un electrodo horizontal de 30 m. Fuente de [44].

Comparando los valores de los módulos de las Impedancias $|Z|/R$ de las Figuras 3.11 al 3.16, para las PT con electrodos horizontal y vertical de la misma longitud, se muestra que en todas las situaciones para la frecuencia menor a 5 kHz la Z es constante, es de notar que existe una frecuencia límite bajo la cual la respuesta de PT no varía, no existiendo dependencia a la frecuencia ($|Z| \approx R$). Sin embargo, encima de esta frecuencia existe dependencia, donde la respuesta tiene característica Inductiva ($|Z| > R$) y/o Capacitiva ($|Z| < R$). Esa frecuencia límite fue denotada como Frecuencia Característica (F_c) por [32] a partir del modelo TC; también por [44] se determinó la Frecuencia Característica en forma empírica desarrollado a partir del modelo TCE.

Es importante señalar la característica Inductiva/Capacitiva de la PT en respuesta transitoria, obtenido a partir de los análisis comparativos; esta depende principalmente de la Resistividad del suelo, se hace predominante el efecto Capacitivo en suelos de altas Resistividades.

Los estudios comparativos para los Modelados de TCE, TL y TC muestran que en los tres modelos la Impedancia dinámica de PT en alta frecuencia y a bajas Resistividades presentan diferencias notorias; mientras que para altas Resistividades (mayores a 1000 Ωm) los tres modelos tienen tendencias similares. Destacando los resultados obtenidos a partir de los modelos TL y TCE en los cuales las Impedancias dinámicas de PT son muy próximas, a medida que la Resistividad del suelo aumenta. Esto lo hace muy interesante al

Modelo de PT aproximado por TL, por que sin tener la complejidad de la TCE nos da aproximaciones aceptables y con un sustento físico matemático aceptable.

b) Análisis comparativo teórico-experimental

Para validar el Modelo de la Puesta a Tierra con respuesta transitoria se ha tomado como referencia los resultados experimentales obtenidos por Electricite de Francia (EDF), sobre un extenso registro de mediciones de campo de Tensiones Transitorias del comportamiento a tierra remota; estos estudios han sido utilizados por muchos investigadores para verificar los modelos de TCE y TL.

En las pruebas efectuados por la EDF se utilizó un electrodo de PT con conductor de cobre de 50 mm² insertado en agujeros 62 mm de diámetro, lleno de una mezcla de bentonita y agua. La capa o chaqueta de la mezcla semilíquida de los electrodos de PT tenía una resistividad aproximadamente 1 Ω -m, mientras la resistividad del suelo circundante era de 1300 Ω -m. Para las simulaciones, la Resistividad promedio del suelo equivalente homogéneo es fijada a 450 Ω -m, la permitividad relativa del suelo es fijada a 10. Las corrientes de impulso resultantes tenían aproximadamente un valor pico 30 A y dependientes de tiempo ajustables de 0.2 μ s a 3 μ s.

Las simulaciones efectuadas por [25] mediante cálculos analíticos usando los modelos de TCE y TL, así como los registros de mediciones de EDF; los resultados se han graficado en la Figura 3.17, donde se observa que las respuestas del Módulo de la Impedancia de PT y su ángulo en el dominio de la frecuencia, son similares para el Modelo TL y TCE; mostrando un buen ajuste respecto a las pruebas experimentales medidas por EDF en toda la gama de frecuencia observada de 1 kHz a 100 MHz.

En la Figura 3.17, se muestra la verificación del Modelo de PT con respuesta dinámica mediante las mediciones de las Pruebas experimentales de la EDF, se observa una mejor aproximación al Modelo por Teoría de Líneas de Transmisión; este resultado en cierta forma es sorprendente, por que mediante los resultados experimentales de la EDF se confirma el buen comportamiento del Modelo de PT aproximado por TL, con mejor aproximación que el modelo TCE. Por lo tanto, el Modelo de PT aproximado por TL tiene ventajas comparativas respecto al Modelado TCE y nos da soluciones muy aproximadas a este último. Se concluye, que el Modelado de la Puesta a Tierra aproximado por teoría de Líneas de Transmisión (TL) se ha verificado teórica y experimentalmente su validez; por el cual se ha seleccionado como tema principal de esta Tesis, ha ser desarrollado en el Capítulo 4.

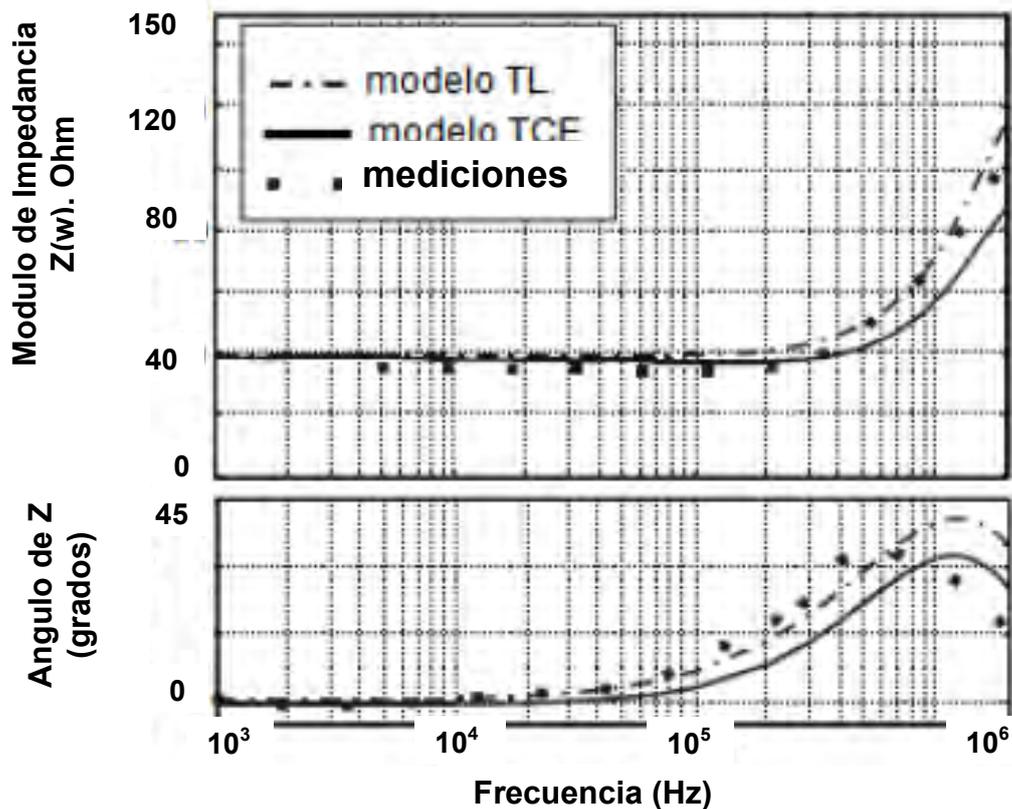


Figura 3.17 Módulo y ángulo de la Impedancia de Puesta a Tierra medida por EDF y simulada, para el Modelo TL y TCE por [25].

3.5 Ventajas y Desventajas de los Modelados de Puesta a Tierra con Respuesta Transitoria.

Después de haber revisado y evaluado la literatura especializada de los modelados predecesores descritos en este Capítulo y los análisis comparativos desarrollados en 3.4, se han identificado diferentes aproximaciones, sus ventajas y desventajas. En la Tabla N° 3.2 se ha sistematizado las características y nivel de complejidad de los Modelos de la Puesta Tierra con respuesta dinámica; determinándose que el modelo de PT aproximado por TL es el mas simple, Razonablemente preciso físico y matemáticamente, eficaz en la solución; este Modelo será desarrollado en el capítulo 4.

Tabla 3.2 Comparación de Niveles de Complejidad del Modelado de Puesta a Tierra en régimen transitorio.

Modelado de Puesta a Tierra (PT)	Nivel de complejidad de análisis de respuesta transitoria o dinámica de la Puesta a Tierra				
	Algoritmos Matemáticas	Nivel de Entendimiento	Procesamiento para Solución	Capacidad del computador requerido	Nivel de Exactitud
1. Aproximación por Teoría de Campo Electromagnético (TCE)	Complicado	Dificultad para Entender	Dificulta incluir ionización del suelo, puede predecirse el retraso de la propagación de onda.	Especial, alta capacidad, tiempo de cómputo largo.	Confianza de ser más preciso.
2. Aproximación por Teoría de Circuitos Eléctricos (CE)	Simple	Fácil de entender	Permite incluir la ionización de suelo, no puede predecir el retraso de propagación de onda.	Normal, Capacidad media, tiempo de cálculo pequeño.	Razonablemente preciso.
3. Aproximación por Teoría de Línea de Transmisión (TL)	El más simple.	Muy fácil de entender.	Fácil para incluir la ionización de suelo. Se puede predecir el retraso de propagación de onda.	Normal, capacidad media, tiempo de cálculo pequeño.	Razonablemente preciso. Eficaz en la solución.

CAPÍTULO 5

MODELADO DE LA IONIZACIÓN DEL SUELO EN EL CÁLCULO DE LA PUESTA A TIERRA CON RESPUESTA DINÁMICA

5.1 Criterios Generales

El suelo típicamente está compuesto de varias sustancias, como son: agua, espacios de aire, sólidos menudos, sólidos finos, gases disueltos, sales minerales y materia orgánica, todas estas sustancias afectan las características eléctricas del suelo, aunque la disrupción de los materiales dieléctricos sólidos, líquidos y gases son individualmente bien entendidos; sin embargo, un modelo físico para explicar su comportamiento combinado aún no ha sido desarrollado.

Generalmente se acepta que la intensidad del Campo Eléctrico generado por la alta densidad de corriente de la descarga del rayo, causa canales de descarga en las interfaces de agua y gas, en torno al electrodo; debido a que la Resistencia del plasma en los canales de descarga es inferior a la del suelo circundante, habrá una disminución evidente en la Resistencia a tierra del electrodo, este efecto es asociado usualmente a la ionización del suelo.

El conocimiento del comportamiento no lineal de la Puesta a Tierra bajo descargas de Rayo no es entendido totalmente, quizás debido al proceso sumamente complicado. Mediante simulaciones de transitorios electromagnéticos de Puestas a Tierra (PT) rigurosas, basados en el análisis del dominio de la frecuencia, en la mayoría de las soluciones no se incluye la ionización del suelo, debido a que este efecto es no lineal, difícil de incluir en la solución analítica, por la influencia de muchas variables.

En los análisis transitorios de la PT se debe considerar el efecto beneficioso que resulta de la ionización del suelo, sobre todo en los suelos de alta Resistividad, este efecto es más beneficioso para condiciones de altos niveles de descarga; en estudios realizados hasta hoy, el no considerar el efecto de la ionización del suelo en los diseños de PT, ocasiona diseños costosos sobredimensionados e ineficaces.

En el modelado de la ionización del suelo, se tomará en cuenta las siguientes asunciones:

1. El suelo es un medio uniforme y homogéneo.

2. La descomposición en torno al electrodo ocurre dentro de una zona uniforme.
3. Se toman diferentes tipos de suelo, para aplicar el mismo esfuerzo dieléctrico, en forma independiente del contenido de humedad o de constituyentes.
4. Se ignora el efecto de ionización del suelo para un modelo de Puesta a Tierra conservador o escenario del peor caso.

La ionización ocurre, cuando la densidad de corriente y el campo eléctrico resultante en la superficie del conductor, exceden los valores umbrales denominados Densidad de Corriente crítica (J_c) y Campo Eléctrico Crítico (E_c), relacionados por la ecuación.

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_{suelo}} \quad (5.1)$$

Donde:

- J_c : Densidad de corriente crítica (A/m^2)
- E_c : Campo eléctrico crítico (V/m)
- ρ_{suelo} : Resistividad del suelo (Ohm-m)

El comportamiento transitorio de un electrodo de PT con respuesta atenuada para evitar la falla inversa en el aislamiento de una Línea Eléctrica, tiene incidencia directa en la seguridad de la operación y economía de la Empresa concesionaria del suministro.

En el presente estudio de la PT con respuesta transitoria a las corrientes de impulso tipo rayo, se considera el efecto de la ionización del suelo y se analizara dos modelados:

- Primero, se desarrollara el modelo convencional de ionización del suelo para ser incluido en la simulación del comportamiento transitorio de la puesta a tierra.
- Segundo, se analizará un modelo de ionización de suelo con Resistividad dependiente de la corriente de impulso, el cual considera la Resistividad Residual y su cuantificación en la región de ionización, se ha determinado a partir de la literatura existente que incluye resultados experimentales realizados en [62] y [67].

5.2 Modelo de Puesta a Tierra Convencional con Ionización del Suelo

En el estudio del modelado de la Puesta a Tierra por [62] en 1942 y por [63] en 1948, se asumió que la ionización del suelo es uniforme alrededor del conductor y la Resistividad de esta región de Ionización disminuye instantáneamente al mismo valor que el del conductor de Puesta a Tierra. En esta condición, bajo el criterio de alta conductividad transitoria del suelo ionizado, el suelo todavía conserva una Resistividad Residual que depende de la variación de la corriente de impulso y del Campo Eléctrico límite de ionización.

Este criterio ha sido utilizado por muchos investigadores cuando el fenómeno de ionización del suelo debe ser incluido en los modelos para el análisis transitorio de la PT, ello ocasiona el aumento ficticio del diámetro del conductor y aumenta la conductancia (G) en p.u. de longitud del conductor de PT, de modo que puede disipar con eficacia más corriente del Rayo en el suelo y por lo tanto reduce el Máximo Potencial pico en el punto de inyección y la impedancia de Puesta a Tierra.

5.2.1 Criterios y Metodología

El modelado convencional de ionización del suelo, influye en el valor de los parámetros R, L, C, G de la PT en p.u. de longitud, adaptado al modelo aproximado a la LT (capítulo 4), según lo cual, los conductores de PT deberían ser discretizados en los “n” segmentos antes que ocurra la ionización del suelo, los parámetros en p. u. de longitud pueden ser calculados usando el método descrito en el Anexo A1, considerando la variación ficticia del radio del conductor por el efecto de la ionización.

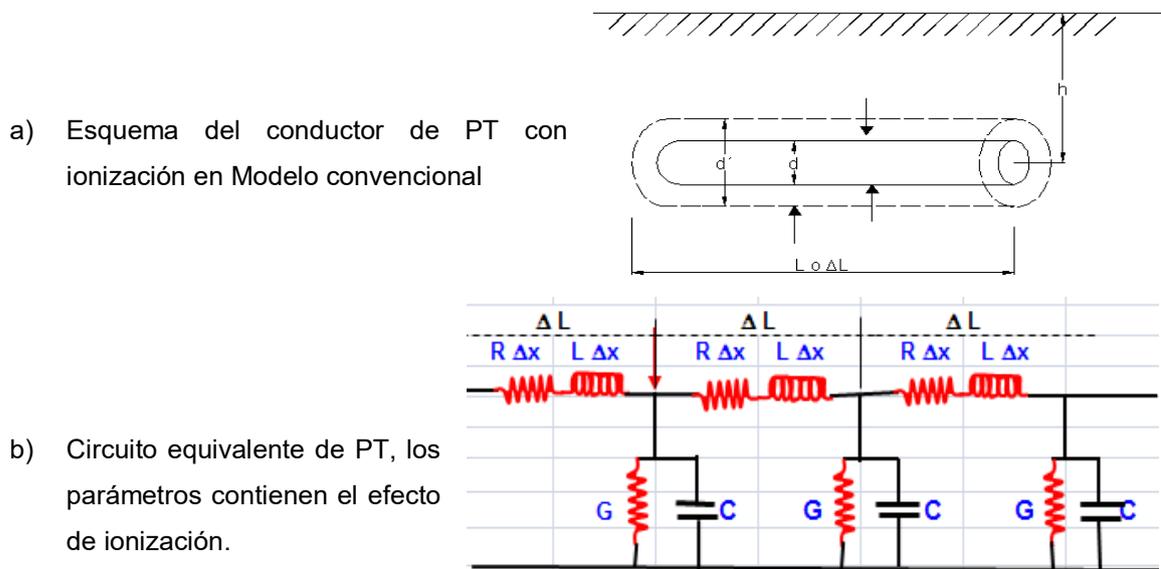


Figura N° 5.1 a), b) Modelo de PT aproximado a Línea de Transmisión con Ionización. Método Convencional.

Cuando la corriente de rayo es inyectada en el conductor de PT, el análisis transitorio de su respuesta se efectúa con la solución de las ecuaciones de ondas viajeras o D'Alembert, presentados en el Anexo C1; si la disipación de corriente es bastante alta para un segmento, la intensidad de Campo Eléctrico sobre la superficie de este segmento excederá el valor crítico de la Intensidad del Campo Eléctrico para ionización del suelo, (E_c) iniciándose la ionización sobre aquel segmento.

De los criterios descritos, el radio en la región de ionización (a_i) aumenta a un valor que corresponde a la intensidad de Campo Eléctrico Crítico (E_c); este se calcula por la ecuación.

$$a_i = \frac{\rho_0 * I_{\perp segm}}{2\pi l_{segm} E_c} \quad (5.2)$$

Donde:

a_i : Radio en región de ionización (m)

$I_{\perp segm}$: Corriente transversal disipación en el segmento conductor hacia el suelo (kA)

l_{segm} : Longitud de cada segmento (m).

ρ_0 : Resistividad inicial o pre ionización del suelo (Ω -m).

E_c : Intensidad de Campo Eléctrico crítico de Ionización del suelo (kV/m)

Basado en el modelo de ionización del suelo formulado en [62], para el cálculo de los nuevos parámetros en p.u. de longitud, el radio de la región de ionización será usado con su valor ficticio; y su aplicación en el modelado de la PT aproximado a LT uniforme. Previo al cálculo del radio del conductor con ionización del suelo, el electrodo se divide en “n” segmentos, aplicando las ecuaciones (5.1) y (5.2) para cada segmento del conductor de PT (horizontales y/o varillas verticales); excepto en el segmento en la punta de la varilla vertical, cuyo radio de la región de ionización, (a_i), se calcula añadiendo una semiesfera en la punta, expresado por.

$$a_i = \frac{1}{2} \left(-l_{segm} + \sqrt{l_{segm}^2 + \frac{2\rho_0 * I_{\perp segm}}{\pi E_c}} \right) \quad (5.3)$$

Con la inclusión del fenómeno de ionización del suelo, se calculan los nuevos parámetros en p.u. de longitud del conductor de PT, luego se puede efectuar el análisis en transitorio de la respuesta de dicha PT, calculando las Tensiones y Corrientes transitorias, como en la sección 4.8.

5.2.2 Aplicaciones del Modelo de Puesta a Tierra Convencional con Ionización

Se analizó el comportamiento transitorio del electrodo conductor de PT incluyendo la ionización del suelo usando el Método Convencional y el Modelo de PT aproximado a Línea de Transmisión Uniforme, para un electrodo horizontal simple de 20 m y conductor de cobre de 6,42 mm ϕ (25 mm²), instalado en suelos de 100 Ω -m y 1000 Ω -m a 0,60 m de profundidad, respectivamente. Se ha calculado el valor de los parámetros (R, L, C, G)

del conductor de PT para cada segmento incluyendo la ionización del suelo, el resultado se presenta en el cuadro siguiente.

Tabla 5.1 Parámetros de un electrodo de Puesta a Tierra en Modelo aproximado a LT con ionización del suelo. Método convencional de [62].

SUELO	Electrodo de PT, conductor horizontal 20 m		PARÁMETRO DE CIRCUITO PI – DISTRIBUIDOS, MODELO TL				Campo Eléctrico Crítico
	Resistividad (Ω-m)	Nº Secciones	Radio ficticio (mm)	Resistencia (Ohm)	Inductancia (mH)	Capacitancia (μF)	Conductancia (Mho)
100	10	227,36	8,24	2,07E-04	1,07E-01	6,61E-02	350
1000	10	795,77	32,58	8,19E-05	1,36E-01	2,57E-03	1000

En la condición de ionización del suelo, se asume que la Inductancia y la Capacitancia de cada segmento no varían, porque la ionización del suelo no cambiará la permeabilidad magnética del suelo, y sólo cambiará ligeramente su permitividad eléctrica. Sin embargo, la influencia de la permitividad del suelo sobre el comportamiento transitorio de PT no es muy importante comparada con el de la Resistividad.

Para la excitación de los electrodos se ha inyectado una corriente de impulso de frente de onda rápido dado por.

$$I(t) = 12000 * (e^{-15500*t} - e^{-999900*t}) \text{ A} \quad (5.4)$$

Según la forma de onda, la corriente pico es 11064 A y la componente de la corriente transversal $I_{\perp segm}$ con ionización es de 10000 A.

Para simular la ionización usando el método convencional, se aplica el criterio del “radio ficticio”, el cual simula el aumento de las dimensiones del radio del electrodo, asumiendo que el suelo ionizado se comportara como conductor (electrodo). En aplicaciones de respuesta transitoria de PT, para Resistividades del suelo de 100 Ω-m y 1000 Ω-m (casos 1 y 2) con ionización, se ha efectuado los cálculos usando los parámetros de la Tabla 5.1 y para las simulaciones se ha usado como soporte el Programa ATP según se detalla a continuación:

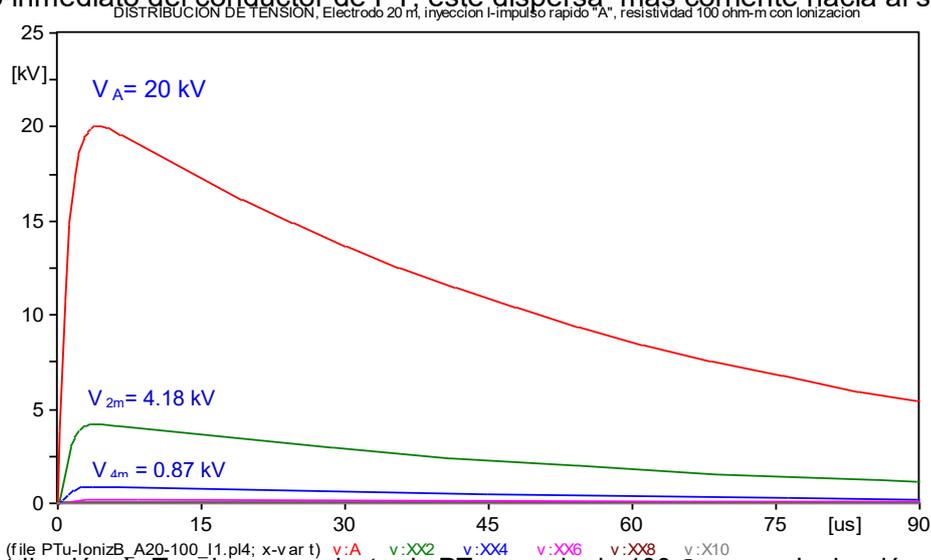
Caso 1: Se considera el Electrodo de PT enterrado a 0,60 m de profundidad, en suelo de resistividad de 100 Ω-m, permitividad relativa (ϵ_r) de 30; el Campo Eléctrico crítico para la ionización de suelo (E_c) es 350kV/m basado en el estándar IEEE [64].

El valor del radio ficticio calculado según [62] bajo las condiciones de ionización previstas, éste varía aproximadamente de 40 a 150 veces y modifica los parámetros de la impedancia de PT; el cálculo de las Tensiones en el punto de inyección de la corriente, para la condición de ionización del suelo se ha efectuado utilizando el ATP. El resultado se ha graficado en la Figura 5.2 a), donde se observa que la tensión pico con ionización ha disminuido aproximadamente el 47% con respecto al caso sin ionización, que se muestra en la Figura 4.14 a) del capítulo 4.

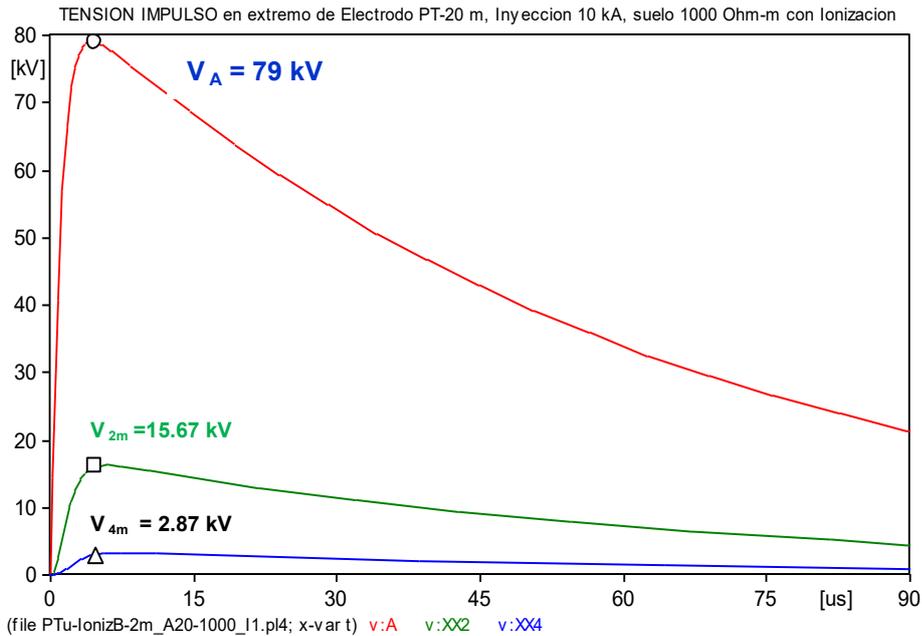
El caso 2: El mismo electrodo se ha enterrado a 0,60 m de profundidad, en un suelo de resistividad de 1000 Ω -m, permitividad relativa (ϵ_r) de 10; el campo eléctrico crítico para la ionización de suelo (E_c) se considera 1000kV/m basado en las pruebas de [34].

En forma idéntica al caso 1, con el valor de los parámetros de la Tabla N° 5.1 en la condición de ionización y con el soporte del ATP, se simuló la inyección de la corriente de impulso del caso 1 en el extremo del electrodo de PT; el resultado del cálculo se ha graficado en la Figura 5.2 b), donde se observa que la tensión máxima transitoria en el punto de inyección ha disminuido aproximadamente el 78% con respecto al caso sin ionización de la fig. 4.14 b) presentado en el capítulo 4.

En los gráficos de las figs. 5.2 a) y b), se observa que V_A es la tensión en el punto de inyección, V_{2m} y V_{4m} son las tensiones en el electrodo de PT a la distancia de 2m y 4m del punto de inyección; estos resultados confirman que cuando ocurre ionización del suelo en el entorno inmediato del conductor de PT, éste dispersa más corriente hacia al suelo.



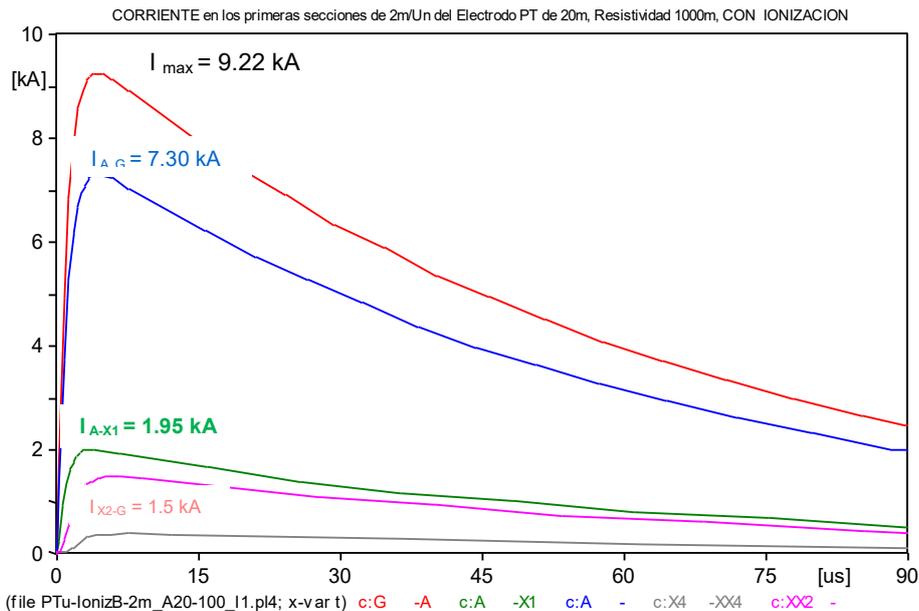
a) Distribución de Tensiones en electrodo PT en suelo de 100 Ω -m, con Ionización.



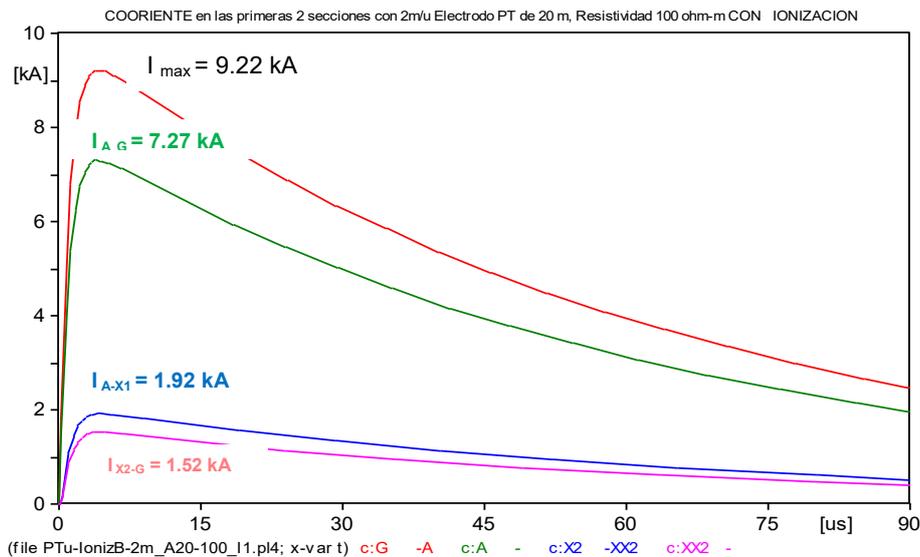
b) Distribución de Tensiones en electrodo PT en suelo de 1000 Ω -m, con Ionización..

Fig. 5.2 a), b) Tensiones Transitorias máximas en punto de inyección a PT, conductor de 20 m en suelos de 100 Ω m y 1000 Ω m con ionización. Modelo convencional de [62].

Para ambos tipos de suelo analizados, el electrodo de PT se ha dividido en secciones iguales de 2 m cada uno, se observa que la distribución de la corriente en el electrodo de PT en los primeros 2 m (de 0 a 2 m), la corriente transversal del conductor con ionización hacia el suelo representa aproximadamente el 75% de la corriente total. En la sección de 2 m a 4 m la corriente transversal esta es aproximadamente el 25% de la corriente total; esto manifiesta una mejor conductividad del suelo.



a) Disipación de corriente en electrodo de PT en suelo de 100 Ω -m con Ionización.



b) Disipación de corriente en electrodo de PT en suelo de 1000 Ω -m con Ionización.

Fig. 5.3 a), b) Distribución de Corriente de impulso en el conductor de PT de 20 m en suelos de 100 Ω -m y 1000 Ω -m con ionización. Modelo Convencional de Ionización del suelo [62].

Discusión de resultados del Método convencional de Ionización del suelo:

- Los estudios de la respuesta dinámica sin y con ionización del suelo, considerando el método convencional en los casos 1 y 2, ha permitido determinar que la ionización del suelo en baja Resistividad disminuye la sobretensión en el punto de inyección aproximadamente al 75% y en alta Resistividad disminuye aproximadamente al 22%, haciéndose más importante para suelos de alta Resistividad, debido a que influye en la reducción del potencial súbito pico en el punto de inyección.
- También se analizó la distribución de corrientes a lo largo del electrodo de PT, en los casos 1 y 2; el resultado se muestra en la Fig.5.3 a) donde la corriente de impulso inyectada a la PT es I_{max} de 9.22 kA, la corriente transversal dispersada hacia el suelo en el primer segmento de 2m es I_{A-G} de 7,30 kA, la corriente longitudinal en el primer segmento a lo largo del conductor de 0 a 2 m es I_{A-X1} de 1,95 kA, la corriente transversal de disipación al suelo del segundo segmento de 2 m a 4 m es I_{X2-C} de 1,5 kA, en forma progresiva la corriente se disipa de la PT al suelo; las ondas de corriente de impulso son rápidas, por lo que la distribución también se efectúa en tiempos muy cortos.

5.3 Modelo de la Puesta a Tierra Dinámica con Ionización del Suelo dependiente de la Corriente

Es poco probable que el suelo ionizado tenga la misma conductividad que la del metal del conductor enterrado como electrodo de PT, por lo tanto, la asunción de considerar el efecto de ionización de suelo como el aumento del diámetro metálico de los conductores de PT,

sobre estima la influencia beneficiosa de la ionización del suelo durante la limitación del crecimiento súbito del potencial en la PT, especialmente cuando la región de ionización del suelo es muy grande y el suelo tiene alta resistividad.

Los resultados experimentales de [62, 66, 67], muestran que la Resistividad del suelo ionizado siempre se mantiene por encima del valor de la Resistividad de los conductores de PT, también en [68] se observó en un sistema experimental cilíndrico coaxial, que la tensión se reduce a valores comprendidos entre el 10% y 30% en la región de ionización, para diferentes clases de suelo; asimismo, la teoría de ionización del suelo [67], muestra que éste conserva una Resistividad residual en la región de ionización.

El modelo dinámico [67] variable en el dominio del tiempo para la ionización del suelo, asume que la resistividad en la región de ionización cambia con el tiempo según la ley exponencial; esto quiere decir que será menor a su valor inicial, reduciendo la sobretensión; la desionización se presenta como un fenómeno de restitución a su estado original. En la Fig. 5.4 a) se muestra el esquema del fenómeno de ionización del suelo al paso de una alta corriente de impulso y en la Figura 5.4b) el circuito equivalente del electrodo de PT.

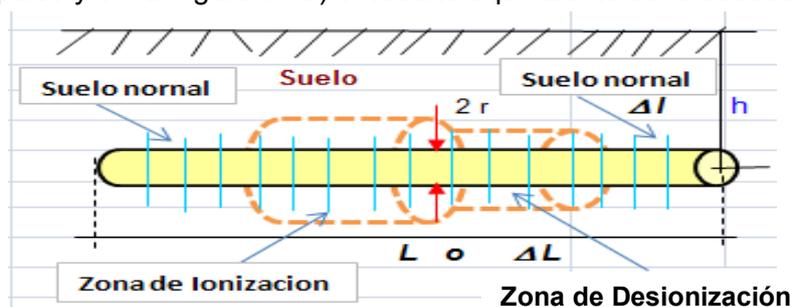


Fig. 5.4 a) Esquema del fenómeno de ionización para Electrodo de Puesta a Tierra.

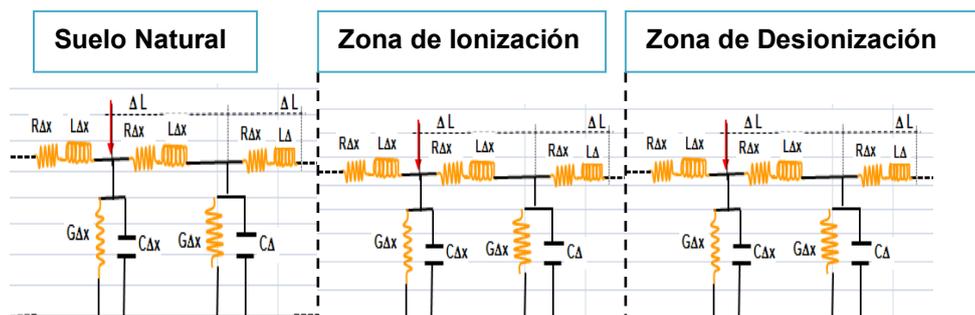


Fig. 5.4 b) Circuito equivalente PI de Puesta a Tierra aproximado a la LT, con ionización de suelo dependiente de la corriente. Modelo de PT en [67].

5.3.1 Criterios para el Modelado

El modelo de ionización del suelo convencional descrito en la sección anterior se ha mejorado en [67], logrando desarrollar un modelo de PT que introduce el comportamiento dinámico de la Resistividad del suelo con el efecto de la ionización, en presencia de una elevada corriente

de impulso; en esencia el modelo considera que la Resistividad del suelo con ionización dará origen a un radio diferente del conductor de PT, este cambia como una función de la corriente y el tiempo, el modelo comprende el tiempo físico que está implicado en el proceso.

En la Figura 5.5 se muestra para el modelo original de [34] y [67], el perfil del proceso de la ionización del suelo, las flechas indican la progresión de la ionización en el tiempo, donde se ha identificado las siguientes zonas:

1. En la zona de suelo natural, donde no hay ionización en el suelo, la resistividad permanece constante.
2. En la zona de ionización, donde ha excedido la densidad de corriente crítica, en esta condición la resistividad disminuye con el tiempo a un valor mínimo (ρ_i) con la densidad creciente de corriente.
3. En la zona de desionización, luego de ocurrida la ionización después de un pequeño tiempo adicional, la densidad de corriente se hace menor al valor crítico, la resistividad se recupera hacia el suelo natural.

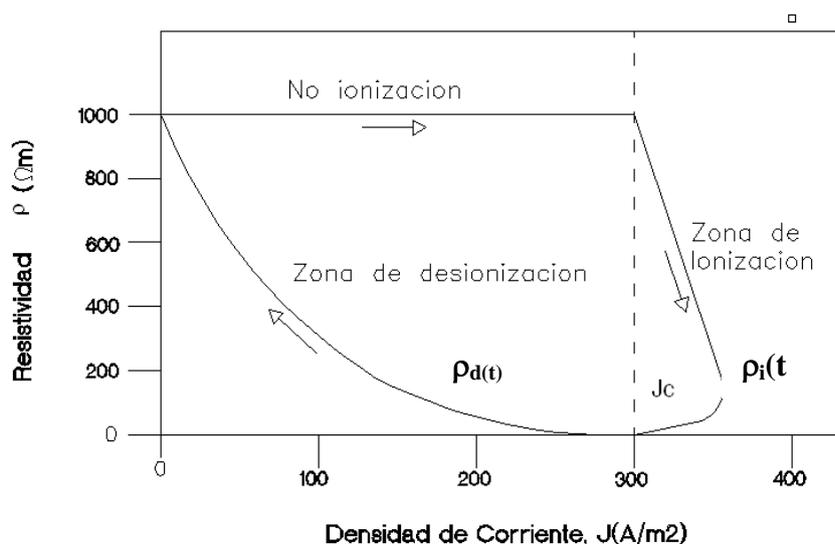


Figura 5.5 Perfil ilustrativo de la Resistividad dinámica con el proceso de ionización del suelo, propuesto en el Modelo de [67].

Los nuevos parámetros del electrodo de PT (R , L , C , G) en valores p.u. de longitud, se pueden calcular como en el procedimiento del capítulo 4.

Este modelo fue modificado y puesto en práctica por [67] en 1982; posteriores investigaciones fueron implementados en el EMTP por [26] y mediante análisis transitorios a las Corrientes de Impulso tipo Rayos, utilizando el ATP en [56] se mostró el buen comportamiento del modelo examinado; los experimentos se efectuaron para corrientes de hasta 120 kA, inyectados en pie de torre de una línea de transmisión de 500 kV.

En [61] y [80] se desarrollaron una extensión al modelo de [67], donde postulan que el fenómeno de la ionización produce un comportamiento no lineal del electrodo de PT, parecido al de un arco eléctrico de alta tensión, esta nueva investigación la propuso como un modelo alternativo, el cual esta basado en el modelo de arco producido por la apertura de un interruptor de Cassie-Mayr, extensamente aceptado por la CIGRE WG 13.0; éste se sustenta en el balance energético de la ionización de suelo. En este tema faltan mayores investigaciones para obtener un modelado confiable y de aplicación eficaz.

5.3.2 Cálculo de la Impedancia de Puesta a Tierra Dinámica

En cualquier estado del tiempo, cuando un electrodo de Puesta a Tierra es sometido a una corriente o tensión de impulso, la Impedancia de la PT sometida a esa corriente de impulso se puede calcular por la ecuación (5.5).

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (5.5)$$

Donde:

t = Tiempo [s]

Z(t) = Impedancia dinámica del electrodo de puesta a tierra en tiempo (t).

V(t) = Tensión en el punto de aplicación de la corriente en el electrodo de puesta a tierra en el tiempo t.

I(t) = corriente que fluye por el electrodo de PT en tiempo, t.

El modelado dinámico originalmente propuesto en [67] y posteriormente modificado y puesto en práctica por [34], fue usado para simular el comportamiento transitorio del electrodo con varilla de PT; en este modelo, se ha considerado los efectos no lineales completos de ionización en el entorno del suelo, para ello se introduce las constantes de tiempo en la zona de ionización (τ_i) y en la zona de desionización (τ_d) que describe en el tiempo, el cambio de la resistividad del suelo circundante bajo condiciones de impulso.

El proceso de la ionización del suelo se inicia cuando la corriente de impulso inyectada al electrodo de PT, tiene el valor de la corriente crítica que hace que el proceso de ionización se inicie en forma similar al inicio de la disrupción de la rigidez dieléctrica del aire (efecto corona), a partir del cual se origina la descarga (hacia otro nivel de potencial); ocurrido este fenómeno físico se origina la disminución de la Resistividad eléctrica del suelo, hasta que la densidad de corriente se hace menor al valor crítico y la resistividad del suelo se desioniza electrostáticamente hasta tomar nuevamente su valor de preionización.

La puesta en práctica del modelo dinámico de la resistividad del suelo en el cálculo de la PT, describe el perfil de la variación de la Resistividad del suelo que cambia dinámicamente en el entorno que rodea al electrodo de PT.

5.3.3 Asunciones base para el modelado de la Resistividad con Ionización

En esta sección se describirá la metodología del comportamiento de la resistividad en un proceso de ionización del suelo dependiente de la corriente de impulso, para la PT con una varilla conductora vertical como electrodo, según la Figura 5.6.

Para una varilla vertical conductora como electrodo de PT, se presentan los criterios iniciales asumidos, en un proceso de dispersión con ionización.

- El suelo que rodea la varilla conductora es homogéneo e isotrópico con Resistividad ρ_0 .
- Una corriente de impulso (I) inyectada, crea las superficies equipotenciales que pueden ser aproximadas a secciones cilíndricas y extremos hemisféricos.
- La densidad de corriente, (J), en el suelo a una distancia radial, (a), del centro de la varilla conductora puede ser aproximada por:

$$J = \frac{I}{2\pi(a * l_v + a^2)} \quad (5.6)$$

- La ruptura del suelo por ionización ocurre cuando la Corriente o Densidad de Corriente critica produce la Intensidad de campo eléctrico que excede su valor crítico (E_c), dado

por:

$$E \geq E_c = \rho_0 * \frac{I_c}{S(r_c)} \quad (5.7)$$

- Las regiones de ionización y desionización son asumidas como uniformes como se muestra en la Figura 5.6 y la resistividad en estas regiones es variable con el tiempo (efecto Joule).

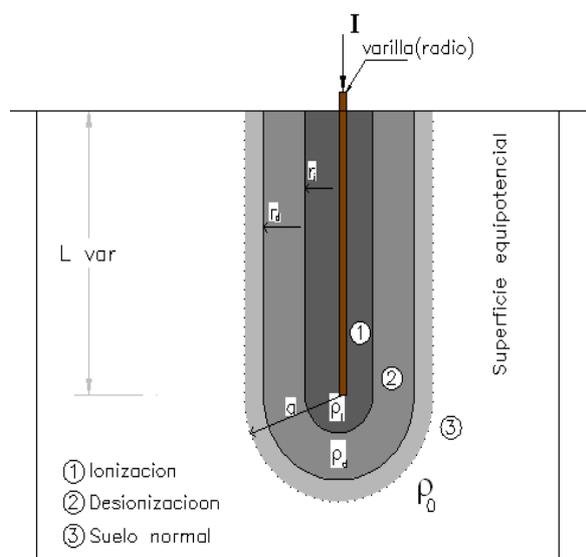


Figura 5.6 Esquema simplificado para la Impedancia de PT con electrodo de una varilla vertical, mostrando zonas de ionización y desionización.

5.3.4 Modelado de la Resistividad en función de la Corriente para Ionización del Suelo

La Resistividad de la zona de ionización del suelo decrece debido a las descargas parciales, la resistencia de la PT debido a la corriente puede ser estimada usando un modelo simple, en el que la resistividad de la zona de ionización se asume de valor cero, por elección al alcanzar el valor de E_C ; sin embargo, la resistividad repentinamente no puede hacerse cero y depende de factores, como la densidad de corriente, la constante de tiempo, el contenido de agua, y la temperatura; de ese modo la Resistencia de PT gradualmente recupera los valores iniciales en la cola de la onda; este comportamiento indica que la Resistividad de la zona de ionización se incrementa con el proceso de desionización en el que el gradiente o Intensidad de Campo Eléctrico es menor que el gradiente crítico de ionización (E_C).

El análisis se efectuará mediante el balance de energía por unidad de longitud para una descarga, dado por la ecuación.

$$\frac{dN}{dt} = v * i - p \quad (5.8)$$

Donde:

- N_0 : Energía inicial (J/m)
- N : Energía acumulada (J/m)
- p : Pérdidas de Potencia (W/m)
- v : Tensión de descarga (V/m)
- i : Corriente de descarga (A)
- t : Tiempo (s)

El proceso de ionización del suelo puede ser considerado similar al fenómeno del Efecto Corona en la superficie de los conductores energizados, en presencia de un gradiente superficial ($> E_C$). Por tanto, el modelado del efecto Corona puede aplicarse para simular la ionización del suelo en torno al electrodo de PT, hasta el momento en que produce la disrupción o descarga por arco; para el calculo a partir de cuyo instante se aplica la ecuación de Mayr's, obtenido como balance de energía en el sistema electrodo de PT-suelo, que describe la evolución del mecanismo del arco, dado por.

$$g = K * \exp\left(\frac{N}{N_0}\right) \quad (5.9)$$

Donde:

- K (Sm) y N_0 (J/m) son constantes
- g (Sm) : Conductancia del arco

Después de iniciado el arco, la potencia eléctrica de entrada, aproximadamente constante con la resistividad, decrece rápidamente siguiendo el incremento de la corriente de arco. Este fenómeno es similar a la ionización o disrupción del suelo. Asumiendo que la potencia eléctrica de entrada “ $v \cdot i$ ” o “ $v_i - p$ ” es independiente de la conductancia. La conductancia (g_i) y la resistividad de la zona de ionización del suelo (ρ_i) son expresados como sigue:

$$g_i = g_0 * \exp\left(\frac{N_n - \Delta N}{N_0}\right) \quad (5.10)$$

$$\rho_i = \rho_0 * \exp\left(-\frac{N_n - \Delta N}{N_0}\right) \quad (5.11)$$

Las energías (N_n) y (ΔN) están dadas en p.u. de longitud, según se indica.

$$N_n = \int v * i * dt \quad (J/m) \quad (5.11.1)$$

$$\Delta N = \int p * dt \quad (J/m) \quad (5.11.2)$$

Donde:

- ρ_i : Resistividad del suelo en la zona de ionización ($\Omega\cdot m$)
- ρ_0 : Resistividad del suelo natural sin ionización ($\Omega\cdot m$)
- g_0 : Conductividad con suelo no ionizado (Sm)
- N_n : Energía de entrada por unidad de longitud (J/m)
- ΔN : Energía de pérdidas por unidad de longitud (J/m)

El modelo muestra la dependencia de la energía y considera la influencia de las ondas de Corriente y Tensión, en la fig. 5,5 se muestra que la Resistividad empieza a decrecer cuando la Densidad de Corriente de impulso excede el valor critico para la ionización del suelo, proceso que continua hasta que la Densidad de Corriente de impulso en el tiempo se hace menor a su valor critico, debido a que la energía ($N_n - \Delta N$) se almacenó en el mismo tiempo; luego la Resistividad gradualmente se incrementa en el proceso de desionización debido a que la potencia permanece ($v \cdot i < p$), hasta la disipación de la corriente.

El modelado de la IONIZACIÓN propuesto tiene los significados físicos siguientes:

1. Es dependiente de la corriente: la inyección de mayor corriente hace más densa la zona de ionización del suelo, dicho crecimiento es equivalente al incremento del radio efectivo y propicia la reducción de la resistencia de PT.
2. Es dependiente de la energía: La Resistividad de la zona de ionización decrece siguiendo la disipación de la energía ($N_m - \Delta N$) almacenada en la zona de incrementos.

3. La desionización del suelo: se produce cuando el gradiente permanece en $E < E_C$; asimismo, la potencia de entrada es menor que las pérdidas de potencia, la resistividad en la zona se incrementa, hasta que recupera la resistividad inicial (ρ_0).
4. Efecto de Histéresis: La zona de Resistividad continúa en su valor para decrecer por algún tiempo, después que la corriente inyectada toma el valor cresta y se incrementa gradualmente en el proceso de desionización; el perfil de la zona de Resistividad durante la Ionización es diferente al proceso de desionización, la Figura 5,5 muestra la característica de histéresis.

El proceso de ionización así caracterizado, donde el electrodo de PT es excitado mediante una corriente de impulso, define tres zonas distintas; tomando las condiciones de contorno en la ecuación (5.11), se determinan las expresiones matemáticas de la Resistividad del suelo en cada zona.

Zona 1:

La ionización ocurre, para $J \geq J_C$ y $r_v > a \leq r_i$.

La Resistividad del suelo (ρ_i) en la zona que ocurre ionización esta dada por:

$$\rho_i = \rho_0 * \exp\left(-\frac{t_i}{\tau_i}\right) \quad (5.12)$$

Donde:

r_i : radio del electrodo en zona con ionización [m]

t_i : tiempo desde el inicio de la ionización [s]

τ_i : constante de tiempo en la ionización[s]

Zona 2:

La actividad residual existe y la desionización ocurre cuando $J < J_C$ y $r_i < a \leq r_d$.

La Resistividad del suelo en la región de desionización (ρ_d), está dado por:

$$\rho_d = \rho_m + (\rho_0 - \rho_m) * \left(1 - \exp\left(-\frac{t_d}{\tau_d}\right)\right) * \left(1 - \frac{J}{J_c}\right) \quad (5.13)$$

Donde:

J_C : Densidad de corriente crítica para inicio de ionización [A/mm²]

ρ_m : Valor de la resistividad al comienzo de la desionización en tiempo “ t_d ” (ohm-m)

r_d : Radio del electrodo en zona de desionización [m]

t_d : Tiempo medido del comienzo de la desionización [s]

τ_d : constante de tiempo de desionización [s]

Zona 3:

La Resistividad es constante, $J < J_c$ y $a > r_d$.

La Resistividad en esta región es la del suelo circundante o suelo natural (ρ_0) que equivale a la preionización.

5.3.5 Cálculo de la Resistencia Eficaz de una varilla conductora

A partir de los supuestos descritos en la sección anterior, se determina la expresión de la resistencia eficaz R_v de una varilla simple conductora [67]. Puede ser calculada sumando las Resistencias en las tres zonas, la cual ha sido calculada en [34] por la ecuación:

$$R_v = \frac{\rho_i}{2\pi l_v} \ln \left[\frac{r_i(r_v + l_v)}{r_v(r_i + l_v)} \right] + \frac{\rho_d}{2\pi l_v} \ln \left[\frac{r_d(r_i + l_v)}{r_i(r_d + l_v)} \right] + \frac{\rho_0}{2\pi l_v} \ln \left[\frac{r_v + l_v}{r_v} \right] \quad (5.14)$$

Donde:

- R_v : Resistencia de PT equivalente (Ω -m)
- l_v : Longitud de la varilla del electrodo (m)
- r_v : Radio del electrodo de PT (m)
- r_i : Radio aparente del electrodo de PT en zona de ionización (m)
- r_d : Radio aparente del electrodo de PT en zona de ionización (m)
- ρ_i : Resistividad del suelo en la zona de ionización (Ω -m)
- ρ_0 : Resistividad del suelo natural sin ionización (Ω -m)

Para el caso específico donde no existe ionización, la resistencia de la varilla en estado estacionario (R_v), esta dado por la ecuación (5.15).

$$R_v = \frac{\rho_0}{2\pi * l_v} \ln \left[\frac{r_v + l_v}{r_v} \right] \quad (5.15)$$

5.4 Aplicación del Modelo de la Resistividad dependiente de la Corriente con Ionización del Suelo

En un proceso de ionización se considera que la resistividad depende de la corriente, cuando la corriente del conductor de PT se dispersa en el suelo, generando un campo eléctrico; si éste supera el campo eléctrico crítico (E_c) se inicia la ionización del suelo, reduciendo su resistividad hasta la resistividad residual y luego mediante un proceso de desionización restablece el valor de la resistividad inicial.

Una aplicación de este modelo, se realizará para un electrodo de PT con varilla vertical de $5/8''\phi$ (15,8 mm) y 3 m de longitud con parámetros concentrados, instalado en suelo con Resistividad de 150 Ohm-m, al cual se inyecta una Corriente de Impulso de la Fig. 4.5. El radio efectivo r_i del electrodo de PT en la zona de ionización varía con la $J(t)$ y el tiempo

según la corriente de impulso, tomando un valor máximo cuando la corriente es máxima, el valor del radio se calcula por:

$$r_i \leq \frac{1}{2} \left[-l_v + \sqrt{l_v^2 + \frac{2I(t)}{\pi * J_C}} \right] \quad (5.16)$$

En forma similar la sección del electrodo varía con el radio en la zona de ionización, su valor se calcula por la expresión.

$$S_i = 2\pi * (l_v * r_i + r_i^2) \quad (5.17)$$

Donde:

$I(t)$: Corriente de impulso inyectado al electrodo de PT (A)

r_i : Radio efectivo del electrodo de PT en la zona de ionizacion (m)

S_i : Sección del electrodo en la zona de ionizacion (m²)

En la zona de desionización el radio efectivo del electrodo cambia su valor en función de la corriente, el proceso se inicia cuando termina la ionización, si el valor de la $J(t)$ se hace menor que la J_C , hasta que se disipa completamente la corriente de impulso en el suelo; el valor del radio en la zona de desionización y su sección del electrodo se calcula por.

$$r_d \leq r_i + \frac{1}{2} \left[-l_v + \sqrt{l_v^2 + \frac{2I(t)}{\pi * J_C}} \right] \quad (5.18)$$

$$S_d = 2\pi * (l_v * r_d + r_d^2) \quad (5.19)$$

Donde:

r_d : Radio efectivo del electrodo de PT en la zona de desionizacion (m)

S_d : Sección del electrodo en la zona de desionizacion (m²)

Para el cálculo numérico de la resistividad del suelo dependiente de la corriente o la densidad de corriente, en un proceso de Ionización según el Modelado de [67], se han utilizado los valores de la Tabla N° 5.2, con los parámetros y características del suelo en pre-ionización, dimensiones del electrodo y parámetros del suelo cuando ocurre ionización.

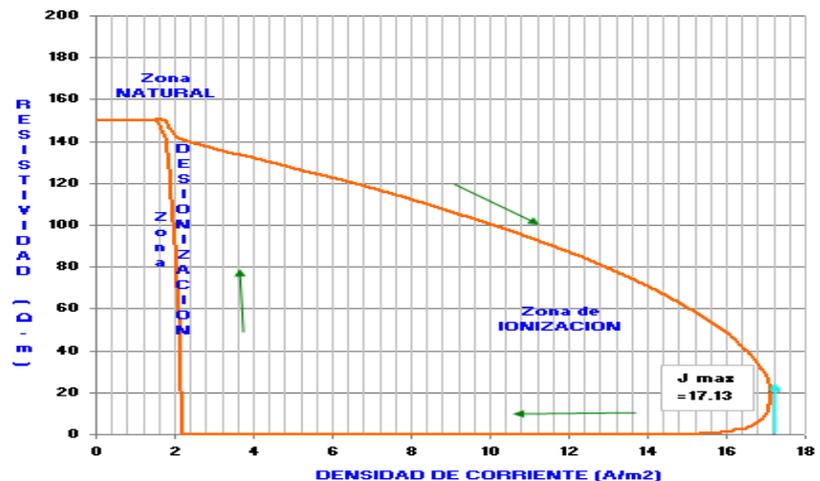
Tabla N° 5.2 Parámetros del suelo en proceso de Ionización dependiente de la Corriente para Modelo de [67].

Resistividad suelo pre-ionización - ρ (Ohm-m)	150	Valores tomados de experimento [67]
Campo Eléctrico Critico para ionización- E_c (kV/m)	300	
Densidad de corriente Crítica (Jc)-A/m²	2000	
Longitud de varilla del electrodo de PT(m)	3	
Diámetro 5/8" Dia (mm)	15,75	
Sección Varilla (m ²)-pre ionización	0,5381	
Constante de Ionización (τ_i - μ S)	2,0	
Constante de Desionización (τ_d - μ S)	4,50	Calculados
Tiempo(μ S) para inicio Ionización	0,127	
Tiempo(μ S) FIN Ionización	138,25	

Se han calculado los valores de la resistividad y la densidad de corriente utilizando el MATLAB para las tres zonas del proceso de ionización (zona natural, zona de ionización y zona de desionización), los resultados se han graficado en la Figura 5.7, donde se observa que la Resistividad con ionización en el punto máximo de la densidad de corriente, representa el 12.8 % de su valor de pre ionización y para el valor promedio de la resistividad en la zona de ionización es del orden del 8%.

La Figura 5.7 muestra el gráfico de $\rho(t)$ vs $J(t)$, obtenido mediante simulación, el cual tiene similar tendencia a la respuesta de la curva logrado en los experimentos de [67]; sin embargo, las constantes de tiempo para ionización y desionización no son valores únicos, se requiere hacer muchos experimentos para lograr determinar estos valores característicos por cada zona del proceso de ionización y por tipo de suelo, mas aún si el suelo fuera estratificado como es frecuente encontrar en las prospecciones de campo. Para este caso se ha utilizado los valores de la Tabla 5.2 de los experimentos [67], los tiempos de inicio y termino de Ionización calculados según la onda de corriente de impulso de la ecuación (5.4), utilizado en la simulación.

Figura N° 5.7 Resistividad del suelo en función de la Densidad de Corriente, para suelo homogéneo de 150 Ohm-m. Modelo de [67].



De la simulación efectuada, se concluye que para corrientes de impulso relativamente grandes inyectados en el electrodo de PT, se produce ionización en el suelo, puesto de manifiesto con la Resistividad Residual promedio que es aproximadamente menor al 10%, este parámetro es un indicador importante que puede ser utilizado en el cálculo del efecto de la ionización.

El modelo de la Resistividad dependiente de la corriente $\rho(I)$ desarrollado por [67], no es posible obtener parámetros únicos, debido a los múltiples parámetros que intervienen en el fenómeno transitorio rápido; asimismo, en la zona de ionización se produce cambios debido a la estructura geomorfológicas y molecular del suelo, que varían en el tiempo de disipación de la onda de corriente de impulso. Este modelado requiere mayor estudio para uso en aplicaciones de ingeniería.

En este trabajo, para aplicación del Modelo de la PT con Ionización del suelo se utiliza el concepto de la Resistividad Residual para simular la disminución de la Resistividad del suelo cuando ocurre ionización, los análisis y pruebas experimentales que sustenta esta aseveración se ha desarrollado en la sección 5.6 y 5.7.

Bajo este criterio se puede calcular los parámetros (R, L, G, C) del electrodo de PT en p.u. de longitud, según el modelado de la PT del capítulo 4. Para ello se considera que ocurrida la ionización del suelo, se calcula la Conductancia (G) del electrodo de PT en p.u de longitud en la condición de la Resistividad Residual en la zona de ionización; así se logra la ecuación de la Conductancia variable del conductor de PT como una función del tamaño de la región de ionización.

5.5 Pruebas Experimentales y Cálculo de la Resistividad Residual en Regiones de Ionización de investigaciones Anteriores

Para la verificación del fenómeno de ionización del suelo al paso de la corriente de impulso, se han tomado como base los resultados de los trabajos de investigación y aportes experimentales publicados en [62], [66] y [67] que se presentan a continuación.

- En la referencia [62] figuran pruebas de impulso para diferentes varillas de puesta a tierra de radios y longitudes diferentes, según se indica en el ejemplo con las letras F, M y K; los resultados se presentan en la Tabla 5.3, para diferentes tipos de suelo.
- En la referencia [66], en el arreglo experimental se efectuaron pruebas donde el electrodo de PT esta conformado por una vasija hemisférica llena con suelo (tierra), donde se instala un pequeño electrodo esférico en el centro de la vasija, el cual es sometido a alta tensión, con la mitad del volumen enterrado en el suelo, el resultado de la pruebas se presenta en la Tabla 5.5.
- En la referencia [67], se busca determinar la Resistividad Residual y verificar el modelo dinámico de la PT con electrodo de una varilla, el electrodo utilizado para las pruebas de impulso eran varillas simples verticales enterradas en el suelo con Resistividad inicial de $50 \Omega\text{m}$, al cual se inyectó corriente de impulso. Todos los parámetros que estuvieron implicados en los referidos experimentos, así como las dimensiones de los electrodos (varilla con radio a y longitud l_c , el electrodo esférico con radio a , la vasija hemisférica con radio, r_v), la resistencia del suelo antes de la ionización, ρ_0 , el valor máximo de corriente de inyección, I , y la intensidad de Campo Eléctrico crítico (E_c), para la ionización del suelo, en suelos diferentes. Los resultados experimentales se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.3 Resistividad Residual del suelo en la región de ionización para los experimentos de [62].

Electrodo PT	Resistividad	Campo Eléctrico crítico	Corrientes de Impulso	Resistividad Residual	Referencias
Varilla F $a=12.7 \text{ mm}$ $l_c=3.048\text{m}$	$\rho_0=87.2 \Omega\text{m}$	$E_c=127 \text{ kV/m}$	$I=10.84 \text{ kA}$	$\rho_{\text{res}}= 4.7\Omega\text{m}$ (5.3% de ρ_0)	Resultados de Pruebas fig 11 [62]
	$\rho_0=87.2 \Omega\text{m}$	$E_c=127\text{kV/m}$	$I= 6.8 \text{ kA}$	$\rho_{\text{res}}= 4.0 \Omega\text{m}$ (4.6% de ρ_0)	Resultados de Pruebas fig 16[62]
Varilla M $a=7.94 \text{ mm}$ $l_c=2.4384\text{m}$	$\rho_0=157 \Omega\text{m}$	$E_c=200 \text{ kV/m}$	$I= 6.6 \text{ kA}$	$\rho_{\text{res}}= 10.1 \Omega\text{m}$ (6.4% de ρ_0)	Resultados de Pruebas fig 16[62]
	$\rho_0=157 \Omega\text{m}$	$E_c=200\text{kV/m}$	$I= 5.2 \text{ kA}$	$\rho_{\text{res}}=11.7 \Omega\text{m}$ (7.5 % de ρ_0)	Resultados de Pruebas fig 16[62]
Varilla K $a=7.94 \text{ mm}$ $l_c=2.4384\text{m}$	$\rho_0=310 \Omega\text{m}$	$E_c= 70 \text{ kV/m}$	$I= 5.5 \text{ kA}$	$\rho_{\text{res}}= 17.3 \Omega\text{m}$ (5.5 % de ρ_0)	Resultados de Pruebas fig 16[62]

Tabla 5.4 Resistividad Residual del suelo en región de ionización para los experimentos de [67].

Electrodo PT	Suelo	Corrientes de Impulso	Resistividad Residual	Referencias
Dimensión de varilla a =6,35 mm l _c = 2.4384m	Condición del suelo ρ ₀ = 50 Ωm E _c = 70 kV/m	I =3.3 kA	ρ _{res} =11.6 Ωm (23.2 % de ρ ₀)	Para los resultados experimentales en fig 3[67]
		I = 9.7 kA	ρ _{res} = 6.4 Ωm (13 % de ρ ₀)	
		I = 13.0 kA	ρ _{res} = 4.9 Ωm (9.8 % de ρ ₀)	

Tabla 5.5 Resistividad Residual del suelo en región de ionización para los experimentos de [66].

Electrodo PT- Dimensiones		Campo Eléctrico crítico-Std	Resistividad pre-ionización	Campo Eléctrico crítico	Resistividad Residual
a = 5 mm	X _p = 2.50 m	E _c =800 kV/m	ρ ₀ = 690 Ωm	E ₀ = 760 kV/m (I = 1.73 kA)	ρ _{res} = 57.4 Ωm (8.3 % de ρ ₀)
a = 5 mm	X _p = 2.50 m	E _c =800 kV/m	ρ ₀ = 690 Ωm	E ₀ = 1570 kV/m (I = 3.57 kA)	ρ _{res} = 20 Ωm (3.0 % de ρ ₀)
a =15 mm	X _p = 2.50 m	E _c =800 kV/m	ρ ₀ = 646 Ωm	E ₀ = 300 kV/m (I = 6.565 kA)	ρ _{res} = 51 Ωm (8.0 % de ρ ₀)
a =15 mm	X _p = 2.50 m	E _c =800 kV/m	ρ ₀ = 646 Ωm	E ₀ = 600 kV/m (I = 13.13 kA)	ρ _{res} = 35 Ωm (5.5 % de ρ ₀)
a = 25 mm	X _p = 2.50 m	E _c =800 kV/m	ρ ₀ = 643 Ωm	E ₀ = 340 kV/m (I = 20.76 kA)	ρ _{res} = 41 Ωm (6.2 % de ρ ₀)

5.6 Discusión de Resultados de Pruebas Experimentales de las Tablas 5.3, 5.4 y 5.5

En los experimentos desarrollados por [62], [67] y [66] se efectuaron para electrodos de PT con varillas verticales de 8' y 10' de longitud con diámetros variables, instalados en suelos de baja Resistividad (< 100 Ω-m), Resistividades intermedias (< 500 Ω-m) y altas resistividades (> 500 Ω-m).

En Tabla 5.3 de [62], se observa que las resistividades del suelo son < 100 Ω-m y < 500 Ω-m, la magnitud de las Corrientes de impulso aplicadas y los Campos Eléctricos Críticos fueron lo suficientemente altos como para que se produzca ionización; los resultados de Resistividad residual obtenidos son valores bajos que están entre 4.6% y 5.3%, lo cual confirma que ha ocurrido ionización con alta conductividad en el suelo.

En la Tabla 5.4 [67] se observa para una Resistividad $< 100 \Omega\text{-m}$, con la Intensidad de Campo Eléctrico aplicados es de un valor bajo, con respecto a otros experimentos que aplicaron entre 300 a 400 kV/m; sin embargo, para este tipo de suelo las Corrientes de Impulso aplicadas son lo suficientemente altos (3 a 13 kA) para que ocurra ionización. Los resultados de Resistividad Residual obtenidas están entre 5.6% y 7.5%, lo cual confirma que ha ocurrido ionización del suelo.

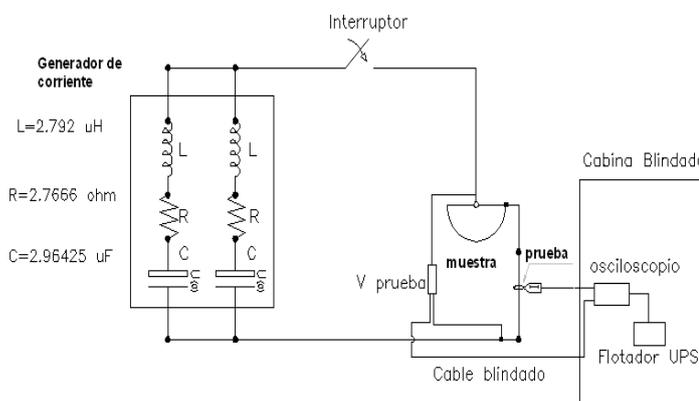
En la Tabla N° 5.5 de [66] se observa que las muestras del suelo utilizados son de alta Resistividad relativa y próximas entre sí (de 643 a 690 $\Omega\text{-m}$), la intensidad de Campo Eléctrico variable entre 300 a 1570 kV/m y las corrientes de impulso aplicadas varían de 1.7 kA a 20.7kA; en este caso los resultados muestran que las Resistividades Residuales son bastante coherentes entre 5.5 % y 8.3% para los Campos Eléctricos menores a 800 kV/m. Es de notar que para el caso de un campo eléctrico muy intenso (1570 kV/m) y Corriente de impulso relativamente baja (1.73 A), la Resistividad Residual es 3%, indica que hubo alta ionización y el suelo se ha convertido en un medio de alta conductividad.

Los resultados de los experimentos presentados, muestra ocesos dependientes de la corriente; para aplicaciones de Corrientes de Impulso intensas, según el valor de la Resistividad se produce la Tensión o gradiente en el entorno del electrodo que ocasiona Campos Eléctricos superficiales, los cuales exceden el valor de la intensidad del Campo Eléctrico Crítico (E_C) y ocasionan la ionización del suelo. El nivel o grado de ionización esta representado por la Resistividad Residual; este se puede expresar en valores porcentuales de la resistividad inicial. Cuando la Resistividad residual es alta, no contribuye sustancialmente para la mejor conducción de la corriente; en cambio, cuando la Resistividad Residual presenta valores porcentuales bajos, la ionización es mas alta, mejorando la conducción del suelo, que incluso puede comportarse instantáneamente como un buen conductor eléctrico. Este resultado se explica en la curva de la figura 5.7, en el proceso de ionización, donde la Resistividad toma valores cero o muy cerca a cero, que equivalen a un conductor eléctrico.

Las pruebas experimentales anteriores, se ha complementado con las efectuadas en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Uppsala (Suecia), donde en las pruebas experimentales se aplicaron corrientes de impulso a un electrodo de PT en suelo de arena con diferentes Resistividades originales, el objeto es determinar la existencia de una Resistividad Residual que permanece en la región de ionización, después de una prueba de impulso.

El esquema del proceso experimental se muestra en la Fig. 5.8, se ha utilizado electrodos esféricos interiores con diámetros de 30 mm y 63 mm, siendo el electrodo externo una vasija con un diámetro 500 mm; el material del electrodo interior más grande de la vasija es Cobre, así como el del electrodo interior más pequeño, siendo la muestra del suelo arena; el generador de corriente usado es una fuente de onda de impulso, el cual es dependiente de la impedancia del circuito de pruebas.

Fig. 5.8 Esquema del sistema experimental usado en la Universidad de Uppsala para determinación de la existencia de la Resistividad Residual en Ionización del suelo.



Los parámetros utilizados en las pruebas de las muestras del suelo (arena) y características del electrodo, se presentan en la tabla 5.6. El resultado de estas pruebas se detalla en la Tabla 5.7, con la obtención mediante el cálculo de las Resistividades Residuales en la región de ionización.

Tabla N° 5.6 Parámetros de electrodos de PT y muestra de suelos de los experimentos en la Universidad Uppsala-Suecia.

N° Ejemplos	Contenido de el ejemplo	Diámetro del electrodo (mm)	Resistividad del Suelo (Ωm)
Ejemplo 1	36 litros de arena seca, 3 litros de agua pura, 18 gramos de sal	63	174
Ejemplo 2	36 litros de arena seca, 2.5 litros de agua pura, 6 gramos de sal	63	356
Ejemplo 3	36 litros de arena seca, 2 litros de agua pura, 3 gramos de sal	30	579
Ejemplo 4	36 litros de arena seca, 1.5 litros de agua pura, 1.5 gramos de sal	30	827

Como fuente de corriente de impulso se usó el Generador de alta Impedancia, el tiempo de frente de la onda de corriente de impulso fue cerca de $1 \mu S$, y el tiempo de cola fue mucho más largo. Para baja impedancia (después que la ionización significativa ha comenzado), el

tiempo de subida de la corriente de impulso fue aproximadamente 100 a 200 μ S, mientras la forma de onda de la tensión de impulso sólo cambió en el tiempo de cola.

En los resultados de los experimentos desarrollados por la Universidad de Uppsala que se muestra en la Tabla 5.7, se observa que el suelo en la región de ionización conserva algún porcentaje de la resistividad original del suelo de pre ionización, denominado Resistividad residual.

Tabla 5.7 Resistividad Residual en región de ionización del suelo obtenidos en experimentos de la Universidad Uppsala-Suecia.

Ejemplo	Corriente y Resistividad Residual en región de ionización			
Ejemplo 1	I = 24.7 A (7.5% de ρ_0)	I = 46.0 A (7.3% de ρ_0)	I = 84.7 A (3.5% de ρ_0)	I = 164.6 A (2.2% de ρ_0)
Ejemplo 2	I = 25.8 A (10.5% de ρ_0)	I = 33.8 A (6.5% de ρ_0)	I = 63.9 A (2.4% de ρ_0)	-----
Ejemplo 3	I = 9.5 A (15.8% of de ρ_0)	I = 21.4 A (3.3% de ρ_0)	I = 33.2 A (1.7% de ρ_0)	-----
Ejemplo 4	I = 2.6 A (46.7% de ρ_0)	I = 4.2 A (22.5% de ρ_0)	I = 7.5 A (11.5% de ρ_0)	I = 16.3 A (2.7% de ρ_0)

Las pruebas no presentan las mediciones de Tensión ni del Campo Eléctrico, parámetros importantes que permiten observar el límite (corona) de inicio de la ionización del suelo; la Tabla 5.7 para las pruebas de los ejemplos 1, 2 y 3, las muestras corresponden a suelo con Resistividades intermedias. Los resultados muestran que para corrientes de impulso de 25 A hasta 165 A, los valores de Resistividad Residual están comprendidos entre 2.4% a 10.5%; esto demuestra que se ha producido ionización con mejora de la conductividad del suelo, a pesar que la arena se comporta como aislante. La prueba del ejemplo 4 se ha efectuado para suelo de alta resistividad y con baja corriente, dando como resultado Resistividades Residuales aleatorias de 2,7% a 46.7%; se puede inferir que los Campos Eléctricos no fueron suficientes para ocasionar altas Conductividades debido a que el material es arena, que tiene un comportamiento dieléctrico, esta ultima prueba se considera como no válida, por lo disperso de los resultados.

En base a las pruebas experimentales, los resultados se presenta en las Tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.7; se ha elaborado el grafico de la Figura 5.9 que relaciona las Resistividades Residuales (%) en la región de ionización a la Tensión máxima, en función de la Resistividad del suelo en estado de pre-ionización, para diferentes corrientes (rango de Amperios a miles de

Amperios), inyectados en un extremo de los electrodos, en suelos con Resistividades comprendida en el rango de $50 \Omega\text{-m}$ a $827\Omega\text{-m}$.

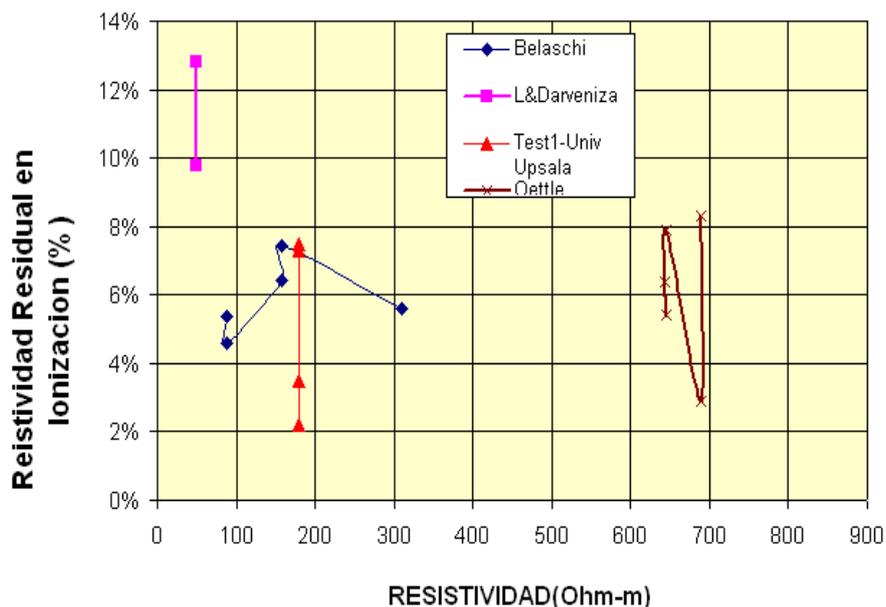


Figura 5.9 Resistividad Residual vs Resistividad del suelo original, en la región de ionización para corrientes máximas en experimentos de [62], [67], [66] y Universidad de Upsala (Suecia).

Los resultados válidos obtenidos de la Resistividad Residual en la región de ionización varían en el rango del 1.7 % al 13 % de la resistividad original del suelo. Se consideran que las dos últimas pruebas de la Universidad de Upsala (Ejemplo 3 y 4 de la Tabla 5.7) deben ser desechadas por presentar resultados muy dispersos.

Se concluye, que la distribución de la Resistividad Residual es aproximadamente logarítmica-normal con la media geométrica del 6.77 % y el valor medio del 6.6 %; por consiguiente, para modelar el efecto de ionización del suelo puede escogerse como Resistividad típica Residual el 7 % en la región de ionización, aún en el suelo con resistividad original más alta que se ha reportado en los experimentos.

Para mejorar las predicciones, falta adicionar más experimentos y encontrar información más completa que relacione la Resistividad Residual y la Resistividad original del suelo en las regiones de ionización, con especial cuidado para suelos de alta Resistividad; para modelar la ionización, como valor más representativo se puede usar el valor de la media geométrica de la Resistividad Residual comprendido entre el 7% al 10% (valor experimental).

5.7 Comparación entre Modelados de Ionización Convencional y Modelado de Ionización dependiente de la Corriente

Se analizó el comportamiento de la PT a los fenómenos transitorios, con la inyección de corriente de impulso tipo rayo, considerando la condición sin y con ionización del suelo; aplicado a cuatro modelados o casos para un mismo electrodo de PT, conformado por una varilla de acero cobreado de 25,2mm de diámetro y 2,40 m de longitud, instalado en un suelo homogéneo con Resistividad de pre ionización de 1000 ohm-m, Permitividad eléctrica relativa (ϵ_{r-soil}) de 10 y Permeabilidad magnética relativa (μ_{r-soil}) de 1, enterrado a 0,30 m de profundidad.

Los cuatro casos a ser analizados corresponden al Modelado de PT aproximado por Línea de Transmisión, que se indican:

Caso 1: Sin Ionización del Suelo.

Caso 2: Modelo Convencional de Ionización del Suelo con incremento ficticio del Radio del electrodo en [62].

Caso 3: Modelo de Ionización del Suelo dependiente de la corriente de impulso e incremento ficticio del Radio del electrodo [67], para Resistividad Residual del 7%.

Caso 4: Modelo de Ionización del Suelo dependiente de la corriente de impulso, sin incremento del radio, para una Resistividad Residual [67] del 7%.

El valor de los parámetros (R, L, C, G) del conductor de PT se ha calculado aplicando las fórmulas del Anexo A1 y de [12] para cada caso, el resultado se presenta en Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Parámetros de PT en Modelo aproximado a LT, con electrodo de Varilla en suelo sin y con ionización, en método Convencional y Dependiente de la Corriente.

CASOS	Resistividad Suelo (Ω -m)	Radio ficticio de PT (mm)	PARÁMETRO DE CIRCUITO PI – DISTRIBUIDOS, MODELO POR TL				Campo Eléctrico Crítico E_c (kV/m)
			Resistencia (Ohm)	Inductancia (mH)	Capacitancia (μ F)	Conductancia (Mho)	
Caso 1	1000	25,2	245,38	7,40E-04	1,50E-02	1,70E-03	No aplica
Caso 2	1000	1326,3	91,25	2,75E-04	4,04E-02	4,57E-03	1000
Caso 3	70	541,13	8,47	3,65E-04	3,05E-02	4,92E-02	1000
Caso 4	70	12,56	17,18	7,40E-04	1,50E-02	2,43E-02	1000

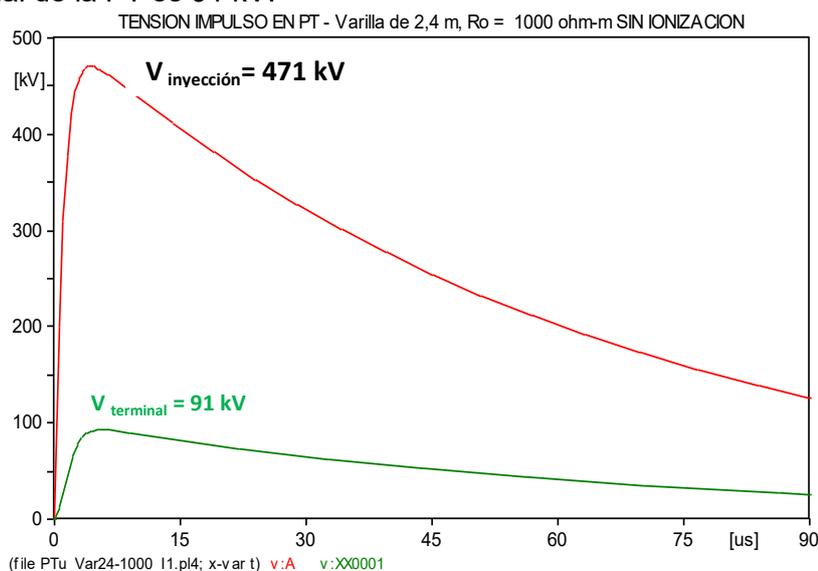
Para la simulación se utilizó la corriente de impulso de la Fig 4,7, su valor máximo pico es 9220 A; la inductancia y la capacitancia varían muy poco por el efecto de la ionización del suelo y su cambio ante el transitorio no es muy importante comparada con el de su

resistividad. Se han efectuado las simulaciones aplicando la corriente de impulso a la PT, el cálculo de las tensiones en el dominio del tiempo se efectuó con el soporte del ATP, se obtuvieron los siguientes resultados.

Caso 1: Análisis transitorio de la PT sin ionización del suelo.

Se ha calculado la tensión en el punto de inyección y terminal del electrodo de PT y se ha graficado en la Fig. 5,10, se observa que la tensión súbito máximo en el punto de inyección es de 471 kV y en el terminal de la PT es 91 kV.

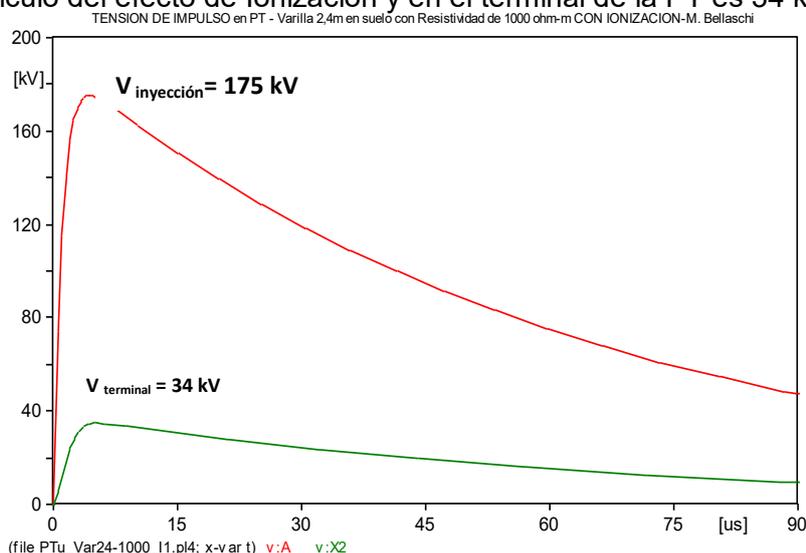
5.10 Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, sin ionización.



Caso 2: Análisis transitorio de la PT con ionización del suelo y variación del radio ficticio del electrodo en función de la corriente de impulso.

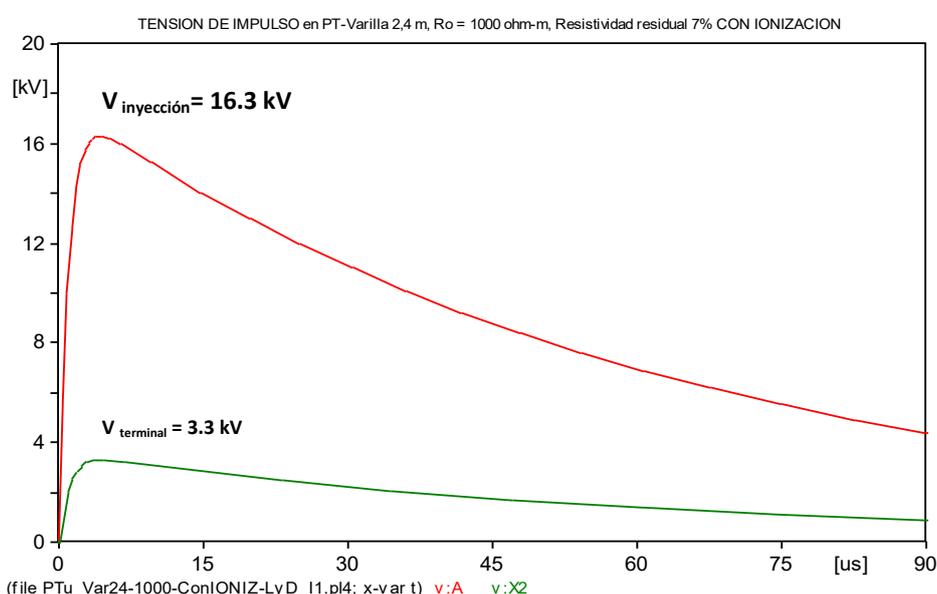
El límite e inicio de ionización del suelo se ha considerado $E_c = 1000 \text{ kV/m}$, valor seleccionado de la observación experimental de [34]. El resultado de la simulación se ha obtenido en la Figura 5.11. Se observa que la tensión súbita máxima en el punto de inyección de la PT es de 175kV que representa el 37.2% del caso 1, que, sin representar el caso físico real es beneficioso para el cálculo del efecto de ionización y en el terminal de la PT es 34 kV.

5.11 Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, con ionización del suelo como aumento ficticio del radio del conductor. Modelado de [62].



Caso 3: Modelo de Ionización del Suelo dependiente de la corriente de impulso e incremento ficticio del Radio del electrodo [67], para una Resistividad Residual del 7%.

Este caso considera que la ionización del suelo depende de la corriente, cuando se produce la ionización disminuye la resistividad a un valor promedio del 7% de resistividad residual (resultados de la sección 5.5). A este efecto se le incluye la variación de las dimensiones del electrodo en la zona de ionización según las ecuaciones (5.16) y (5.17) del modelado de [67]. El resultado del cálculo se muestra en la Fig. 5.12, se observa que la tensión súbita máxima en el punto de inyección es de 16,3 kV que representa el 3.5% del Caso 1 y en el lado terminal es de 3.3 kV; el resultado es una solución muy optimista.



5.12 Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10kA, con ionización del suelo dependiente de la corriente. Modelado de [67].

Caso 4: Análisis transitorio de la PT con Ionización del Suelo Dependiente de la Corriente de Impulso y Resistividad Residual en la Región de Ionización.

Este caso considera que la ionización del suelo depende de la corriente, cuando se produce la ionización disminuye su resistividad a un valor promedio de la resistividad residual del 7% (resultados experimentales de sección 5.5); no incluye el efecto de variación del radio del electrodo en la zona de ionización, según el modelado de [66].

El resultado de la simulación de la Fig. 5.13 muestra que la tensión súbita máxima en el punto de inyección es de 39.1 kV que representa el 8.3% del caso 1 y en el terminal de la PT es de 4.3 kV, esta respuesta es aún una solución optimista.

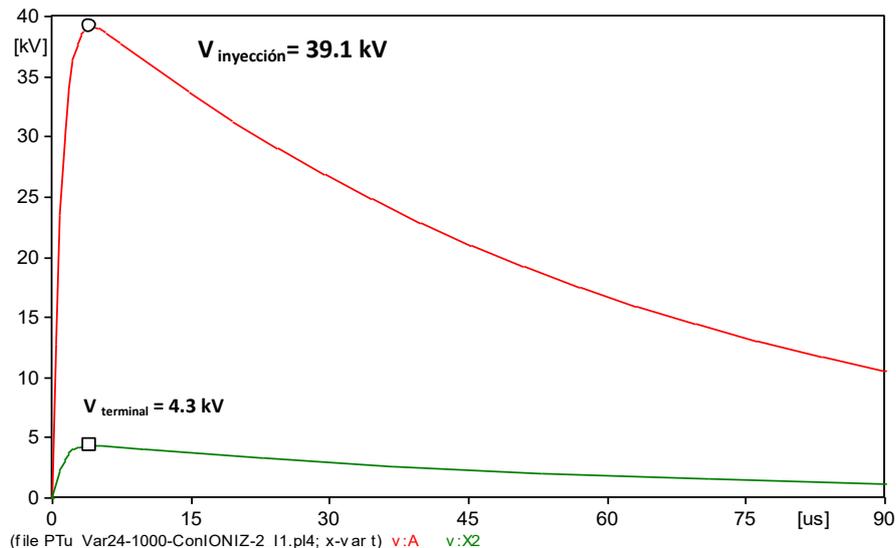


Figura 5.13 Tensión en PT con varilla de 2,4 m, inyección de corriente de 10 kA, con ionización del suelo dependiente de la corriente o Resistividad Residual del 7%. Modelado de [66].

5.8 Discusión a los Resultados comparativos de los Modelados de PT con Ionización

En el análisis de la PT para un electrodo vertical de 25 mm ϕ y 2.40 m de longitud, mediante simulaciones, se determinó la respuesta transitoria ante las Corrientes de Impulso, obteniéndose el valor de las Tensiones súbitas máximas en el punto de inyección para el caso 1 (sin ionización) y los casos 2, 3 y 4 de modelados de PT con ionización del suelo; al ser comparados con el caso 1 sin ionización, se observó que:

- El modelado de PT con Ionización convencional de [62], representa el 37,2% respecto al caso 1 (sin ionización), mejora el comportamiento de la sobretensión en el punto de inyección.
- El Modelado de PT dependiente de la corriente de [67] representa el 3,46% respecto al caso 1, el cálculo de la sobretensión en el punto de inyección se reduce sustancialmente y es una solución muy optimista.
- El Modelado de PT dependiente de la Resistividad residual o corriente de [66] representa el 8,3% respecto al caso 1, el calculo de la sobretensión en el punto de inyección se reduce sustancialmente y es una solución aun optimista.

Los modelados de la PT con ionización de los casos 3 y 4 representa en forma más aproximada al fenómeno físico de la ionización, sin embargo los resultados dan valores muy optimistas; para el caso 2 (Modelo convencional con ionización con variación ficticia del radio) muestra una reducción relativa promedio cercana al 40%, pero no hay seguridad que represente al fenómeno físico real en todas sus manifestaciones.

Finalmente, el modelo de ionización del suelo dependiente de la corriente, las simulaciones de los caso 3 y 4, son los más convenientes a utilizar para estudiar el comportamiento transitorio de la PT bajo corrientes de impulso tipo Rayo, corroborados con los resultados experimentales de la sección 5.6; sin embargo, este tema requiere mayor estudio, para lograr mejores resultados.

5.9 Consideraciones finales al Modelado de Puesta a Tierra con Ionización

El fenómeno de la ionización del suelo produce la reducción instantánea en tiempo real de la Resistencia de PT y mejora la respuesta transitoria de las Tensiones de Impulso en el punto de inyección, la ionización del suelo al ser un fenómeno no lineal plantea una compleja solución analítica; no obstante, del examen a los estudios precedentes desarrollados sobre modelos aproximados y los casos analizados, se han extraído las siguientes conclusiones:

- a) **El Modelado Convencional de ionización del suelo**, pese a que no representa fielmente al fenómeno físico, ha sido sustentado con pruebas experimentales; en este trabajo, mediante simulaciones se ha determinado que la tensión de impulso en el electrodo vertical de PT con ionización, se reduce aproximadamente al 60% en suelos de baja Resistividad y al 35% en suelos de alta resistividad; esto indica que la ionización tiene más importancia en suelos de alta resistividad y es beneficiosa porque mejora sustancialmente el valor pico de la tensión de impulso ocasionado por la corriente de impulso inyectado. Sin embargo, no representa al fenómeno físico real. Actualmente este método ha sido superado.
- b) **El Modelado de ionización del suelo dependiente de la Corriente**, considera que la Resistividad del suelo depende de la Corriente de Impulso o del Campo Eléctrico en la condición límite (E_c) y es función del tiempo, su validez ha sido demostrada mediante pruebas experimentales. Sin embargo, la Resistividad se convierte en una función variable con el espacio y el tiempo, esto ocasiona que los parámetros de la PT (R , L , C , G) son también variables en el espacio y el tiempo, el fenómeno de ionización por ser un fenómeno no lineal impone una solución que se hace muy compleja, haciendo que el modelado debe ser resuelto por aproximación a la Teoría de Campos Electromagnéticos.
- c) **Modelado de la ionización del suelo para el estudio de la PT en estado transitorio a las Corrientes de Impulso, calculado bajo el criterio de la Resistividad Residual en la región de ionización**, queda simplificado y mediante las pruebas de [62], [66] y [67] presentadas en la sección 5.4, permite inferir que la Resistividad Residual varía aproximadamente entre el 7 % al 10% de la Resistividad de pre-ionización, este valor puede ser utilizado para el modelado aproximado.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS TRANSITORIO DE PUESTAS A TIERRA PARA ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

6.1 Criterios para el Dimensionamiento de los Parámetros de la Puesta a Tierra

El objetivo del estudio de los modelados matemáticos para Puestas a Tierra no es únicamente para analizar en detalle la eficacia de diversas configuraciones de Puesta a Tierra, sino también para desarrollar métodos de optimización de criterios de diseño que consideren la seguridad, el espacio y la economía.

El Modelado de la Puesta a Tierra aproximado a Línea de Transmisión estudiado en este trabajo, busca obtener la respuesta transitoria de la PT debido a las descargas de rayo para diversas aplicaciones; tales como:

- Estimación de la Resistencia en estado estable o en corriente continua de diversas configuraciones de puesta a tierra.
- La influencia de los parámetros del suelo sobre el comportamiento transitorio de la Puesta a Tierra.
- Análisis Transitorio de la puesta a tierra en suelos estratificados para configuraciones típicas.
- La validez del criterio de longitud eficaz para el dimensionamiento de la PT y su aplicación en la optimización del dimensionado del electrodo.
- Cálculo de la distribución de la Tensión y Corriente en los electrodos conductores de Puesta a Tierra, debido a las corrientes de impulso para configuraciones de mayor aplicación.
- Cálculo de la distribución de la corriente del rayo sobre la estructura de las LT y la ionización del suelo alrededor del conductor de PT al pie de la torre o soporte.

Para el dimensionamiento de los electrodos de PT se debe tomar en cuenta: dimensión y capacidad del conductor, parámetros del suelo (Resistividad, Permitividad eléctrica relativa, humedad, temperatura, ect.), configuración de los armados.

6.1.1 Capacidad del Conductor para electrodo de Puesta a Tierra

El conductor para electrodo de PT previo a la selección, requiere que se evalúe su material, el cual depende de las condiciones ambientales donde será instalado; luego determinar su capacidad, sección y/o diámetro y temperatura máxima permisible. En la

Tabla 4.1 se describe las características y capacidad de los conductores que pueden ser usados para electrodos de puesta a tierra. En la selección del conductor para PT debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- El conductor y los demás elementos del electrodo deben tener alta conductividad eléctrica, para no ocasionar diferencia de potencial local, los materiales que cumplen estos requisitos son el cobre y/o acero-cobre.
- Debe ser resistente a la fusión y deterioro mecánico bajo las más adversas combinaciones de la magnitud de corriente de falla y tiempo de duración. La determinación cuantitativa de la capacidad o ampacitancia para temperaturas pico en tiempos cortos, puede ser obtenida para el cálculo de las ecuaciones (30) y (33) de la Std 80 IEEE y las constantes de los materiales de la tabla 1-Std 80 IEEE.
- El conductor debe ser resistente y confiable a la alta degradación, especialmente en localizaciones expuestas a la corrosión o daños físicos. Como una regla, el diseñador tomara precauciones para que la temperatura de cualquier componente conductor del electrodo (incluido las juntas o conectores) no excedan la máxima temperatura permitida del más bajo valor del componente.

6.1.2 Parámetros del electrodo de Puesta a Tierra en Modelo aproximado a Línea de Transmisión

El dimensionado de la Resistencia en estado estable o en DC de la PT, se ha desarrollado en el capítulo 3, donde se analizaron los modelados de [10], [12] y [14], determinando que el modelado [12] da respuestas con mejor aproximación y convergencia respecto a la longitud del electrodo con contrapesos y varillas verticales; esa metodología se ha utilizado en este trabajo para determinar la R_{CC} .

En forma similar se calcula los parámetros de la PT, como la Inductancia (L), Conductancia (G) y Capacitancia (C) en p.u. de longitud, según la metodología desarrollada en el Capítulo 4, sección 4.5, 4.6 y en el Anexo A1.

6.1.3 Influencia de los Parámetros del Suelo y Dimensiones del Conductor en la Puesta a Tierra

Los parámetros de los electrodos para el modelado de la PT aproximado a LT están relacionados a sus parámetros (R, L, C, G) cuyos valores están dados en p.u. de longitud. Estos parámetros son dependientes de las características del suelo, tales como la Resistividad ρ_{soil} y la Permitividad eléctrica relativa del suelo ϵ_{soil} ; en la Tabla 4.2 se presentan las características eléctricas del suelo. Otro parámetro importante de la PT es el diámetro del conductor y la profundidad de enterramiento del electrodo. Por lo tanto, la influencia de estos parámetros es determinante para el dimensionamiento de la PT en

respuesta dinámica y requiere obtener datos del suelo de primera fuente, mediante trabajos de campaña.

6.1.3.1 Influencia de la Resistividad del suelo

En una estructura de gran tamaño, cuando se inyecta una corriente de impulso; en la PT aparecerá una diferencia de potencial de impulso grande entre puntos diferentes; sobre todo entre el punto de inyección de la corriente de impulso y la PT, esto es más notorio en suelos de alta resistividad y puede ser explicado de la siguiente manera:

- En suelos con alta resistividad, la conductancia a tierra desde los conductores de PT es mucho más pequeña que en suelos de baja Resistividad; entonces, para el mismo electrodo de PT, si se aplica la misma corriente de impulso en el punto de inyección, el pico del potencial en suelo de mayor Resistividad será mayor que en el suelo de baja Resistividad.
- Por consiguiente, la diferencia de potencial entre las diferentes partes de PT, será grande cerca al punto de inyección de la corriente de impulso. El problema de la distribución desigual (no uniforme) de la tensión es muy importante en múltiples puntos de la puesta a tierra. Siendo más crítico en redes malladas donde la corriente de impulso podría fluir al sistema eléctrico, causando serios problemas electromagnéticos de control; por cuanto, ninguna corriente pasa libremente desde la PT al sistema eléctrico, a menos que perfore el aislamiento de la masa.

6.1.3.2 Influencia de la Permitividad Eléctrica del Suelo

Está relacionado con el acoplamiento capacitivo entre los conductores de PT, porque el suelo es un medio casi dieléctrico, entonces, la influencia de su permitividad eléctrica relativa (ϵ_{soil}) sobre el comportamiento transitorio de la PT actúa sobre la Capacitancia propia y mutua de los conductores enterrados.

En suelo de baja resistividad, la corriente de conducción es dominante; entonces, la permitividad eléctrica del suelo varia de 20 a 30, en el comportamiento transitorio de la PT comparado con su Resistividad (ρ), la ϵ_r es más pequeña y podría ser ignorada.

En alta Resistividad, el acoplamiento Capacitivo es más determinante porque la corriente de desplazamiento es comparable con la corriente de conducción; sobre todo, durante el tiempo de pico de la corriente de inyección, donde las altas frecuencias son dominantes. Por consiguiente, la Permitividad eléctrica del suelo varia de 5 a 10 y su influencia sobre el comportamiento transitorio de la PT debe ser considerada para mejor exactitud; debido a que ésta influye en el valor de la impedancia de impulso.

Para determinar la incidencia de la variación de permitividad eléctrica relativa del suelo, se ha considerado un electrodo de 6,42 mm Φ y 50 m de longitud enterrado a una profundidad de 0.60 m en cuatro tipo de suelos. Los parámetros (R,L,C) e Impedancia de impulso se ha calculado en la tabla siguiente.

Tabla 6.1 Impedancia de Impulso y Resistencia en CC de PT para varios tipos de suelo

Electrodo de PT		Características del Suelo		Impedancia (Ω) de PT	
Longitud (m)	Diámetro (mm)	Resistividad (Ω -m)	Permitividad relativa	Imped. de impulso- Z_s	Resisten-cia DC
50	6.42	100	30	69.94	2.03
		500	20	85.66	10.16
		1000	10	121.14	20.32
		2000	10	121.14	40.65

La impedancia dinámica se ha calculado y graficado en el dominio del tiempo, que se muestra en la Figura 6.1, donde se observa que la Permitividad eléctrica es inversamente proporcional a la Impedancia de Impulso (Z_s) de la PT; para permitividades bajas corresponde resistividades altas y la Z_s es alta; en cambio para permitividades altas corresponde Resistividades bajas, su Impedancia de Impulso también es baja; asimismo, la permitividad eléctrica tiene influencia en el valor de la impedancia variable con el tiempo y la concavidad de la curva. Es de notar que la permitividad es directamente proporcional al valor de la capacitancia.

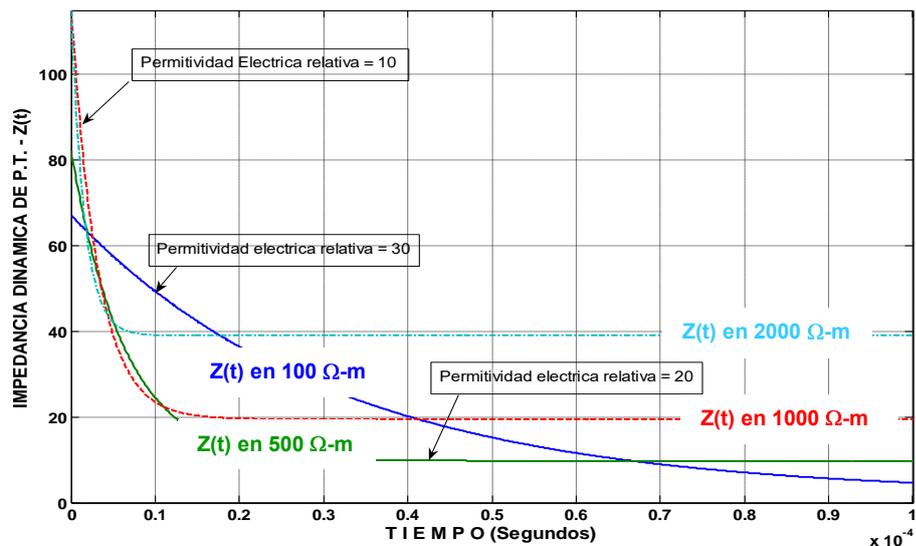


Figura 6.1 Módulo de Impedancia Dinámica de PT variables con la Permitividad eléctrica para electrodo de 50 m, en suelos con baja y alta Resistividad.

6.1.3.3 Conductividad de los Conductores y efecto skin

La conductividad y el efecto Skin en el conductor, influyen principalmente en la Resistencia interna en p.u. de longitud del conductor. Cuando el radio del conductor es constante, la resistencia es inversamente proporcional a la conductividad; si la corriente de impulso inyectada tiene alta frecuencia, la profundidad pelicular del efecto Skin en el conductor es más pequeña que el radio del conductor, por lo que el efecto superficial o skin debería ser omitido. Entonces, la resistencia del conductor en p.u. de longitud, será proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia.

6.1.3.4 Influencia del Diámetro del Conductor de Puesta a Tierra

La influencia es más compleja que el de la resistividad y la permitividad eléctrica del suelo, porque cuando el diámetro del conductor cambia, sus parámetros (R, L, G y C) en p.u. de longitud cambiarán, del mismo modo que el Gradiente Superficial (E), el valor de los parámetros aumenta al disminuir el diámetro.

Además, se observa que el efecto de la ionización del suelo ocasiona un aparente incremento del diámetro que ayuda a disipar la corriente y disminuir la tensión transitoria más rápido; en el modelado convencional de [62] con ionización del suelo desarrollado en el Capítulo 5, se ha considerado el aumento homogéneo constante del diámetro del conductor de PT, esto no representa realmente al fenómeno físico.

6.2 Respuesta Dinámica de la Puesta a Tierra en Suelo Estratificado

Cuando se diseña la PT, se debe observar que si los suelos están estructurados en más de una capa, se debe determinar las características eléctricas por cada tipo de suelo o capa y finalmente determinar el comportamiento de la Puesta a Tierra para estas condiciones.

Si se considera un suelo de alta Resistividad, es preferible y mejor una PT con un electrodo horizontal de cierta longitud, que varias varillas verticales, con longitud equivalente por ser difícil su instalación; asimismo, según lo descrito en el Capítulo 3, la varilla vertical no es muy eficiente para disminuir la Resistencia de PT en estado estable; en la práctica, el suelo por lo general tiene una estructura estratificada, en tal situación las PT en respuesta dinámica deberían configurarse para que puedan reducir la impedancia transitoria.

Para determinar el comportamiento dinámico de las PT ante Corrientes de Impulso tipo Rayo en suelos estratificados, se han considerado dos casos:

El **primer caso**, un electrodo de varilla vertical en suelo de dos capas de la Fig. 6.2.

El **segundo caso**, un electrodo horizontal con 4 ramificaciones ortogonales de 3 m cada uno, enterrado a 0.60 m en suelos de dos capas; a continuación analizaremos estos casos.

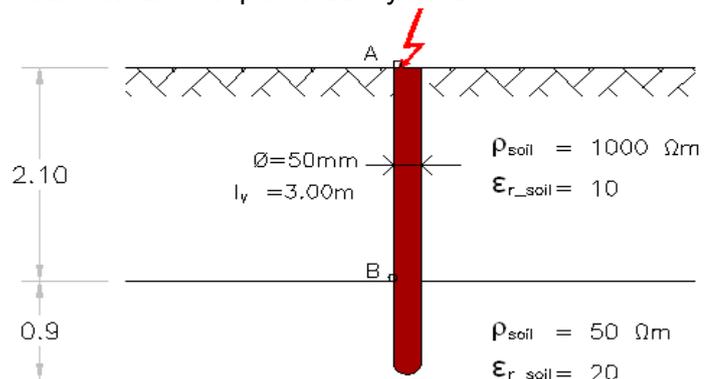
Primer caso: Electrodo con Varilla Vertical instalado en suelo de dos capas, puede analizarse como dos subcasos.

Caso 1a: Capa Superior Alta Resistividad y Capa Inferior de Baja Resistividad.

La referida estructura de suelo es típica de Costa con arena en la capa superior y arcilla en la capa inferior, y puede representar a algunas zonas altas de la Costa o Sierra baja, en los meses de estiaje (invierno) en que la capa superior con menos humedad tiene alta Resistividad y la capa inferior permanece normal.

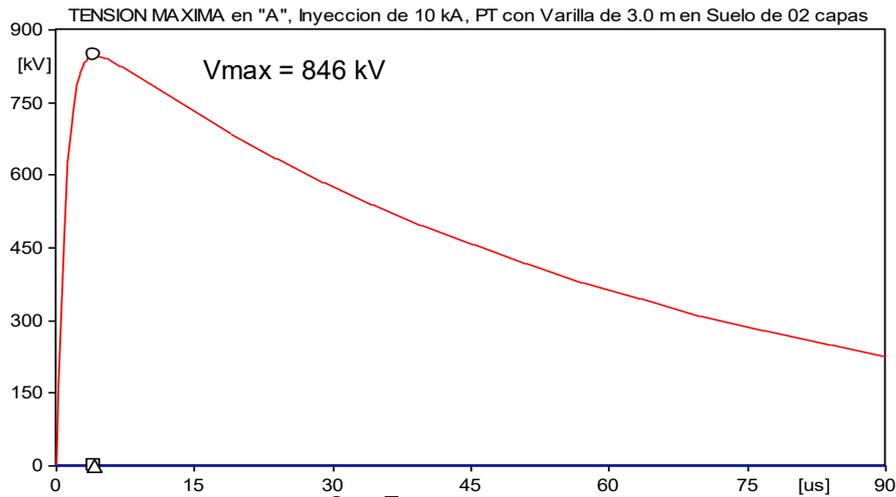
Para esta referida condición de suelo, se propone como ejemplo una PT con electrodo conformado por una varilla vertical de la Figura 6.2, se considera la parte superior de 2.1 m penetrando en suelo de alta Resistividad ($\rho = 1000 \Omega\text{-m}$, capa 1) y la parte inferior de 0,9 m penetrando en suelo de baja Resistividad ($\rho = 50 \Omega\text{-m}$, capa 2); en este caso la varilla es muy eficiente para reducir la tensión transitoria en el punto de inyección.

Figura 6.2 Electrodo de Puesta a Tierra con varilla vertical en suelo de dos capas.

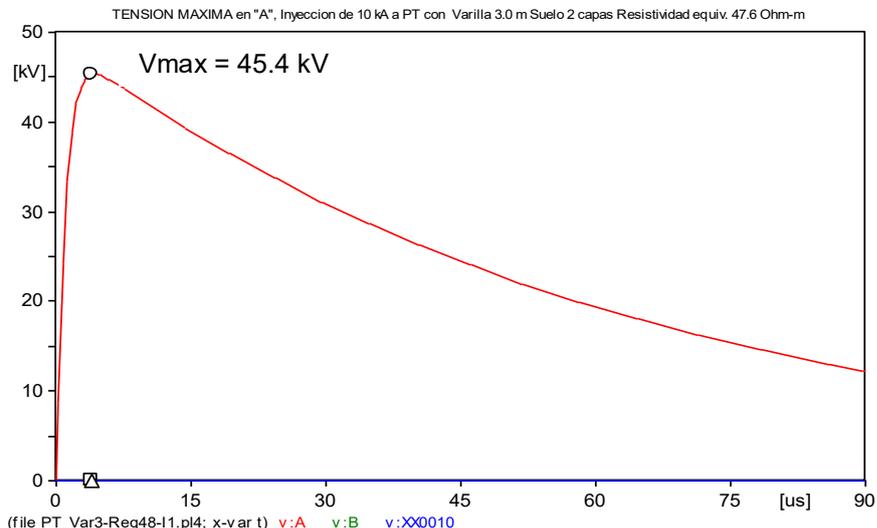


El electrodo de PT de la Fig. 6.2 formado por una varilla de 25 mm ϕ y 3 m de longitud, para las simulaciones se aplica la corriente de impulso de la Fig. 4.5, y se analizó para dos condiciones predeterminadas: **El primero** se ha efectuado para suelo con Resistividad de 1000 Ohm-m (capa superior-caso crítico), los resultados del cálculo se muestran en la Fig. 6.3 a); **el segundo** se ha efectuado para un suelo de Resistividad equivalentes de 47,8 Ohm-m, los resultados del cálculo se muestran en la Fig. 6.3 b). En los gráficos se observa que la tensión transitoria máxima en el punto de inyección (V_{max}), es aproximadamente 18.6 veces mayor que si esta misma varilla estuviere en un suelo homogéneo de Resistividad equivalente de 47.8 ohm-m.

Un mejor ajuste en el cálculo se puede lograr modelando la varilla por elementos segmentados uniformemente, según las dimensiones de cada capa y Resistividad uniforme de estas, efectuar el cálculo de las Tensiones y corrientes en el electrodo de PT.



a) Tensión de impulso en punto de inyección de PT, con electrodo de Varilla de 3 m, suelo de 1000 Ohm-m.



b) Tensión de impulso en punto de inyección de la PT con electrodo de Varilla de 3m, en suelo de 2 capas con Resistividad equivalente de 47.8 Ohm-m.

Figura 6.3 a), b) Tensiones de Impulso en Varilla de PT con suelo de 2 capas, Corriente de Impulso rápido 10 kA. Modelo de PT aproximado a LT.

Caso 1b: Capa Superior Baja Resistividad y Capa Inferior de Alta Resistividad.

La referida estructura de suelo es típica de la Selva Baja con tierra vegetal en la capa superior y arcilla en la capa inferior, para la simulación se ha considerado la misma varilla de PT en suelo con las capas invertidas de la Fig. 6.2 para inyección de la misma corriente en el extremo superior.

La PT se ha modelado en electrodo distribuido para las dos capas por separado, con sección de 2.10 m en suelo de $\rho_1 = 50 \Omega\text{-m}$ y de 0,90 m en suelo de $\rho_2 = 1000 \Omega\text{-m}$. Los resultados se muestran en la Fig. 6.3c), se observa que la tensión máxima (V_{max}) en el punto de inyección es 62.4 kV, representa 13.6 veces menos que para el caso de la Fig.

6.3 a) y el 37% mayor que si la Resistividad equivalente es de 47.6 Ohm-m en suelo uniforme de la Fig. 6.3 b).

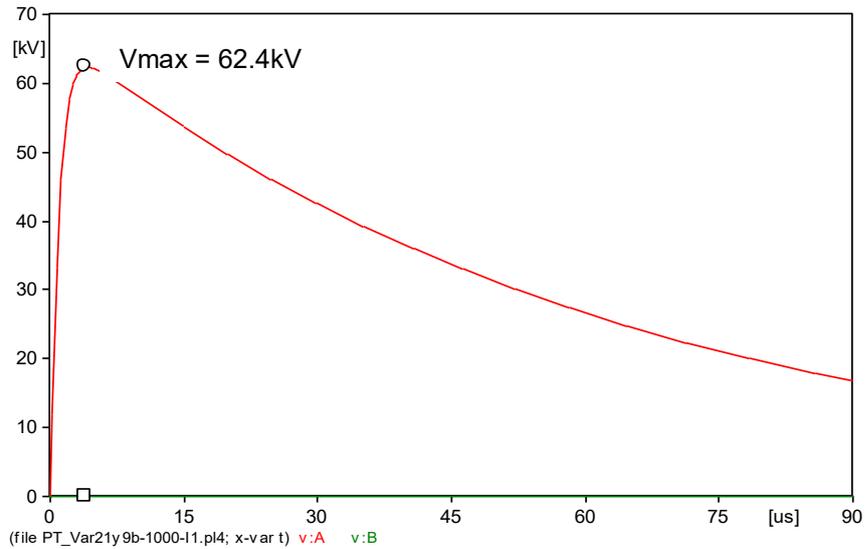


Figura 6.3 c) Tensión máxima en extremo de PT con Varilla de 3,0 m en suelo de 2 capas, corriente de impulso rápido 10 kA. Modelo de PT aproximado a LT distribuido en dos capas.

Segundo caso: Electrodo con Conductor Horizontal ramificado

Caso 2a: Capa Superior de Baja Resistividad y Capa Inferior de Alta Resistividad

Esta condición de suelo puede representar la situación de época de lluvias en la Sierra (verano), cuando el rayo acompaña a la lluvia; en que la capa superior húmeda podría tener mas baja Resistividad que la capa inferior seca. En esta aplicación el electrodo de PT de la Fig. 6.4, conformado por un conductor de 6.42 mm de diámetro, 12 m de longitud total, en disposición horizontal de 4 ramales ortogonales de 3 m cada uno; instalado en un suelo de dos capas; la capa 1 es de $\rho_{soil} = 50 \Omega m$ y la capa 2 de $\rho_{soil} = 1000 \Omega m$. Como se verá en los cálculos, esta configuración ramificada es muy eficiente para disipar la corriente y reducir la tensión en el punto de inyección.

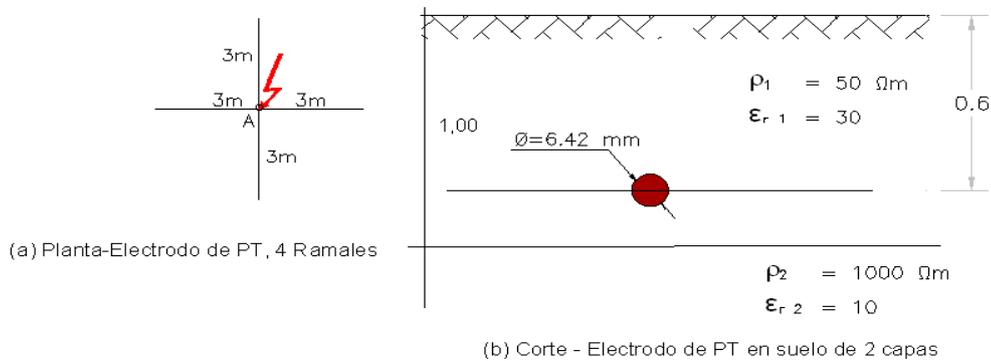
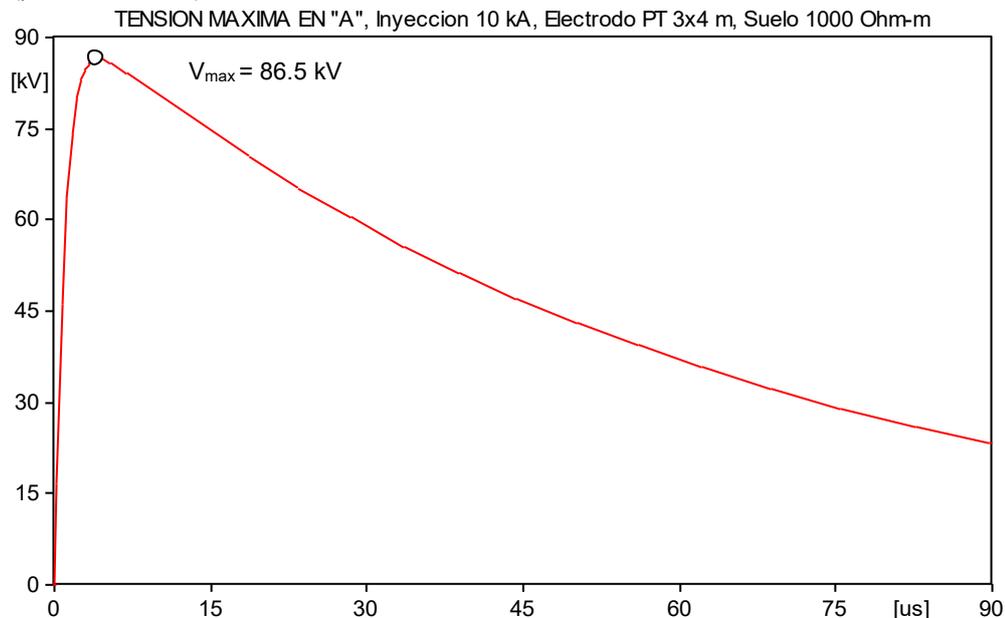
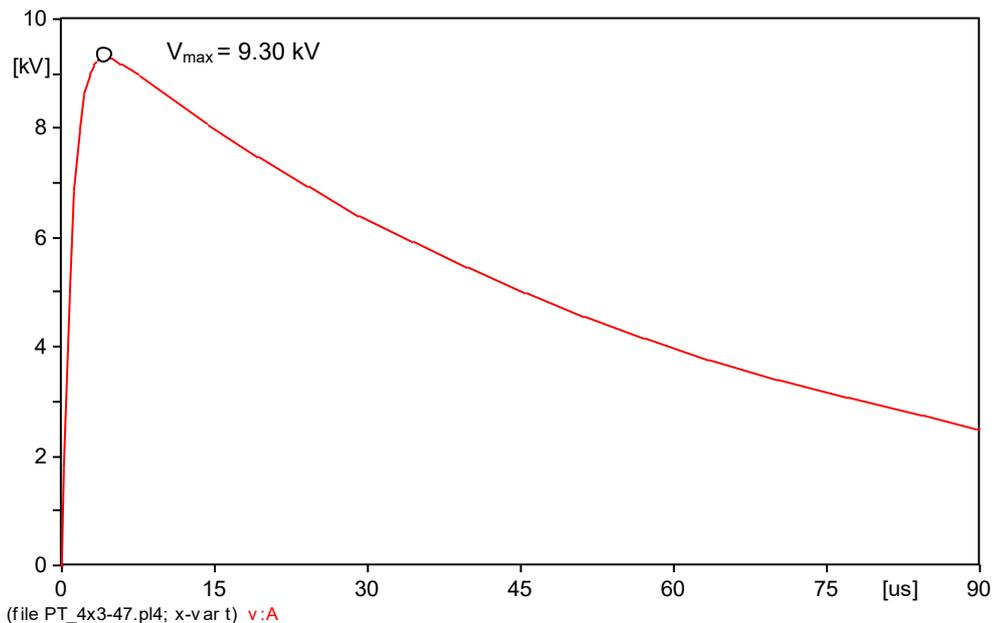


Figura 6.4 Configuración de PT con electrodo de conductor horizontal de cuatro ramales en suelo de dos capas.

En la simulación se inyecta la misma corriente del caso 1, la Tensión máxima en el punto de inyección se ha efectuado para dos eventos: **El primer evento** para suelo de 1000 Ohm-m, los resultados se muestran en la Fig. 6.5 a) y **el segundo evento** para suelo de resistividad equivalente de 47.8 Ohm-m, los resultados se muestran en la Fig. 6.5 b). De las Figs. 6.5 a) y 6.5 b) se observa que la tensión transitoria máxima en el punto de inyección de la PT, el primero ($\rho = 1000 \Omega\text{-m}$) es aproximadamente 9.3 veces mayor que el segundo ($\rho = 47.6 \Omega\text{-m}$).



a) Tensión de impulso en punto de inyección de la PT, con electrodo horizontal ramificado de 4x3m, en suelo de 1000 Ohm-m.



b) Tensión de impulso en PT con electrodo 4x3 m, en suelo de 2 capas y con resistividad equivalente 48 ohm-m.

Figura 6.5 a) y b) Tensiones de impulso en PT con electrodo de 4 ramales ortogonales en suelo de 2 capas, inyección de corriente de 10 kA. Modelo de PT aproximado a LT.

Se analizó también la respuesta transitoria de la PT para un **Tercer evento**, considerando el electrodo en configuración horizontal simple de 12 m (longitud total, un ramal), instalado en suelo de $\rho = 1000 \Omega\text{-m}$ (caso critico) a la misma profundidad que los casos anteriores; para la simulación se inyectó en un extremo de la PT, la misma corriente del caso 1; el resultado obtenido muestra que la tensión de impulso máxima en el punto de inyección, es 2.3 veces mayor que si el electrodo tendría la configuración de 4 ramales de la Fig. 6.4.

Caso 2b: Capa Superior de Alta Resistividad y Capa Inferior de Baja Resistividad

Si efectuamos la simulación para el mismo electrodo con suelos de capas invertidas, será idéntico al caso 2 a) y b), los resultados están mostrados en la Fig. 6.5 a) y b); debido a que la capa de baja Resistividad es aproximadamente igual a la Resistividad equivalente.

Discusión de Resultados

- Los resultados de los análisis efectuados para electrodos de la misma longitud de los Casos 1 y 2, muestran que las tensiones de impulso máximo para la PT con varilla, respecto al electrodo horizontal ramificado; en suelos con resistividad de 1000 Ohm-m es 9.8 veces y para resistividad equivalente de 47.6 Ohm-m es 4.9 veces.
- En aplicaciones de electrodos de PT, es recomendable usar varillas en formación cerrada en suelos de baja resistividad, mientras que en suelos de alta resistividad se debe utilizar electrodos horizontales en configuraciones ramificadas.
- Asimismo, en suelos estratificados es mas conveniente usar electrodos horizontales en configuraciones ramificadas y otras configuraciones que se ajusten a la aplicación específica: las varillas se puede usar en complemento instalado en los puntos de inyección, para reducir la tensión pulsante.

6.3 Dimensionamiento del electrodo de Puesta a Tierra Aplicando el Criterio de Longitud Eficaz

La longitud eficaz del electrodo conductor de PT bajo transitorios rápidos como el rayo, ha sido analizada en las secciones 4.5 y 4.6; este parámetro es muy importante para el diseño de la PT, permite regular la longitud del electrodo asegurando una alta eficiencia de conducción y reducción de las sobretensiones ante las corrientes de impulso; además, permite un ahorro considerable en los costos del material e instalación.

En los análisis desarrollados en el Capítulo 4, se han estudiado dos casos; en el **Primer Caso**, se analizó el comportamiento de la impedancia de PT en función de la longitud y con relación a las bajas y altas frecuencias, en el **Segundo Caso**, se analizó el comportamiento

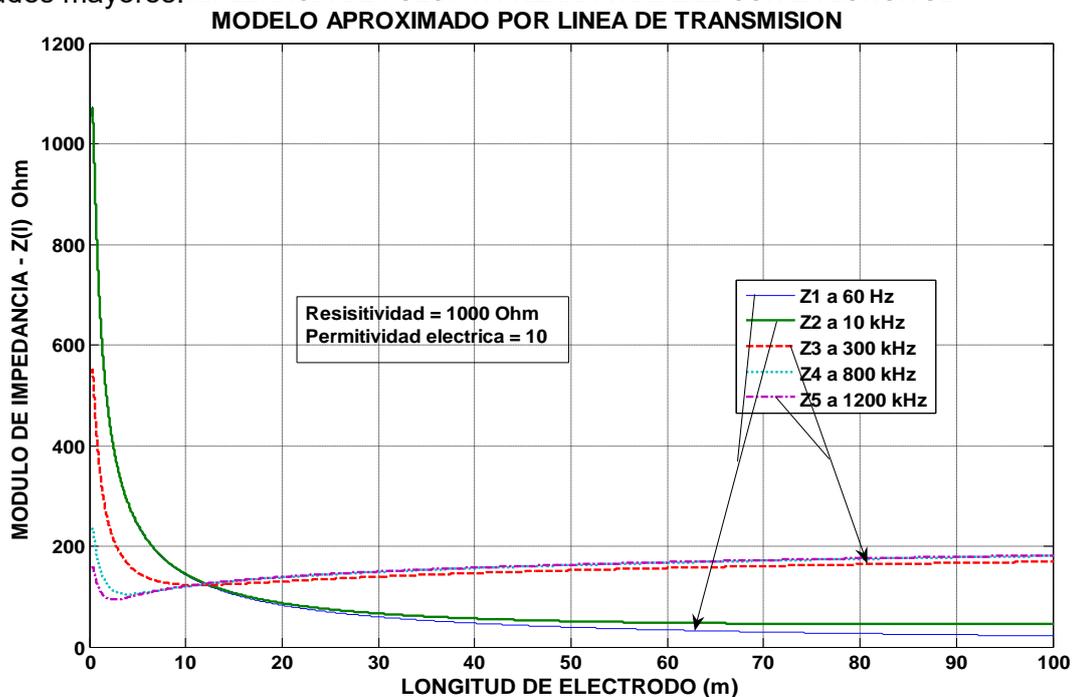
de la Impedancia de PT en el dominio de bajas y altas frecuencias, y relacionadas a la longitud del electrodo.

El cálculo de la Impedancia de PT se ha efectuado utilizando las ecuaciones del Anexo A1, cuyo valor es función de la Impedancia Característica (Z_c) y el coeficiente de propagación (γ) del circuito.

En la perspectiva de obtener el dimensionamiento de la longitud del electrodo de PT mejorado, se aplicó el criterio de la “Longitud Eficaz” para analizar el comportamiento del Módulo de la Impedancia Dinámica en función de la longitud y la frecuencia, para electrodos horizontales de 6.42 mm de diámetro enterrado a 0.60 m, en suelo con Resistividad de 1000 Ohm-m y Permitividad eléctrica relativa de 10; para longitudes de 30 m a 60 m, comprendidos en el rango de la longitud eficaz, calculado en el Capítulo 4. Los resultados se muestran en la Figura 6.6 a), b) y c).

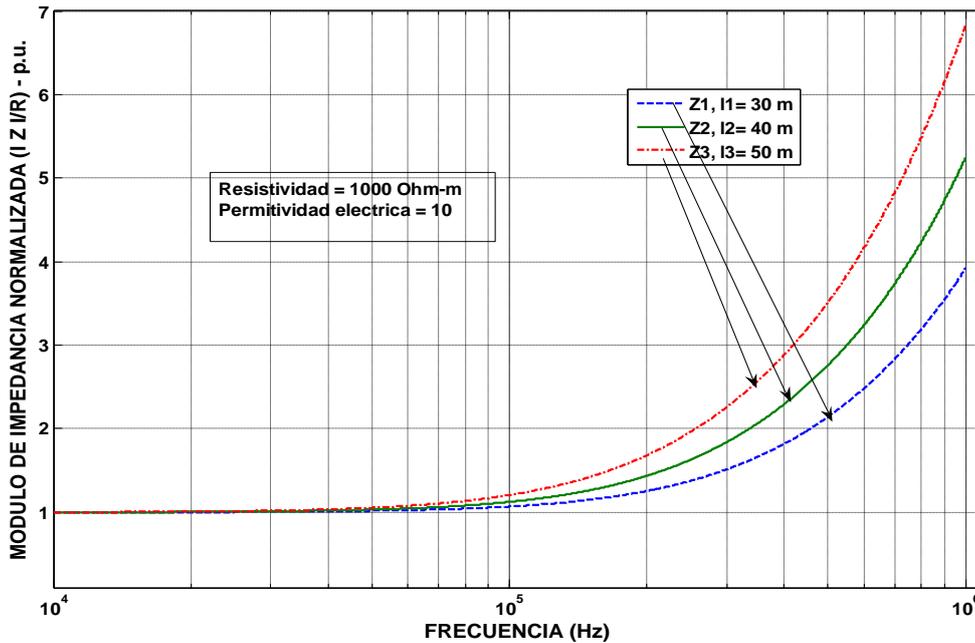
En la fig. 6.6 a) se muestra la variación de la Impedancia en función de la longitud, con valores en estado estable para baja frecuencia menores que para alta frecuencia; los valores de la Longitud Eficaz están comprendidos en el rango de 30 a 60 m.

En la fig 6.6 b) se muestra la variación del Módulo normalizado de la Impedancia respecto a la resistencia en baja frecuencia en el dominio de la frecuencia, su valor se incrementa rápidamente en alta frecuencia por encima de 100 kHz y toma mayores valores para longitudes mayores. **IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA VARIABLE CON LA LONGITUD**

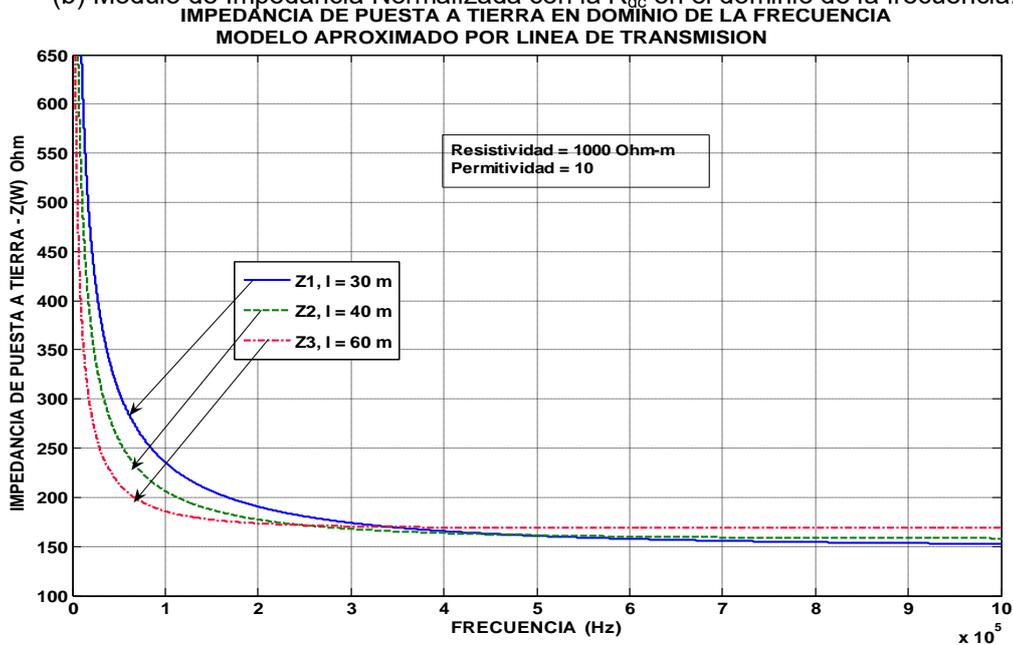


(a) Impedancia de PT vs longitud en baja y alta frecuencia.

**IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA VARIABLE CON LA FRECUENCIA
Y REGULADO POR LA LONGITUD EFICAZ**



(b) Módulo de Impedancia Normalizada con la R_{dc} en el dominio de la frecuencia.



(c) Módulo de Impedancia en el dominio de la frecuencia.

Figura 6.6 a), b), c) Variación de la Impedancia de PT con electrodo horizontal, en función de la longitud y frecuencia, en suelo de 1000 Ohm-m, regulado para la Longitud Eficaz.

En la fig 6.6 c) se observa que el valor del Módulo de la Impedancia en el dominio de la frecuencia, se reduce de valores altos, cercanos a 1 Hz hasta el valor de estado estable en aproximadamente 300 kHz en el margen de la Longitud Eficaz; para mayores frecuencias dentro del rango de la frecuencia de rayos, el valor es constante; corroborándose que la Longitud Eficaz para Resistividades de 1000 Ω -m está comprendida entre 30 m a 60 m.

La respuesta dinámica de la PT a las corrientes de impulso tipo rayo se ha obtenido de simulaciones con el ATP; el cálculo de las Tensiones de impulso máximo en el punto de inyección se efectuó para electrodos de cobre de 6.42mm ϕ , longitud de 40 m y 60 m (rango de longitud eficaz), bajo las mismas condiciones del suelo ($\rho = 1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) e inyección en un extremo una Onda de Corriente de 10 kA y forma de la Figura 4.5.

Los resultados de la simulación de la Tensión dinámica en la PT, se ha graficado en la Figura 6.7a) y 6.7 b), donde se observa que la relación de la Tensión pico máxima del electrodo de 40 m respecto al de 60 m es de 1.35 veces mayor. Aplicando la Definición 3 de Longitud Eficaz del punto 4.5 a) Capítulo 4, se confirma que la variación de la longitud del electrodo no ocasionan una diferencia de tensiones muy grande, cuando el electrodo se ha dimensionado en el rango de la Longitud Eficaz.

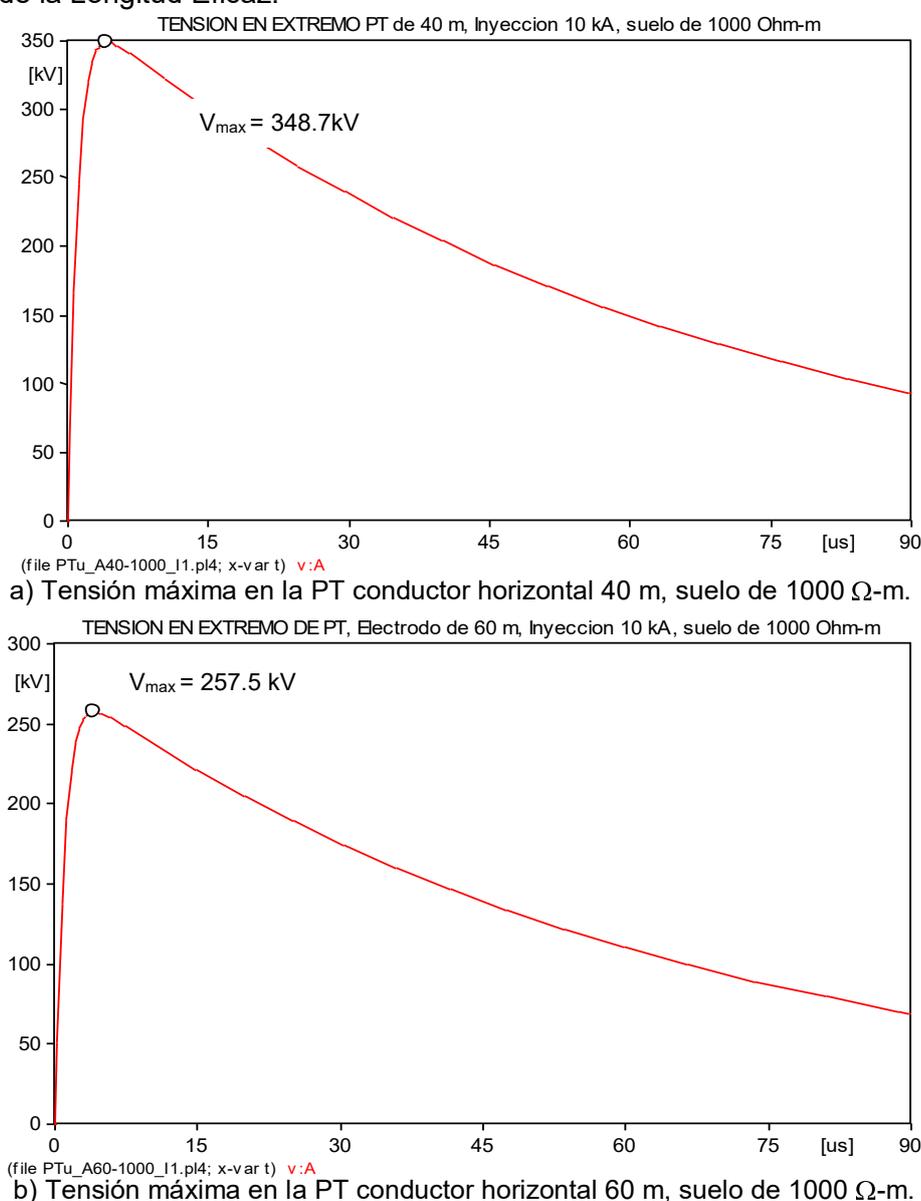


Figura 6.7 a) y b) Tensiones máximas en electrodo de PT horizontal para suelo de 1000 $\Omega\cdot\text{m}$, inyección de corriente de 10 kA. Modelo de PT aproximado a LT.

6.4 Dimensionamiento de Puestas a Tierra para Torres de Líneas de Transmisión

6.4.1 Criterios para el Dimensionamiento

En el Perú, la normatividad relacionada a la Puesta a Tierra, no toma en cuenta el comportamiento transitorio en altas frecuencias tipo Rayo; razón por la cual las estadísticas de fallas por efecto del Rayo, muestran que aproximadamente entre el 20 y 30% de las fallas en las Líneas de Transmisión del SEIN, son por descargas atmosféricas. Este fenómeno es crítico, por lo que amerita el análisis de las PT en respuesta transitoria a corrientes de Impulso de Rayo; examinando las tasas de salida de las LE del SEIN, se ha detectado que la LT Aguaytia-Tingo María-Vizcarra y la LT Mantaro-Cotaruse-Socabaya, ambas de 220 kV, tienen las más altas.

El valor de la impedancia de Impulso de la PT en las estructuras de las Líneas de Transmisión es un factor fundamental a tener presente para el diseño de Ingeniería, especialmente cuando se espera que ésta sea un medio adecuado para dispersar las corrientes de Rayo sin falla inversa en el aislamiento de los conductores. El diseño de la PT con respuesta a alta frecuencia debe limitar las elevaciones de potencial próximos a la falla, de modo que al despejar la falla en muy corto tiempo, se reduzca las probabilidades de lesiones o los daños al sistema eléctrico; a frecuencia intermedia de corrientes de falla, estas se regulan con mínima sobretensión en las fases sanas.

El aislamiento de una LT se diseña para que soporte todas las sobretensiones internas, pero no para que soporten todas las sobretensiones externas (impulsos de tensión producidos por descargas de rayo), ya que sería inviable económicamente.

Cuando la impedancia de la PT de las torres de transmisión es alta y no se obtiene un medio propicio para la dispersión de las corrientes del rayo, puede ocasionar una reflexión parcial de la onda incidente del rayo; aumentando el potencial entre la ménsula o brazo de la torre y el conductor de fase, dando origen al fenómeno conocido como flameo o contorneo inverso, o *"backflashover"*.

En el diseño de PT con respuesta dinámica o transitoria para corrientes de impulso tipo Rayo, es importante tener en cuenta, en primer lugar el efecto de la impedancia transitoria o de impulso de este en la respuesta a alta frecuencia; la otra condición es lograr una Resistencia en estado estacionario pequeña. En soluciones específicas se debe considerar también las equipotencialidades tolerables para la seguridad de las personas y los equipos en los entornos de las Estructuras.

Uno de los métodos eficaces para reducir la Impedancia de PT de las torres de transmisión, es utilizar conductores horizontales (contrapesos) como en la Lamina 4 del Anexo D, la longitud total del contrapeso principal requerido se subdivide en segmentos o ramificaciones que van conectados a las bases metálicas de las torres, con idéntica estrategia de contacto con el suelo, propiciando longitudes eficaces y caminos para la dispersión eficaz de las corrientes.

6.4.2 Impedancia de Impulso e Impedancia Dinámica

Es el valor de la impedancia que existe entre el punto de inyección de la corriente de impulso y un punto de un electrodo dispersor de PT localizado a una distancia de funcionamiento eficaz, que no interfiere con el desempeño de la PT; dicha relación se cumple punto a punto e instante a instante entre las ondas positivas y negativas de tensión y de corriente en el electrodo o conductor de puesta a tierra. El valor de la Impedancia al impulso (Z_s) es el valor de la Impedancia dinámica en tiempo $t=0+$; una expresión para la

impedancia al impulso es: $Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}$

En la sección 6.1.3 se analizó el comportamiento de la Impedancia Dinámica de PT para un electrodo de 50 m (en rango de la longitud eficaz), en la figura 6.1 se observa que el valor de la Impedancia de Impulso es mayor para Resistividades altas (116,14 Ω) y menor para Resistividades bajas (67,14 Ω); además, se determinó que la Z_s tiene relación inversa con la Permitividad y la Resistencia estacionaria tiene relación directa con la Resistividad del suelo.

En la Figura 6.1 se observa que la Impedancia de Impulso para suelos de altas Resistividades se reduce mas rápidamente y logra su estado estacionario aproximadamente a los 20 μ S, mientras que para bajas Resistividades su estado estacionario se logra aproximadamente a los 100 μ S.

Es importante tener en cuenta que cuando la Resistividad del suelo es muy alta, la resistencia de dispersión puede ser mayor que la Impedancia de Impulso; el propósito de un buen diseño mediante contrapesos es lograr que la Resistencia de PT sea lo suficientemente inferior a la impedancia inicial o de impulso, este se logra seleccionando una longitud del conductor óptima de acuerdo con las propiedades eléctricas del suelo.

6.4.3 Configuraciones Típicas de electrodos de Puesta a Tierra

En las aplicaciones de ingeniería, las PT cumplen una función importante en la protección de las instalaciones eléctricas, por lo que en el diseño se debe considerar “El Análisis de la Respuesta Transitoria de la Puesta a Tierra ante Corrientes de Impulso tipo Rayo” y las

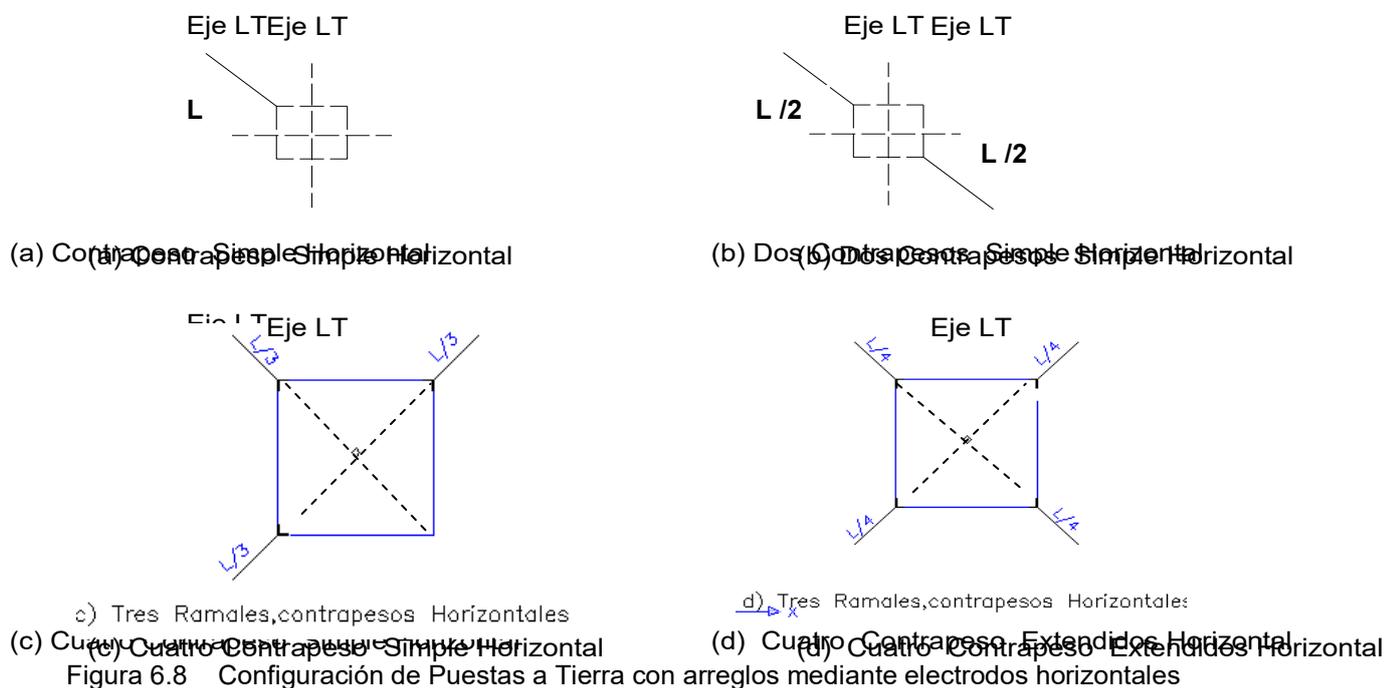
prácticas establecidas en normas internacionales, tales como en la IEC 62305-2 (Riesgos), IEC 62305-5 (Servicios), Norma Técnica Española (UNE 21 185), entre otras; así como, los análisis y recomendaciones del presente trabajo.

En el diseño de las PT, se debe conocer las características eléctricas del suelo (Resistividad, ρ_h , Humedad, Permitividad Relativa), porque estos parámetros determinan la impedancia de impulso y su valor de estado estable.

Después de haberse obtenido los valores de la Resistividad del suelo mediante pruebas de campaña para los suelos al pie de las torres de la LT, se elabora el proyecto de aterramiento para configuraciones típicas de PT utilizadas en ingeniería; tales como, contrapesos longitudinales y/o con ramales, considerando que las rutas de LT tienen geología estable y suelo compacto que aseguran la adecuada cimentación; así como, la servidumbre que limita el espacio. Este tipo de suelos tienen características eléctricas de alta Resistividad, muy frecuente para las LT en el Perú.

CONFIGURACION DE ELECTRODOS EN LA TIERRA

Las configuraciones típicas de los arreglos de las PT que se muestran en la Figura 6.8, las dimensiones son adaptadas a las necesidades del proyecto.



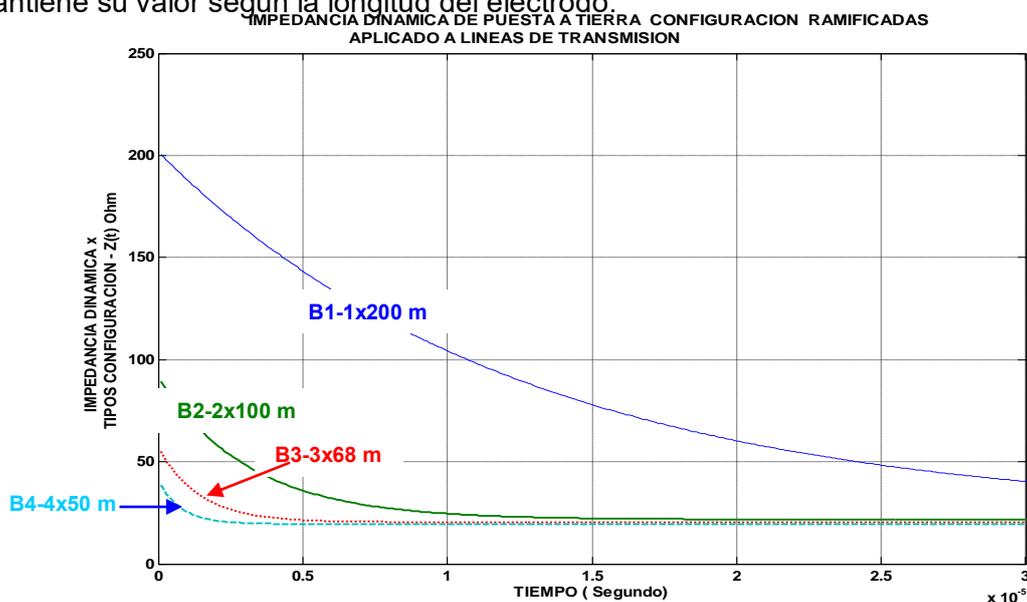
Para la selección de la Impedancia de Impulso de la PT apropiada, se analizó el comportamiento de cuatro configuraciones en distribución ramificada, para la distribución deberá tomar en cuenta la reducción al máximo del efecto de acoplamiento entre ramales. En el análisis se consideró un electrodo con conductor horizontal de longitud total de 200 m y

6.42 mm ϕ , subdivididos en ramales como en la figura 6.8 a), b), c), d); enterrados a 0,6 m en suelos de alta Resistividad de 1000 Ω -m y 2000 Ω -m, permitividad eléctrica relativa 10 para ambos; en la Tabla N° 6.2 se consigna el valor de los parámetros de PT de las configuraciones indicadas.

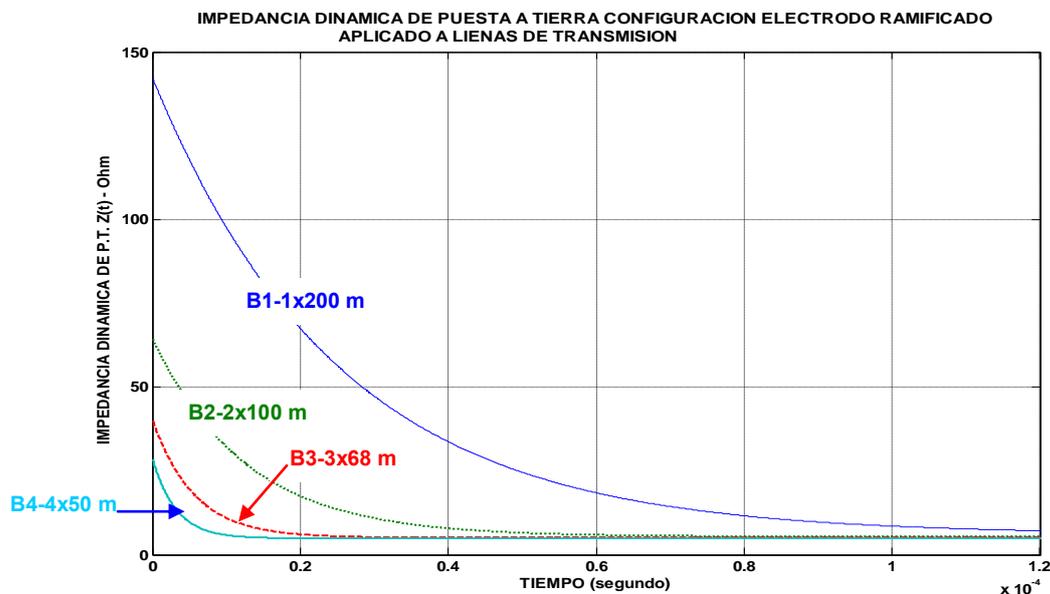
Tabla 6.2 Parámetros de Puesta a Tierra con contrapesos Horizontales ramificados en suelos de alta Resistividad.

Electrodo PT		Ramal - Longitud (m)	Características del Suelo		Impedancia (Ω) de PT	
Nº Ramales	Tipo		Resistividad (Ω -m)	Permitividad Relativa	Resistencia Equivalente (Ohm)	Imped. de Impulso-Zs (Ohm)
1	B1	200	1000	10	6.18	147.50
2	B2	100			5.63	67.15
3	B3	66.67			5.31	42.20
4	B4	50			5.08	30.08
1	B1	200	2000	10	12.37	147.50
2	B2	100			11.26	67.15
3	B3	66.67			10.62	42.20
4	B4	50			10.16	30.08

Se ha calculado la Impedancia Dinámica de la PT en el dominio del tiempo para las 4 configuraciones y para cada tipo de suelo, utilizando un programa de cálculo en MATLAB desarrollado por el autor. Los resultados se han graficado en la Figura 6.9 a),b), donde se observa que la ramificación del electrodo permite reducir sustancialmente la Impedancia de Impulso y controlar las tensiones de impulso en la PT ante las corrientes de rayo; además, al utilizar configuraciones ortogonales entre ellos, permite anular o reducir el efecto de acoplamiento entre los ramales. La Resistencia de dispersión o de estado estacionario de la PT mantiene su valor según la longitud del electrodo.



a) Puestas a Tierra con ramificaciones en suelo de 2000 Ohm-m



b) Puestas a Tierra con ramificaciones en suelo de 1000 Ohm-m

Figura 6.9 a), b) Impedancia Dinámica de PT mediante contrapesos en configuraciones ramificadas.

La solución al problema de protección del aislamiento de las LE, requiere una mejora en el dimensionamiento de las Puestas a Tierra y otras mejoras complementarias, cuya respuesta sea coordinada con el aislamiento de las Líneas Eléctricas.

6.5 Parámetros de la Puesta a Tierra utilizados para Simulaciones de Análisis Transitorios

6.5.1 Casos a ser Analizados

En aplicación al dimensionamiento de PT con respuesta al impulso de corrientes de Rayo, se analizarán tres casos típicos que sirvan de orientación en el diseño de PT para la protección del aislamiento de Líneas Eléctricas:

Caso 1: Puestas a Tierra para torres de Transmisión de 500 kV

Caso 2: Puestas a Tierra para torres de Transmisión de 220 kV

Caso 3: Puestas a Tierra para torres de Transmisión de 138 kV

6.5.2 Parámetros de los elementos de aterramiento de las Torres de Transmisión

En los párrafos siguientes se han calculado las impedancias de onda de los componentes del aterramiento de la torres de las LT, con respuesta transitoria a Corrientes de Impulso en alta frecuencia, conformado por: Impedancia del Cable de Guarda (1 o 2), Impedancia de Onda de las Torres e Impedancias de pie de torre o PT; a continuación se calculará las impedancias de los elementos de aterramiento de las LT de 500 kV, 220kV y 138 kV (3 casos propuestos).

6.5.2.1 Geometría de la Torres y su Impedancia

Se ha seleccionado la estructura típica o básica para cada nivel de Tensión de Transmisión de un proyecto de aplicación en el Perú, estas son torres metálicas de celosía en perfiles angulares de acero galvanizado en caliente de cuatro patas.

Caso 1: Línea de Transmisión 500 kV

La estructura corresponde a la LT 500 kV NEA-NOA (Argentina), de topografía similar a la LT 500 kV Caraveli-Montalvo (Arequipa-Moquegua, Perú), en actual desarrollo en la Región Sur del País, ubicado en altitud de 1200 a 2600 msnm, con las características siguientes:

a) Descripción de la configuración de las estructuras.

Disposición de conductores horizontal, simple circuito con cuatro conductores por fase, preparado para llevar dos cables de guarda; las estructuras seleccionadas del tipo "S1" suspensión tangente de 0 a 1° y tipo "S2" para suspensión reforzada de 0 a 6°, Anexo D-Lámina N° 01.

b) Impedancia Transitoria de las torres

Utilizando las ecuaciones para el cálculo de la Impedancia característica de las torres de transmisión de [2] y el modelado experimental de [73], se ha determinado el valor de la Impedancia de Impulso de la torre como constante de 190 Ohm.

Caso 2: Línea de Transmisión 220 kV, Vizcarra-Antamina

Desarrollada en la sierra norte en la Región de Ancash a una altitud de 3800 a 4200 msnm, para el suministro de energía eléctrica de la Minera Antamina, tiene las características siguientes:

a) Descripción de la configuración de las estructuras

Disposición de conductores tipo "bolilla", simple circuito, preparado para llevar dos cables de guarda; las estructuras seleccionadas son el tipo "22A1.2T" de suspensión tangente de 0 a 1° y tipo "22C1.2T" angular/anclaje de 0 a 30°, Anexo D-Lámina N° 02.

b) Impedancia transitoria de las torres

En forma similar al Caso 1, usando las ecuaciones de [2] y el modelado experimental de [73], se ha determinado el valor de la impedancia característica o de impulso de la torre como constante de 184 Ohm.

Caso 3: Línea de Transmisión 138 kV Huallanca-Sihuas-Tayabamba

Desarrollado en la sierra de Ancash y La Libertad a una altitud de 2000 a 4100 msnm, para el suministro de energía eléctrica a la población de las Provincias de Sihuas y Pomabamba en Departamento de Ancash; a la Población y Zona Minera de la Provincia de Patatz del Departamento de La Libertad, tiene las siguientes características:

a) **Descripción de la configuración de las estructuras**, disposición de conductores tipo “bolilla”, simple circuito, con un cable de guarda; las estructuras son tipo “S1” suspensión tangente de 0 a 1° y tipo “S2” suspensión reforzada de 0 a 6°, Anexo D-Lamina N° 03.

b) Impedancia transitoria de las torres

Utilizando la metodología del caso 1, aplicando las ecuaciones de [2] y modelado experimentales de [73]; se ha determinado el valor de la impedancia de impulso de la torre como constante de 180 Ohm.

6.5.2.2 Impedancia de cables de Guarda

Dependiendo del número y disposición de los CG sobre la torre, para configuraciones de dos y un cable de guarda, aplicando los procedimientos de [2] se ha calculado el valor de la impedancia equivalente del cable de guarda para cada caso, obteniendo los valores siguientes:

- Caso 1-Línea de Transmisión 500 kV, con 2 cables de guarda : 240 Ohm
- Caso 2-Línea de Transmisión 220 kV, con 2 cables de guarda : 280 Ohm
- Caso 3- Línea de Transmisión 138 kV, con 1 cable de guarda : 400 Ohm.

En la Tabla 6.3 se resumen los valores de las impedancias de aterramiento a ser utilizados para las simulaciones para el cálculo de las sobretensiones por caída de corrientes de impulso rápido tipo rayo en la cima de las Torres, en la cadena de Aisladores y en pie de torre, para cada una de los casos y subcasos a ser analizados.

Tabla 6.3 Parámetros de Cables de Guarda y Torres metálicas de Líneas de Transmisión

Tensión (kV)	Long Cadena Aisladores(m)	Impedancia de Torre- Z_t (Ohm)	Cable de Guarda		Impedancia de cable de guarda- Z_{CG} (Ohm)
			Numero	Diámetro (mm)	
500	4,30	190	2	10,52	240
220	3,50	184	2	9,52	280
138	2,15	180	1	9,52	400

6.5.3 Impedancia de Puesta a Tierra Dinámica

Se ha excluido el uso de Puestas a Tierra con electrodos de varilla vertical, porque concentran el potencial en un solo punto del suelo y por que su conexión en paralelo no es eficiente para lograr bajas resistencias (el máximo óptimo es 4 varillas); además, debido al suelo en zonas de la sierra (suelo de grava y rocas) y en selva (grava y limo) a lo largo de las rutas de las L.T. no se puede hacer pozos de PT.

En las aplicaciones de PT para protección de las L.T. ante las descargas atmosféricas, se analizó con armados de PT conformado por conductores horizontales simple y en configuraciones compuestas, seleccionados según las características del suelo y los niveles de corriente de descarga de rayo más probables. Se consideró que las PT se instalarán en zonas donde la Resistividad del suelo varía entre 500 a 3000 Ohm-m; para valores más elevados se considera aplicaciones especiales, en cuyo caso se debe hacer la prospección y los análisis específicos del suelo (Resistividad, Permitividad Eléctrica, Humedad, PH, Temperatura, etc.).

En este trabajo se ha considerado que la resistividad del suelo promedio es de 2000 Ohm-m, Permitividad eléctrica relativa de 10 y Permeabilidad magnética relativa de 1. Se ha previsto obtener Resistencias de PT en estado estacionario de valores entre 15 Ω y 25 Ω con los armados de las configuraciones del Anexo D-Lamina N° 04; además, se busca que las Impedancias de Impulso sean reducidas y con buena dispersión de corriente en tiempos muy cortos, con la finalidad de no superar el Nivel Básico de Aislamiento de las Líneas Eléctricas.

La evaluación se efectuó para los Casos 1, 2 y 3 de 6.5.1; para condiciones más desfavorables, con parámetros de PT sin el efecto de ionización. En la sección 6.6 se calculó las impedancias de impulso para varias configuraciones, con electrodos de una longitud total de 50 m, 60 m, 100 m, 120 m y 200 m; se ha seleccionado las configuraciones de PT: tipo B4-4x25m (4 ramales con 25 m cada uno), tipo B4-4x30 m ó tipo B4-4x50 m (4 ramales de 30 o 50 m cada uno), tipo B2-2x25m (2 ramales con 25 m cada uno) y tipo B2-2x30 m (2 ramales de 30 m cada uno).

El cálculo de las tensiones y corrientes distribuidas se efectuó en la vía conjunta de tránsito de la corriente de rayo desde cima de la Torre-Estructura-Pie de torre, con derivación paralelo a la Cadena de Aisladores; y en paralelo al cable de guarda (CG), según la Figura 6.11.

6.5.4 Fuentes de Corriente de Impulso

Las estadísticas de la distribución de corriente de Rayo que ocasiona falla de blindaje está comprendido entre 2 a 200 kA, para el cálculo de la probabilidad acumulativa hasta 31 kA, se aplica la ecuación (8) de la Std IEEE 1243. Por falta de registros históricos de corrientes de rayo, se ha revisado tratados sobre diseño del aislamiento de L.T. en la Sierra del Perú y se ha obtenido valores pico promedio comprendidos entre 20 kA y 30kA. Para las simulaciones de aplicación práctica, se ha utilizado corrientes de impulso tipo Rayo representados por las ecuaciones siguientes.

$$I(t) = 20000 * (e^{-15500*t} - e^{-999900*t}) A \quad (6.1)$$

$$I(t) = 30000 * (e^{-15500*t} - e^{-999900*t}) A \quad (6.2)$$

6.5.5 Tensión Crítica del Aislamiento

La Tensión Crítica de aislamiento eléctrico para cada uno de los Sistemas Eléctricos está dado por la estándar IEEE 1243, en la Figura 6.10, donde se muestra la Curva de la Tensión Crítica Disruptiva-V(t) vs Tiempo; donde V(t) esta dado en kV y el Tiempo en μs y cada curva corresponde a la distancia del aislamiento (longitud del aislador) ; cuando se supera el valor de la Tensión Crítica Disruptiva, se produce la descarga eléctrica de falla del aislamiento.

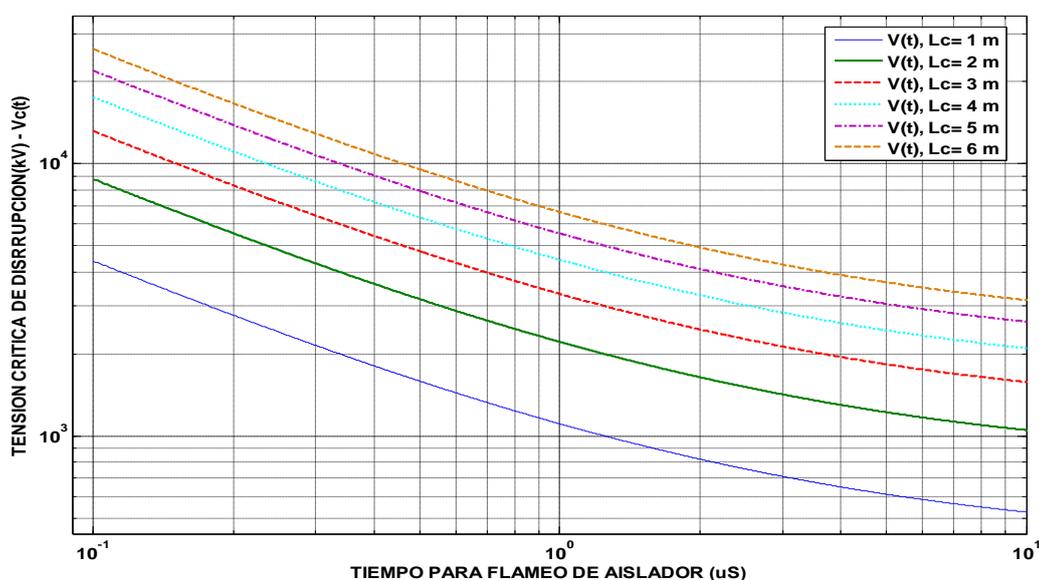


Figura 6.10 Tensión Crítica de Disrupción de Cadena de Aisladores-Curva V(t) vs t, Std IEEE 1243.

6.6 Simulaciones para el Cálculo de la Respuesta Transitoria de la Puesta a Tierra a Corriente de Rayos con uso del ATP

El cálculo de la respuesta transitoria de la PT a las Corrientes de Impulso tipo Rayo, ha sido efectuado mediante simulaciones con el Programa ATP, el Modelado para uso del Programa ha configurado los componentes conformados por: Fuente de Corriente, Impedancias de cable de guarda, impedancia de Torre e impedancia de PT. Para ello se ha utilizado los parámetros de los componentes del sistema de aterramiento de las estructuras de las LT de los casos previstos en 6.5.1, consignados en la Tabla 6.3 y 6.4, según la configuración de la Figura 6.11 para las tres alternativas que se indican:

Alternativa 1 - A1 Simulaciones con aterramiento completo de la torre, la PT conformado por: Impedancia de Cable de Guarda (Z_{CG}), Impedancia de la Torre (Z_T) e Impedancia de Puesta a Tierra (Z_{PT}).

Alternativa 2 - A2 Simulaciones con aterramiento conformado por: Impedancia de la Torre (Z_T) e Impedancia de la PT (Z_{PT}) o Impedancia de PT sola; no se considera la Impedancia del Cable de Guarda (Z_{CG}).

Alternativa 3 - A3 Simulaciones considerando aterramiento con: Impedancia de Cable de Guarda (Z_{CG}) e Impedancia de la Torre (Z_T), la Impedancia Z_{PT} es cero; esta configuración permite determinar el límite de la corriente de Rayo que puede ocasionar Descarga inversa en la Línea Eléctrica.

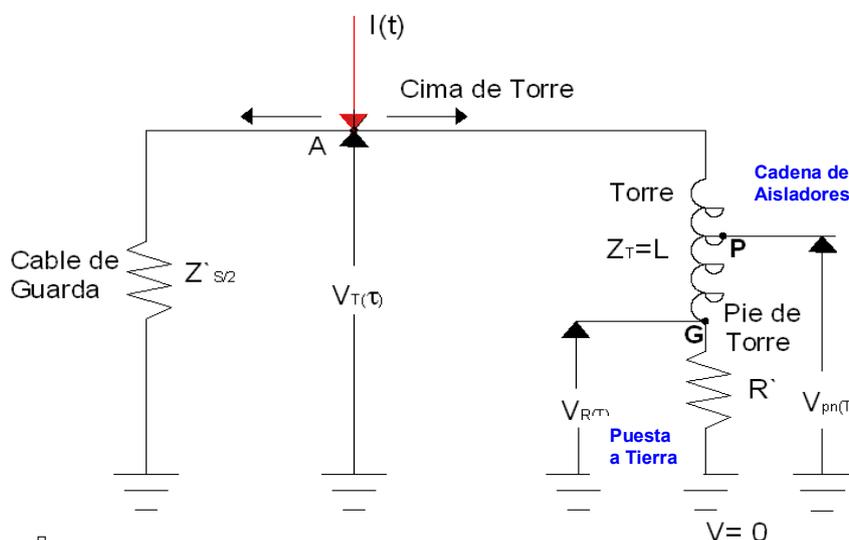


Figura 6.11 Esquema de Circuito del Sistema de Aterramiento de las Torres de Transmisión.

En la Tabla 6.4, se describe el valor de los Parámetros de la PT para respuesta dinámica en Modelo aproximado a LT, utilizados en la simulación del comportamiento Dinámico de la Puesta a Tierra y su influencia en la Protección de sobretensiones ante corrientes de impulso tipo Rayo

Tabla 6.4 Parámetros de los Electrodo Horizontales Ramificados de Puesta a Tierra.

Electrodo PT		Ramal - Longitud (m)	Resistividad Suelo ($\Omega \cdot m$)	PARAMETROS DE IMPEDANCIA de PT/Ramal		
Nº Ramales	Tipo			Resistencia-R (Ohm)	Inductancia L (mH)	Capacitancia C (μF)
4	B4	50	2000	39.02	0.0603	4.53E-03
4	B4	30		59.61	0.0337	2.97E-03
4	B4	25		69.02	0.0272	2.55E-03
2	B2	30		59.61	0.0337	2.97E-03
2	B2	25		69.02	0.0272	2.55E-03

En la Tabla 6.5 se presenta el resultado de los cálculos de respuesta transitoria de las Puestas a Tierra efectuados con el soporte del ATP, para corrientes de impulso tipo rayo con valores promedio de 20 kA y 30 kA; así como, otros valores característicos para la determinación del aislamiento de las Líneas Eléctricas analizadas; las simulaciones se han efectuado para las alternativas predeterminadas A1, A2 y A3 para los tres casos con aplicación a LT 500 kV, LT 220 kV y LT 138 kV.

Tabla 6.5 Resultados de cálculos de Tensiones y Corrientes transitorios por corrientes de impulso tipo rayo en cima y en pie de Torre utilizando el Programa ATP.

Alternativa	Tensión Nominal LT (kV)	Fuente Corriente (kA)	Tipo Puesta Tierra	V _{max.} Cima Torre (kV)	V _{max.} Cad. Aisladores (kV)	V _{max.} en pie Torre (kV)	I _{pico} -CG (kA)	I _{torre} -PT (kA)
A1	500	20	B4-4x25	1369	1334	32.42	11.40	7.03
	500	30	B4-4x25	2053	2000	48,6	17,10	10,60
	500	30	B4-4x25 ¹⁾	2135	2085	259.3	17.78	9.87
	500	30	B4-4x25 ²⁾	982.6	-----	595.0	5.01	22.63
	220	30	B4-4x30	2224	2165	46.81	15.87	11.77
	220	20	B4-4x25	1482	1450	36.22	10.61	7.83
	220	20	B2-2x25	1497	1466	71.41	10.67	7.73
	138	20	B2-2x30	1806	1759	112.12	9.30	9.41
	138	20	B4-4x25¹⁾	1887	1842	266.00	9.36	9.08
	138	20	B4-4x25	1987	1922	49.66	8.85	9.59
	138	30	B4-4x50 ¹⁾	2746	2676	238.70	13.73	13.93
	138	20	B4-4x50 ¹⁾	1822	1775	149.55	9.13	9.31
A2	500	15	B4-4x25	2691	2622	63,76	-----	13,83
	500	20	B4-4x25	3589	3496	85.02	-----	18.44
	500	30	B4-4x25 ³⁾	-----	-----	726.30	----	27.70
	138	30	B4-4x30 ³⁾	-----	-----	641,60	-----	27,70
	138	15	B4-4x30 ³⁾	-----	-----	320,80	-----	13,80
A3	138	5	Z _{PT} = 0	490.3	476.6	----	1.86	2,70
	138	10	Z _{PT} = 0	981.0	953.4	----	3.77	5.45
	138	12	Z _{PT} = 0	1176.0	1144.0	----	4.53	6.54
	138	20	Z _{PT} = 0	1961.0	1907.0	----	10.90	7.54

¹⁾ Los parámetros de PT en Modelo de LT distribuida.

²⁾ Impedancia de Torre como Inductancia de 62 μH e Impedancia de PT modelo LT distribuida.

³⁾ El aterramiento es solo con la Impedancia de PT en Modelo de LT distribuida.

En la tabla 6.5 se presenta los cálculos de las tensiones en la cima de la torre, en la cadena de aisladores y en pie de la torre; así como, la corriente en la torre-PT. La respuesta transitoria de la PT como ondas de Tensiones, ocasionado por caída de ondas de corriente de impulso tipo Rayo en la cima de las torres de las Líneas de Transmisión, se ha simulado usando el ATP para corrientes de 20 kA y 30 kA; el resultado de los cálculos para las tensiones transitorias en cada caso, según configuración topológica de la Figura 6.11, se han graficado en Figura 6.12 (LT 500 kV), Figura 6.13 (LT 220 kV) y Figura 6.14 (LT 138 kV).

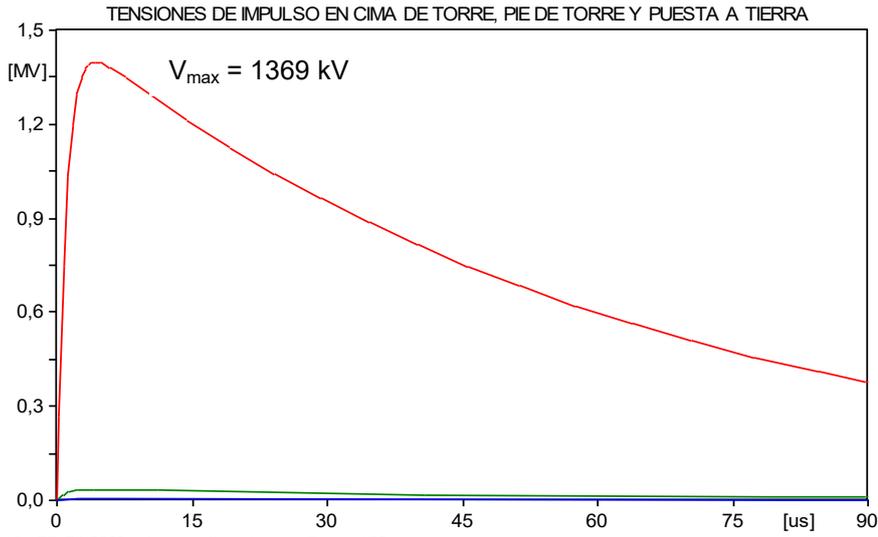


Figura 6.12 Tensión en cima de Torre de Transmisión de 500 kV-Caso 1, inyección de corriente de impulso de 20 kA, para Modelo de PT aproximado a LT en suelo de 2000 Ω..

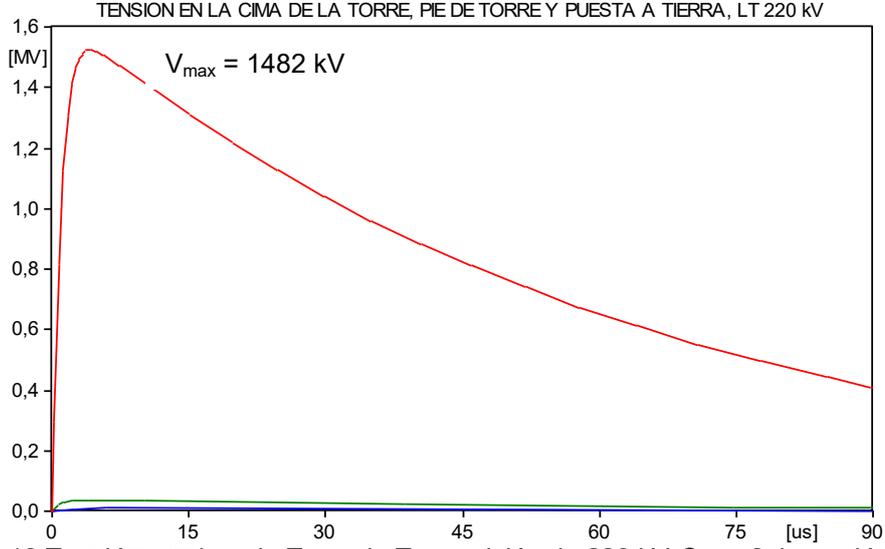


Figura 6.13 Tensión en cima de Torre de Transmisión de 220 kV-Caso 2, inyección de corriente de impulso de 20 kA, para Modelo de PT aproximado a LT en suelo de 2000 Ω-m.

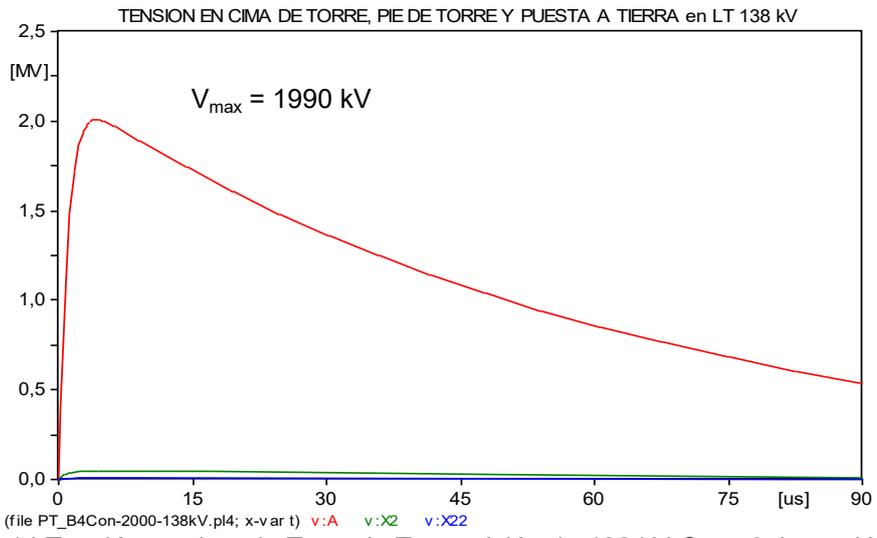


Figura 6.14 Tensión en cima de Torre de Transmisión de 138 kV-Caso 3, inyección de corriente de impulso de 20 kA, para Modelo de PT aproximado a LT, en suelo de 2000 Ω-m.

6.7 Nivel de Aislamiento de las Líneas Eléctricas y Discusión de Resultados

a) Tensión Crítica de Sostenimiento del aislamiento

Se ha calculado las Tensiones Críticas de flameo o “*Critical Flashover*” del aislamiento de las Líneas Eléctricas de 138 kV, 220 kV y 500 kV; según la estándar IEEE 1243 y graficado en la Figura 6.10, los resultados se presentan en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Tensión Crítica de sostenimiento de Disrupción del aislamiento para Líneas Eléctricas, según Std IEEE 1243.

Tensión Nominal de LT (kV)	Longitud Cadena de Aisladores (m)	Altura del CG sobre el suelo(m)	Tiempo de frente de Onda- t_f (μ S)	Tensión Crítica Disruptiva-Vc (kV)
138	2.15	31	6	1141.1
	2.15	31	4	1269.5
	2.15	31	2	1603.2
220	3.50	33	6	2048.2
	3.50	33	4	2278.6
	3.50	33	2	2877.6
500	4.30	38.85	6	2516.4
	4.30	38.85	4	2799.4
	4.30	38.85	2	3535.3

b) Discusión de Resultados

- ✓ En esta Tesis se ha desarrollado el Modelo de PT aproximado a LT con respuesta transitoria a corrientes de impulso tipo rayo, para el análisis de sobretensiones que permita el control y protección del aislamiento, reduciendo los riesgos de falla. Mediante simulaciones se ha determinado que los electrodos de PT que mejor se adaptan está conformado por un conductor horizontal simple y en configuraciones compuestas. La finalidad es obtener impedancias en estado estacionario bajas e impedancias de impulso bajas; así como, lograr la dispersión de las corrientes de impulso en corto tiempo, y evitando sobretensiones que superen el nivel de aislamiento de los aisladores ocasionado descargas inversas o “*Backflashover*”.
- ✓ Un aporte importante de este trabajo es haber determinado y desarrollado una metodología moderna para el diseño de la PT, para la protección de LT cuando éstas operan en zonas de descargas atmosféricas, proponiendo que estas sean dimensionadas bajo el criterio de Respuesta dinámica a Corrientes de Impulso tipo Rayo de alta frecuencia, cuya técnica fue abordado en este capítulo.
- ✓ El análisis de respuesta dinámica de la PT a los transitorios de Rayo de alta frecuencia, se ha desarrollado en la sección 6,6 para las aplicaciones propuestas; los resultados de los cálculos se presenta en la tabla 6.5 y tabla 6.6, determinándose

- que las líneas eléctricas de 500 kV y 220 kV evaluadas, tienen un nivel de aislamiento adecuado, y su aislamiento puede sostener las sobretensiones para corrientes de descarga de Rayo de hasta aproximadamente 40 kA; los niveles de Sobretensiones en la PT debido a esas corrientes de impulso son relativamente bajos.
- ✓ En la respuesta dinámica de la PT para la LT 138 kV que se presenta en la Tabla 6.5, se observa que el nivel de aislamiento es bajo, y no cumple con las condiciones de la tensión crítica de la Tabla 6.6; por lo tanto, las sobre tensiones son sensibles a las corrientes de Rayo y su respuesta va depender de la magnitud de la descarga, esto significa que se presentaran Descargas inversas muy frecuentes, a excepción cuando se considere el efecto beneficioso de la ionización. Para evaluar el limite de corriente de Rayo que puede soportar los aisladores, se ha simulado el comportamiento del aterramiento considerando que la impedancia de la PT es cero y se ha determinado que puede soportar corrientes aproximadamente hasta 15 kA, por encima de este valor está sujeto a Descarga inversa; para corregir esta deficiencia se debe incrementar el aislamiento.
 - ✓ En la simulación no se ha incluido el efecto de la ionización del suelo, si se considera el efecto favorable por la ionización, para suelos de hasta 2000 Ω habrá reducción de las sobretensiones a un valor promedio del 30%, sin embargo en la evaluación de un diseño real, se requiere obtener el perfil de variaciones de Resistividad para desarrollar los diseños adecuados; donde se deberán proponer configuraciones típicas o básicas y configuraciones especiales.
 - ✓ Mediante las simulaciones realizadas, se han identificado las variables de las Puestas a Tierra que inciden en el valor de las sobretensiones y en el comportamiento del aislamiento externo de Líneas de Transmisión, ante las Descargas Atmosféricas tipo Rayo. Además, se ha observado que es importante la modelación de las impedancias de la torre y cable de guarda (CG) para respuesta dinámica acorde al fenómeno físico real; así como, el uso analizar con el uso del Método electro geométrico para el dimensionamiento del blindaje del CG ante las corrientes de impulso de rayo.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE INVESTIGACIONES

7.1 Conclusiones

El autor en el transcurso de la investigación realizada sobre el “Modelado y Análisis de la Respuesta Transitoria de Puestas a Tierra No Extensas”, ha revisado numerosos trabajos de gran calidad relacionada al tópico tratado; pese a su poca divulgación en el ámbito de la Ingeniería de estos temas, que buscan resolver estos problemas. Se abordó la teoría, el modelado matemático, la simulación y su aplicación industrial para proyectos de LT desarrollados en el SEIN del Perú. Para los análisis y cálculos se han utilizado los programas del MATLAB, ATP y convencional.

En nuestro medio y en otras latitudes, las PT en zonas de descargas atmosféricas, todavía no se dimensionan aplicando el modelado de la respuesta dinámica ante las corrientes de Rayo; de allí que el desempeño de las LT frente a las descargas atmosféricas presenta altas tasas de salida.

Mediante el presente trabajo, espero contribuir a mejorar el enfoque de la solución, tanto en el análisis como en el diseño de la PT. Las siguientes conclusiones se presentan como logros alcanzados con el presente trabajo:

1. La deducción del modelo matemático de las Impedancia de las PT de las estructuras de transmisión, constituye una técnica importante para el análisis del desempeño que están sometidas ante los eventos de corriente de impulso de Rayo. Los estudios preliminares desarrollados en el capítulo 3, han servido como herramienta para obtener el modelo que represente el evento electromagnético con la mejor aproximación posible y eficacia de solución. Después de un amplio examen y discriminación de los estudios de la bibliografía técnica sobre el tema, se detectó la carencia de trabajos teóricos con sustento práctico; sin embargo, se ha logrado unificar los criterios e identificado las teorías desarrolladas para el cálculo de Puestas a Tierra simples con respuesta ante transitorios de corrientes de impulso de Rayo; entre ellas destacan la Teoría de Campos Electromagnéticos (TCE), la Teoría de Líneas de Transmisión (TL) y la Teoría de Circuitos (TC).
2. En el análisis comparativo efectuado en la Sección 3.4, se determinó que existe una buena compatibilidad entre los resultados obtenidos con los modelados TCE y TL para igual condición de suelos y electrodos; adicionalmente, se ha obtenido

registros experimentales desarrollados por la EDF, que destacan la compatibilidad teórico-experimental entre los modelados TCE y TL bajo el rigor físico-matemático, y sorprendentemente se ha obtenido una mejor aproximación teórico-experimental del Modelo de PT aproximado a LT; el cual le sustento a esta Tesis.

3. Se ha desarrollado el Modelo de Puesta a Tierra con respuesta transitoria a corrientes de Impulso tipo Rayo aproximado a una Línea de Transmisión (LT), como la opción mas eficaz, con adecuado sustento físico-matemático y razonable precisión en el cálculo; dicho modelo es adecuado, por cuanto posee una estructura analógica y analítica simple que da resultados con buena precisión.
4. Se ha demostrado la aplicabilidad del Modelo de Puesta a Tierra con aproximación a Línea de Transmisión para controlar y/o disminuir las fallas del aislamiento de las Líneas Eléctricas de Potencia ante descargas de corrientes de Rayo, destacando que los estudios comparativos encontrados en la literatura especializada, corresponden a esquemas o armados de aterramientos simples de electrodo único, condición adoptada en este trabajo. Estos electrodos elementales son la base del modelado para el cálculo de la impedancia de Puesta a Tierra para torres de Líneas de Transmisión con aplicaciones específicas.
5. En el capítulo 4 se estudio la PT con respuesta dinámica a corrientes de impulso, constituida por un único electrodo de geometría simple, modelado por aproximación a una Línea de Transmisión, y en el capítulo 6 se estudio configuraciones compuestas que permite reducir la impedancia de impulso en suelos de baja y alta Resistividad, haciendo posible la selección de la PT para torres de LT, regulados por la longitud eficaz del electrodo y logrando eficacia en la protección del aislamiento.
6. La simplicidad del modelado de Puesta a Tierra aproximado a una Línea de Transmisión, se acompaña de la facilidad de su implementación utilizando el ATP, en cuyo ambiente de simulación es posible realizar análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia, donde los parámetros de interés como la sobretensión máxima e Impedancia de Impulso pueden ser fácilmente obtenidos; lo cual cumple con las características de precisión, simplicidad y compatibilidad que debe tener un modelo.
7. El análisis de la respuesta de la Puesta a Tierra a fenómenos transitorios de Impulso como las descargas de Rayos sobre las Líneas Eléctricas, viene asociada a la necesidad de reducir el valor de la impedancia de la Puesta a Tierra en las estructuras, constituyendo una importante técnica para revelar la mejora del desempeño de la Puesta a Tierra cuando es sometida a estos eventos transitorios, evitando Descargas Inversas (*"Backflashover"*) que ocasionan fallas permanentes con salidas de servicio.

8. Además, se han logrado los objetivos secundarios siguientes:
- a) Mediante los cálculos y simulaciones realizados se ha determinado la variación de los parámetros eléctricos de la Puesta a Tierra con el tipo de suelo, Onda de Corriente de Rayo y efecto de la ionización del suelo. El mejoramiento de la Impedancia dinámica de la PT, debe considerarse que para suelos de alta Resistividad la Resistencia en CC es alta, esto puede reducirse mediante ramificaciones del electrodo; en este tipo de suelo, la Permitividad eléctrica es baja y su Impedancia de Impulso es alta, el cual también puede reducirse mediante la ramificación del electrodo.
 - b) Mediante simulaciones se ha visualizado la variación de la Impedancia de la Puesta a Tierra al paso de la corriente de rayo, en el dominio del tiempo y la frecuencia, para diferentes configuraciones. De las simulaciones para el cálculo de la respuesta transitoria de la PT en Tensiones para la cima de la torre y en pie de las estructuras de las LT de 500 kV y 220 kV se recomienda utilizar el B4-4x30; para la LT 138 kV en esta aplicación se recomienda utilizar el B4-4x25, adicionado el efecto beneficioso de la ionización del suelo para resistividad residual del 10%.

7.2 Propuestas de Investigaciones futuras

Con la experiencia adquirida a lo largo de este trabajo, se han avizorado algunos temas de relevancia, los cuales ameritan estudios adicionales para trabajos futuros, citándose:

- Ampliación del modelado de PT aproximado a LT, con la inclusión recomendable de los armados con electrodos de lazo, para el control equipotencial a estos eventos;
- Ampliación del modelado de PT aproximado a LT, con inclusión de suelos estratificados, debido a que es una condición frecuente de los suelos;
- Inclusión de los efectos no lineales relacionados a la ionización del suelo en el Modelado de la Puesta a Tierra con respuesta dinámica;
- Determinación de los límites físicos de aplicación para la disminución de la impedancia de aterramiento, como técnica para mejorar el desempeño de las Líneas Eléctricas sometidas a descargas atmosféricas.
- Investigación de los efectos de la variación de parámetros electromagnéticos del suelo con la frecuencia, ante una respuesta transitoria de la Puesta a Tierra.
- Extensión del Modelado de los otros componentes del Sistema Eléctrico, como las torres o estructuras de Transmisión, cable de guarda, pararrayos; para respuestas a transitorios de Impulso en alta frecuencia.

8 Referencias Bibliográficas

- [1] Vladimir A. Rakov and Martin A. Uman, " Lightning physics and effects", ISBN 521 58327 6 hardback, by The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- [2] J. G. Anderson, "Transmission Line Reference Book 345 kV and above", Electric Power Research Institute", 1975.
- [3] G.W. Brown, E.R. Whitehead "Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding"-Parte II, IEEE Power App. And Systems, Vol. 88, pp 617-626, 1969.
- [4] Angel Rodriguez M., "Estudios de la actividad de rayos en el principado de Andorra", Asociación de Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de Andorra", 2004.
- [5] E. R. Whitehead " Protection of Transmission Lines", Lightning. Vol 2, Edited by R.H. Golde, New York, Academic Press, 1977, pp. 697-745.
- [6] CIGRE – Working Group 01 of study Committee 33, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", 1971.
- [7] A. Pillips "Handbook for Improving Overhead Transmission Line Lightning Performance", EPRI 2004.
- [8] R. B. Anderson, A.J. Erickson "Lightning Parameters for Engineering Applications", Pretoria South Africa. CSIR, June 1979, report ELEK 170.
- [9] Justo Yanque Montufar, "Técnicas de Alta Tensión", Curso Post-Grado UNI, 2005.
- [10] H. B. Dwight, "Calculation of resistance to ground", Electrical Engineering, vol.55, pp. 1310-1328; 1936.
- [11] J. G. Anderson, "Monte Carlo Computer Calculation of Transmission Line Lightning Performance", IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems. Vol. PAS-80, pp. 414-419, 1965.
- [12] E. D. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems", Copyright 1949 by Bell Telephone Laboratories, Incorporated.
- [13] IEEE std. 80, "Guide for safety in AC Substation Grounding", IEEE Power Engineering Society, ANSI.
- [14] R. Rudenberg, "Grounding Principle and Practice, I-Fundamental considerations on Ground Currents", Electrical Engineering, 1945.
- [15] IEEE Std. 1243, "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Power Engineering Society, 1989.
- [16] IEEE Std 142, "Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Standards Department, Piscataway, NY, revision 1982.
- [17] S.A. SchelKunoff, "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Line an Cylindrical Shield", Bell System Technical Journal, 1934, 13, pp. 532-579.

- [18] L. V. Bewley, " Theory and tests of the counterpoise", Electrical Engineer, VoL 53, pp. 1163-1172, Aug. 1934.
- [19] L. V. Bewley, " The counterpoise", General Electric Rev., Vol. 37, pp. 73-81, 1934.
- [20] L. V. Bewley, "Travelling waves in transmission systems". New York: John wiley and Sons, Inc., pp.211-212, 1951.
- [21] P. L. Bellaschi, "impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, part III effect of lead in ground installation", AIEE Transactions, vol. 62, pp. 334-345, 1943.
- [22] B. G. Gupta and B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 2357-2362, Nov./Dec. 1980.
- [23] L. Bergeron, "The Bergeron Method – A Graphic Method for Determining Line Reflexions in Transient Phenomena", Texas Instruments 1996.
- [24] R. F. Harrington, "Field computation by moment of methods". New York, Macmillan, 1968.
- [25] L. Grcev and V. Arnautovski, "Comparison Between Simulation and Measurement of frequency dependent and Transient Characteristics of Power Transmission Line Grounding", ICLP'98, U.K. 1998, Vol. 1, pp 524-529.
- [26] R. F. Harrington, N.D. Hatziaargyriou ,M.I. Lorentzou "Grounding system design using EMTP", Technical university of Athena's Greece.
- [27] R. F. Harrington, IEEE Std.1410, "Guide for Improving The Lightning Performance of Electric Power Over Head Distribution Lines":IEEE Power engineering sociecity.
- [28] A.P. Meliopoulos and M.G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2,pp. 389-399, 1983.
- [29] Meyer W.& Liu T., "Electromagnetic Transients Program Rule Book", Bonnaville Power Administration, 1982.
- [30] A.D Papalexopoulos and A.P. Meliopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.2,pp. 1073-1081, October 1987.
- [31] M.Ramamoorthy, M.M. Badu Narayanan, S.Parameswaran et al., "Transient performance of grounding grids", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, pp.2053-2059, October 1989
- [32] A. Geri, "Behavior of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation" , IEEE Tans. Power Delivery, Vol.14, No. 3,pp. 1008-1017, July 1999.
- [33] "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines" CIGRE Working Group 33.01, 1991.
- [34] Kenneth John N., "The Lightning Transient Behaviour of a Driven rod earth electrode in Multi-Layer soil", University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2006.

- [35] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, pp. 1773-1781, Nov. 1990.
- [36] P.G. Laurent, "General fundamentals of electric grounding technique", Le bulletin de la Societe Francaise des Electiciens, vol. 1, pp. 368–402, July 1951.
- [37] L. D. Grcev and F. E. Menter, "Transient electromagnetic fields near large earthing systems", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 32, No. 3, May 1996, p.1525-1528.
- [38] L. D. Grcev, "Computer analysis of transient voltages in large grounding systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, pp. 815-823, April 1996.
- [39] IEC Standard 62305, "New International Standard for Lightning Protection", 2006.
- [40] IEEE Standard 1410, "Guide for Improving the Lightning Performance of of Electric Power Overhead Distribution Lines", IEEE Power Engineering Society, 2004.
- [41] Mustafa Güclü A., "Grounding Design Analysis", The Degree of Master of Science in Electrical and Electronics Engineering of Middle East Technical University, 2009.
- [42] Ministerio de Energía y Minas-DGER, "Coordinación de Protección de la LT 138 kV y Subestaciones, Ingeniería Detalle", 2005.
- [43] B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie G. Meunier and R. Feuillet. "A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems", IEEE Transactions on Magnetics Vol.31,No.3,pp 2150-2153, May, 1995.
- [44] L. Grcev "Modeling of Grounding Electrodes under Lightning currents". IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol 51, N° 3, August 2009.
- [45] Shoza Sekioka , Maria I.Lorentzou. Maria P. Philippockou Member IEEE. "Current Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balanced of soil Ionization",
- [46] F. Dawalibi, " Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part I- single conductor", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986, p. 105-111.
- [47] F. Dawalibi, " Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part II- ground networks", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986, p. 112-119.
- [48] R. Andolfato, L. Bemardi and L. Fellin, " Aerial and grounding system analysis by the shining complex images method", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1001-1009, July 2000.
- [49] R. Verma and D. Mukhedkar, " Impulse to impedance of buried ground wires", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Sep./Oct, 1980.
- [50] C. Mazzetti and G. M. Veca, "Impulse behaviour of grounding electrodes", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9,pp.3148-3156, 1983.

- [51] R. Velazquez and D. Mukhedkar, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1314-1322, 1984.
- [52] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzargyriou, B. C. Papadias, "Time Domain Analysis of grounding electrodes impulse response", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No.2, pp. 517-524, April, 2003.
- [53] F.Menter, L.Grcev: "EMTP-Based Model for Grounding System Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 9, October 1994, pp. 1838-1847.
- [54] L. Grcev and M. Popor: "On High Frequency circuit Equivalents of a vertical Ground Red" , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20 , N° 2, Alpine 2005.
- [55] ATP-Alternative Transients Program, Book, Univ. Nacional La Plata
- [56] Y. Yasuda, Sokando, K.Ikenda, Y.Sonai& Y Furuoka (2003), "Measurement of Soil-ionization characteristics of grounding and its analysis using dynamic grounding model" Transaction on Power Systems and Energy, Vol. 123–B. N° 6, PP 718–724.
- [57] IEEE/ANSI, "National Electrical Safety Code – NESC", Edicion 1997.
- [58] F. Menter "Accurate Modeling of conductors imbedded in Earth with Frequency Dependent Distributed Parameter Lines" – Proceeding of 1st EMTP user Group Meeting 1992.
- [59] UIT – Comisión de Estudio y Radio comunicación, "características Eléctricas de la superficie de la Tierra" Recomendación UIT – RP- 527 – 3, 2000.
- [60] A. Geri and S. F. Visacro, " Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model", ICLP Cracow Poland, Sep. 2-6, 2002, 5p.7.
- [61] S. Sekioka, H. Hayashida, T. Hara and A. Ametani, "Measurements of grounding resistance for high impulse current", IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 6, Nov. 1998, p. 693-699.
- [62] P. L. Bellaschi, P. L. Arminggton and A. E. Snowden, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds II ", AIEE Transactions, VoL 61, p. 349-363, 1942.
- [63] G. M. Petropoulos and D. Eng, " The high-voltage characteristics of earth resistances ", J. IEE, Vol. 95, part II, p. 59-70, 1948.
- [64] IEEE guide for the application of insulation coordination", IEEE Std 1313.2-1999, Technical Council of the IEEE power Engineering Society.
- [65] I.F. Gonos and I.A. Stathopulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages", IEE Proc.-Sei. Technology, Vol. 151, N° 5, Sptember 2004.
- [66] E. E. Oettle, "The characteristics of electrical breakdown and ionization processes in soil", The Transactions of the SA Institute of Electrical Engineers, p. 63-70, Dec. 1988.

- [67] A. C. Liew and M. Darveniza, " Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths ", Proc. IEE, Vol. 121, No. 2, p. 123-135, Feb. 1974.
- [68] M. Loboda, Z. Pochanke, "Experimental study of electric properties of soil with impulse current injections", 18th ICLP Munich, p. 191-198, 1985.
- [69] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman and Y. Liu, "Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization ", ICLP 2002, Poland, on 2-6 September, 2002.
- [70] L. Grcev, "Improved Earthing System Design Practices for Reduction of Transient Voltages", 1998 CIGRE Session – International Conference on Large High Voltage Electric Systems, (Paper 36-302), Paris, France, August 1998.
- [71] Farhad Richidi, "Indirect estimation Lightning currents from remote Electromagnetic Field Measurements", EPFL-STI-LRE-EMC Group, station 11, Switzerland; IX International Symposium on Lightning Protection, Iguazu, Brasil-2007.
- [72] E.E.Oettle, "A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oct. 1988, p. 2020-2029.
- [73] M. Ishji, T. Kawamura y otros "Multistory Transmission Tower model for Lightning surge analysis". IEEE Trans. On Power Del; vol 6, N° 3. PP 1327 – 1335, July 1991
- [74] R. Thottappilli, V. Scuka, M. Zitnik, Y. Liu and KG Loustrand, "Grounding of Communication Towers for Lightning Protection", ICLP Poland, 2-6 September 2002.
- [75] C. Bouquegneau, "A critical View on Lightning Protection International Standard", Pro-Rector of Faculte Polytechnique of Mosrue of Houdain, 9,B-7000 Mons (Belgium).
- [76] Andrew R. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems", Edit. Marcel Dekker, Inc, NY, Basel, 1999.
- [77] R. Silva Alipio, "Modelagem Electromagnetica de Aterramientos Electricos Nos Dominios do Tempo e da Frequencia", TESIS, Diretoria de Pesquisa e Pos-Graduacao-Centro Federal de Educacao Tecnologica de Minas Gerais-Brazil 2008.
- [78] H. Torres Sánchez, "Norma Tecnológica Colombiana de Protección contra Rayos", Seminario Internacional-Seguridad, Riesgo, Calidad y Protecciones Electricas, Medellín 5, 6 y 7 Julio 2006.
- [79] Wikipedia, "Atmosfera Terrestre".
- [80] S. Sekioka, M.I. Lorentzou, M.P. Philippakou and J.M. Prousalidus "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, N° 1, January 2006.

ANEXO A - 0

NORMAS DE PUESTA A TIERRA

En el Perú no hay Reglamento o Norma acerca de la seguridad respecto del rayo o las técnicas de puestas a tierra con respuesta a transitorios electromagnéticos, sin embargo a nivel internacional se cuenta con distintas publicaciones de Protección contra Rayos, emitidos por instituciones especializadas; tales como la NFPA, IEEE, IEC, VDE, UNE, National Lightning Safety Institute (NLSI) y otros; a continuación se citan los Estándares más utilizados en el tema de Puesta a Tierra a nivel internacional.

IEEE Std 142: "Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Standards Department, Piscataway, NY.

IEEE Std 1100: Recommended Practice for Powering and Grounding for Sensitive Electronic Equipment, IEEE Standards Department, Piscataway, NY.

IEEE Std 1243: IEEE "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Power Engineering Society.

IEEE Std 1410: IEEE "Guide for Improving the Lightning Performance of of Electric Power Overhead Distribution Lines", IEEE Power Engineering Society.

IEEE 81-2000 : IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System

NESC : National Electrical Safety Code Handbook.

NEC : National Electrical Code (NEC) o NFPA

DIN VDE 0141: Earthing system for special power installations with nominal voltages above 1 kV

DIN 57185 : Lightning Protection System, Standard Germany.

KSC-STD-E-0012E: Facility Grounding and Lightning Protection, Standard for the NASA.

IEC 62305 : New International Standard for Lightning Protection.

- Part 1 : Protection of Structures Against Lightning- General Principles
- Part 2 : Risk Management
- Part 3 : Physical Damage and Life Hazard
- Part 4 : Electrical and Electronic Systems within Structures
- Part 5 : Services (telecom, powerlines, etc.)

BS 6651 : Code of Practice for Protection against Lightning, British Standard.

CNE : Código Nacional de Electricidad, compendio para Suministro y Utilización.

Normativa en Perú, de cumplimiento obligatorio respecto a sistemas de Puesta a Tierra en estado estacionario. Estas cubren Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Centros de Transformación para las instalaciones de Alta Tensión, Líneas de Transmisión, Subestaciones, Líneas y Redes de Media Tensión, Redes de Baja Tensión y Sistemas de Utilización.

ANEXO A1

MODELADO DINÁMICO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN

1. MODELADO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA

El cálculo correcto de los parámetros del electrodo en por unidad (p.u.) de longitud es esencial para la mejor aproximación de los resultados, aplicando la Teoría de Campos Electromagnéticos(TCE) y la Teoría de Líneas de Transmisión (TL) se ha desarrollado las fórmulas de cálculo.

1.1 Modelado del electrodo de PT como circuito para análisis transitorio

Como muestra la literatura en frecuencias bajas y/o estado estacionario, la Impedancia de un electrodo de PT puede ser representada por una Resistencia sola, mientras que en altas frecuencias por un circuito R-L-C de elementos concentrados o distribuidos en secciones incrementales a lo largo del electrodo. La literatura existente muestra para la Impedancia de una PT en alta frecuencia, tres juegos de expresiones para los parámetros del modelo de circuito PI considerando la Resistencia (R), Inductancia (L), Conductancia (G) y Capacitancia (C).

Los electrodos de PT están conformados por conductores horizontales enterrados y varillas o picas verticales, solos o asociados en diversas configuraciones o armados que se pueden obtener; para lograr disipar la energía por los impulsos en el suelo en tiempos muy cortos, evitando sobretensiones en el sistema eléctrico y gradientes peligrosos en los aislamientos.

En el proceso de análisis del comportamiento dinámico de la PT, corresponde analizar el modelado con los parámetros a utilizar, lo cual fue abordado en los capítulos 3 y 4 de esta Tesis; la base del modelado corresponde obtener los parámetros de la PT aproximado a la LT como impedancia distribuida, ante la excitación mediante corrientes de impulso, el problema consiste en calcular la respuesta transitoria de tensión en la cima de las torres o en los conductores de blindaje (cables de guarda) producido por las ondas viajeras.

El modelo de impedancia distribuida considera al electrodo dividido en secciones pequeñas y cada sección esta representada por un circuito PI; de ese modo el electrodo

de PT estará representado por un conjunto de circuitos PI conectados en cascada, criterio originalmente desarrollado por *E.D. Sunde* en [12] como se muestra en siguiente figura.

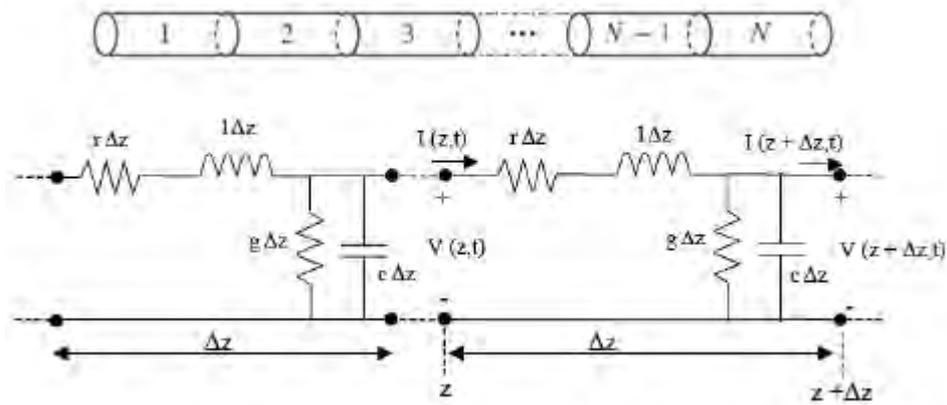


Fig. A1.1 Modelo del electrodo de PT aproximado a Línea de Transmisión con Impedancia PI distribuida.

1.2 Expresión de los Modelos de Electrodo de Puesta a Tierra

A continuación presentamos las ecuaciones matemáticas de los modelados del electrodo de PT (enterrados en el suelo), más utilizados internacionalmente para el estudio de esta materia. No descarto alguna formulación de investigaciones anteriores, para esta Tesis he seleccionado los de mayor relevancia y aplicación en el Técnica de Ingeniería.

1.2.1 Electrodo de Puesta a Tierra tipo Varilla Vertical

a) **R. Rudenberg** en [14] desarrolló las ecuaciones matemáticas aplicadas a un electrodo de PT tipo varilla o barra vertical en estado transitorio, dado por.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} * \text{Log}\left(\frac{2\ell}{a}\right), \quad C = 2\pi\epsilon\ell * \left[\text{Log}\left(\frac{2\ell}{a}\right)\right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} * \text{Log}\left(\frac{2\ell}{a}\right) \quad (\text{A1.1a})$$

b) **E.D. Sunde** en [12] desarrolló las ecuaciones para el cálculo de los parámetros del electrodo de PT tipo varilla vertical en estado transitorio, dado por la expresión siguiente.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\text{Log}\left(\frac{4\ell}{\alpha}\right) - 1 \right], \quad C = 2\pi\epsilon\ell * \left[\text{Log}\left(\frac{4\ell}{\alpha}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} \left[\text{Log}\left(\frac{4\ell}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (\text{A1.1b})$$

Donde " $\alpha = \sqrt{2 * a * h}$ " es el radio equivalente del electrodo, "a" es el radio del conductor, " ℓ " es la longitud del electrodo y "h" es la profundidad de enterramiento, si $h=0$, $\alpha = a$. La unidad de los parámetros están dados en R(Ohm), L (H), C (F), G(mho).

1.2.2 Electrodo de Puesta a Tierra tipo Conductor Horizontal.

a) **E.D. Sunde** [12] desarrolló las expresiones matemáticas para el cálculo de los parámetros de PT en estado transitorio, utilizando electrodo horizontal dado por las siguientes expresiones.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\text{Log}\left(\frac{2\ell}{\alpha}\right) - 1 \right], \quad C = 2\pi\epsilon \left[\text{Log}\left(\frac{2\ell}{\alpha}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\text{Log}\left(\frac{2\ell}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (\text{A1.2})$$

Dónde: " $\alpha = \sqrt{2 * a * h}$ " es el radio equivalente del conductor, con dimensiones de radio "a", cuando el conductor está colocado en la profundidad "h" del suelo, " ℓ " es la longitud del electrodo; las unidades de los parámetros están dados en R (Ohm), L (H/m), C (F/m), G(mho).

b) H.B. Dwight [10] ha desarrollado las ecuaciones matemáticas para el electrodo de PT en estado transitorio, para conductor horizontal, las cuales pueden ser usadas para calcular la conductancia G y los demás parámetros; según expresiones.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\text{Log}\left(\frac{2\ell}{\alpha}\right) + \text{Log}\left(\frac{2\ell}{s}\right) - 2 + \frac{s}{\ell} - \frac{s^2}{16 * (0.5\ell)^2} + \frac{s^4}{512 * (0.5\ell)^4} \right] \quad (\text{A1.3})$$

Donde: $s = 2h$, " α " es el radio equivalente del conductor.

Los valores de L, C pueden ser calculados por las expresiones siguientes.

$$L = \frac{\ell * G^{-1}}{c_0^2 * \epsilon_0 \rho} = \frac{\mu_0}{2\pi} [], \quad C = \frac{\rho * \epsilon}{\ell * G^{-1}} = 2\pi\epsilon [] \quad (\text{A1.4})$$

Donde:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} : \text{velocidad de la luz en vacío}$$

Las unidades de los parámetros del circuito R-L-C distribuidos están dados como: R(ohm), G (mho), C (F/m), L (H/m).

El electrodo de Puesta a Tierra (PT) se considera como una aproximación a una Línea de Transmisión abierta al final, con la impedancia de entrada en el terminal de energización, su valor se calcula por.

$$Z = Z_c * \coth(\gamma * \ell) \quad (\text{A1.5})$$

Donde:

$$Z_c : \text{Impedancia característica dada por } Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

$\gamma(\omega) :$ Coeficiente de propagación

$\ell :$ Longitud del electrodo (m)

Los modelados más utilizados y recomendados en la literatura especializada, son las ecuaciones de [12], formulación utilizada para el cálculo de los parámetros de PT de este trabajo.

1.3 Modelado de la Puesta a Tierra Aproximado a Línea de Transmisión Dependiente de la Frecuencia

En esta parte se describen las aplicaciones de los modelados teóricos para el análisis bajo transitorios de alta frecuencia de Puestas a Tierra, basado en el modelado aproximado a una Línea de Transmisión, con dependencia de la frecuencia.

1.3.1 Cálculo Básico de la Impedancia y Admitancia del electrodo de Puesta a Tierra, para conductor horizontal enterrado en el suelo.

Para el cálculo básico de la Impedancia y Admitancia del electrodo de PT variable con la frecuencia, en primer lugar se considera el modelado del Circuito PI con Impedancia distribuida aproximada a una LT, originalmente desarrollado por *E.D. Sunde* [12]; el valor complejo de la Impedancia (Z) longitudinal dependiente de la frecuencia y la Admitancia transversal (Y) en por unidad (p.u.) de longitud, expresados por las ecuaciones.

$$Z'(\omega) \approx \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} * \log \left[\frac{1.85}{a\sqrt{\gamma_{(\omega)}^2 + \Gamma_{(\omega)}^2}} \right] \quad (A1.6)$$

$$Y'(\omega) \approx \frac{\pi(1 + j\omega\rho\varepsilon)}{\log \left[\frac{1.12}{\gamma_{(\omega)} * \alpha} \right] * \rho} \quad (A1.7)$$

Donde:

- a : radio del electrodo
- h : profundidad de enterramiento del electrodo
- α : radio aparente, con valor $\alpha = \sqrt{2a * h}$
- ω : Frecuencia angular

En las ecuaciones (A1.6 y A1.7) no se considera la impedancia interna del electrodo conductor.

El Coeficiente de Reflexión, se determina para la propagación de una onda transitoria electromagnética (Γ), en suelos homogéneos con resistividad (ρ), permitividad eléctrica (ε) y permeabilidad magnética del vacío (μ_0); expresado por.

$$\underline{\Gamma}(\omega) = \sqrt{j\omega\mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right)} \quad (A1.8)$$

La Impedancia Característica (Z_c) y el Coeficiente de Propagación de Onda (γ_c) están expresados por las ecuaciones.

$$Z_c(\omega) = \sqrt{Z'(\omega) / Y'(\omega)} \quad (A1.9)$$

$$\gamma_c(\omega) = \sqrt{Z'_c(\omega) / Y'(\omega)} \quad (\text{A1.10})$$

La solución de la ecuación no lineal (A1.10) del Coeficiente de Propagación, conduce a la solución de la impedancia característica de la ecuación (A1.9).

La Impedancia característica $Z_c(\omega)$ y la constante de propagación $\gamma(\omega)$ dependiente de la frecuencia para el electrodo tipo conductor horizontal lineal se ha desarrollado en [12], el cual esta expresado en (A1.11).

$$Z_c(\omega) = \frac{\rho}{\pi} \left[\log\left(\frac{2l}{\alpha}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{2\rho(1 + j\omega\varepsilon\rho)}} \quad (\text{A1.11.1})$$

$$\gamma_c(\omega) = \sqrt{j\omega\mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon\right) / 2} \quad (\text{A1.11.2})$$

Luego, la impedancia Z de puesta a tierra del electrodo horizontal de longitud " l ", aproximada al modelado de la Línea de Transmisión dependiente de la frecuencia, no incluye la impedancia interna del conductor (Z_i) y se obtiene por la expresión.

$$Z = Z_c * \coth(\gamma * l) \quad (\text{A1.12})$$

1.3.2 Cálculo de Parámetros de la Puesta a Tierra dependientes de la Frecuencia, para Electrodo con Varilla Vertical

Para electrodo de PT con varilla vertical, la impedancia característica y coeficiente de propagación están expresados por.

$$Z_c(\omega) = \frac{\rho}{2\pi} \left[\log\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho(1 + j\omega\varepsilon\rho)}} \quad (\text{A1.13.1})$$

$$\gamma_c(\omega) = \sqrt{j\omega\mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon\right)} \quad (\text{A1.13.2})$$

1.3.3 Cálculo de la Impedancia y Admitancia del Electrodo de PT horizontal dependiente de la Frecuencia, con Impedancia Interna

En [12] se desarrollaron las ecuaciones matemáticas del electrodo de PT, para la Admitancia y Auto-Impedancia en p.u. de longitud; como se presentó en la sección anterior, posteriormente se ha desarrollado un modelo mejorado en [17] con la inclusión de la Impedancia y Admitancia interna del conductor, obteniéndose las expresiones matemáticas en función de la frecuencia dado por.

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)} \text{Log}\left(\frac{1.12}{\Gamma\alpha}\right) \right]^{-1} \quad (\text{A1.14.1})$$

$$Z(\Gamma) = Z_i + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \text{Log}\left(\frac{1.85}{\alpha(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}}\right) \quad (\text{A1.14.2})$$

Dónde:

$$\alpha : \text{Radio equivalente del conductor } \alpha = \sqrt{a^2 + 4h^2} \quad (\text{A1.14.3})$$

h : Profundidad de instalación

Constante de propagación dado por: $\Gamma = \sqrt{Z(\Gamma) * Y(\Gamma)}$ (A1.14.4)

Luego del calculo de los valores de Z e Y, mediante proceso iterativo se obtiene el valor de la constante de propagación, $\Gamma = \sqrt{Z(\Gamma) * Y(\Gamma)}$ en el rango de la frecuencia de interés.

La impedancia interna (Z_i) del electrodo conductor de PT, representa el medio en el que se disipa la energía dentro del conductor; para un conductor cilíndrico sólido, ha sido deducido por S.A. *Schelkunoff* [17], con un radio (α) y características internas (σ_c , μ_c y ϵ_c); según ello la Impedancia Interna en p.u. de longitud del electrodo de PT se calcula por.

$$Z_i = \frac{j\omega_c I_0(\gamma_c \alpha)}{2\pi\alpha\gamma_c I_1(\gamma_c \alpha)} \quad (\text{A1.15.1})$$

$$\gamma_c = [j\omega\mu_c(\sigma_c + j\omega\epsilon_c)]^{1/2} \quad (\text{A1.15.2})$$

Donde “ ω ” es la frecuencia angular.

Una ecuación simplificada para el cálculo fácil y exacto de la Z_i puede ser encontrada en [44]. En el caso que la frecuencia sea cero, esta impedancia se reduce a la resistencia en estado estacionario (d.c.) de un conductor cilíndrico, dado por la expresión siguiente.

$$Z_i = \frac{1}{\pi\alpha^2\sigma_c} = \frac{\rho_c}{\pi(a^2 + 4h^2)} \quad (\text{A1.16})$$

1.4 Excitación y Respuesta transitoria de la Puesta a Tierra en el dominio del tiempo y la frecuencia

La metodología general propuesta para obtener la respuesta transitoria del Potencial de Tierra Máximo (*Grounding Potential Rise-GPR*), se efectúa seleccionando adecuadamente la corriente de excitación tipo rayo, la cual representa la descarga atmosférica, con una función de doble exponencial, dada por la ecuación.

$$i(t) = I_0 * (e^{-\alpha * t} - e^{-\beta * t}) \quad (\text{A1.17})$$

Donde:

- β : constante, asociada al tiempo de frente de onda.
- α : constante, asociada al tiempo de cola de la onda.
- I_0 : Corriente constante, representa el valor máximo de la onda de Rayo.

La representación en el dominio de la frecuencia, se obtiene a través de la aplicación de la transformada de Fourier, herramienta matemática con la cual se puede expresar una señal dada en términos de sus componentes exponenciales.

La representación en el dominio del tiempo, especifica la función en cada instante de tiempo, mientras que la representación en el dominio de la frecuencia especifica las amplitudes relativas de las componentes de frecuencia de la función; ambas representaciones especifican en forma única la función.

Analíticamente, la transformada de Fourier de una función doble exponencial se representa con la expresión matemática siguiente.

$$\mathfrak{F} [i(t)] = I (f) \quad \text{A1.18.1}$$

$$I (f) = I_0 * \left[\frac{\alpha - \beta}{(\alpha + j2\pi f)(\beta + j2\pi f)} \right] \quad \text{A1.18.2}$$

Las principales componentes de la frecuencia se pueden determinar y la Impedancia de la PT puede ser calculada por las ecuaciones presentadas en el acápite 1.2 y 1.3 de este anexo. La tensión en la impedancia de PT en el dominio de la frecuencia se calcula por la ecuación.

$$v(f) = Z_{PT}(f) * I(f) \quad \text{(A1.19)}$$

La respuesta de tensión transitoria V(t) en la PT y en el dominio del tiempo, en el punto de inyección de la corriente de excitación i(t), puede ser obtenida directamente, a través de la aplicación de la Transformada Inversa de Fourier, dada por la ecuación.

$$v(t) = \mathfrak{F}^{-1} \{ Z_{PT}(j\omega) * \mathfrak{F}[i(t)] \} \quad \text{(A1.20)}$$

Donde:

- v(t) : Tensión de respuesta a la excitación
- i(t) : Corriente de excitación
- \mathfrak{F} : Transformada de Fourier
- \mathfrak{F}^{-1} : Transformada Inversa de Fourier

ANEXO A2

CÁLCULO DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE PUESTA A TIERRA EN MODELO APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN

1. ECUACIONES DE LAS ONDAS VIAJERAS

Un problema de ingeniería implica la transmisión de una señal desde una fuente de energía hacia la carga, la línea es el enlace directo entre la fuente y la carga; los ejemplos típicos se efectúan utilizando cables paralelos o cable coaxial.

El modelado de la puesta a tierra dinámica, es aplicable sobre el cálculo del comportamiento del electrodo de puesta a tierra bajo condiciones de onda. Las ventajas de este método es la simplicidad y exactitud, porque el electrodo de PT esta basado en el modelo aproximado a LT en circuito Pi distribuido y las expresiones matemáticas cerradas. En el Capítulo 4, se ha desarrollado el Modelo de la PT aproximada a una Línea de Transmisión (LT), considerando que la línea eléctrica esta instalado en el aire y el contrapeso de la PT esta instalado en el suelo. La metodología consiste en que la LT lo descomponemos en secciones y cada una de ellas conformado por circuitos Pi, distribuidos en cascada a lo largo del conductor; con sus elementos: Resistencia (R), Inductancia (L), Capacitancia (C) y Conductancia (G); conformado por celdas idénticas de longitud infinitesimal. En la figura A2.1 se representa el circuito equivalente de la PT modelado como una LT de gran longitud con pérdidas.

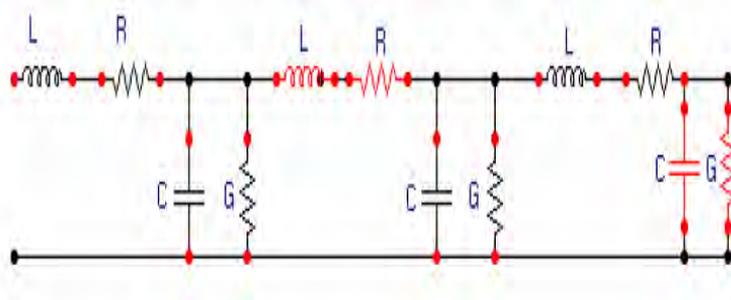


Figura A 2.1 Circuito Pi distribuido de PT, equivalente a la Línea de Transmisión.

La impedancia serie determina la variación de la Tensión desde la entrada hasta la salida de la celda, de acuerdo al sub circuito de la celda, visto en la figura A2.2; de allí resulta la ecuación diferencial acoplada de primer orden para la tensión y se calcula por:

$$-dv = (R + L \frac{d}{dt})i dx \quad (A2.1)$$

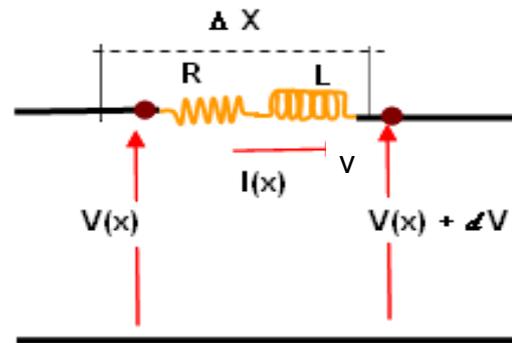


Figura A2.2 Sub circuito Longitudinal de la LT

La corriente transversal que fluye a través de la admitancia paralela, determina la variación de entrada–salida de la corriente del sub circuito de la figura A2.3.

La variación de la onda de corriente es causada por la fuga en el componente $G \cdot v \cdot dx$ y la corriente de carga del condensador línea-tierra. Así se obtiene la ecuación diferencial de primer orden acoplada para la corriente y calculada por la ecuación.

$$-di = (G + C \frac{d}{dt})v dx \quad (A2.2)$$

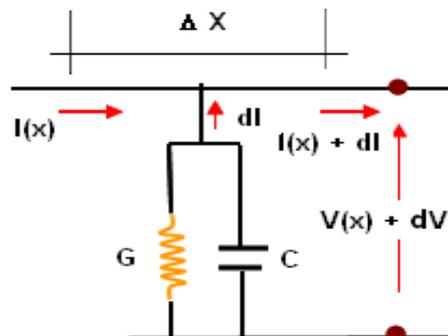


Figura A2.3 Sub circuito transversal de la LT

Las ecuaciones (A2.1) y (A2.2) se conocen como las ecuaciones de Onda para una Línea de Transmisión con Pérdidas.

Donde:

- R : Resistencia de la Línea (Ω/m).
- L : Inductancia de la Línea (H/m).
- C : La Capacitancia de la Línea a la tierra (F/m).
- G : Conductancia de Fuga lateral de la línea (S/m).
- dx : Longitud incremental de la línea (m).

Diferenciando las ecuaciones (A2.1) y (A2.2) respecto a las coordenadas del espacio, se obtienen ecuaciones de segundo orden no acopladas para la tensión y la corriente en el

dominio de Laplace; matemáticamente estas ecuaciones son de la onda (A2.3) y (A2.4), las cuales se puede resolver en forma independiente.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \left[(R + Ls) * (G + Cs) \right] * V \quad (A2.3)$$

$$\frac{\partial i^2}{\partial x^2} = \left[(R + Ls) * (G + Cs) \right] * i \quad (A2.4)$$

La solución de las ecuaciones para una Línea de Transmisión con pérdidas, puede obtenerse de una manera similar a la solución de las ecuaciones de onda o D'Alembert.

2. TENSIONES Y CORRIENTES DISTRIBUIDAS A LO LARGO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA

La respuesta transitoria del electrodo de PT, en términos de tensión y corriente, distribuidos a lo largo de su longitud, se calcula para resolver las ecuaciones de onda o de D'Alembert, directamente en el dominio de tiempo. También se puede utilizar otros métodos matemáticos.

2.1 Excitación de corriente de impulso

La respuesta transitoria del electrodo de PT es calculada considerando la excitación de una onda de corriente de impulso, de forma doble exponencial, característica de la corriente de rayo, esto está dado por la ecuación.

$$I_{source}(t) = I_0 * (e^{\alpha * t} - e^{\beta * t}) \quad (A2.5)$$

Donde α y β son constantes reales negativas que dependen del tiempo de cola y frente de la onda.

2.2 Cálculo de la Respuesta del electrodo de Puesta a Tierra a la corriente de Impulso

La solución de las ecuaciones de propagación de las ondas de tensión y corriente en el dominio del tiempo, que es la suma de la solución parcial y la solución de la ecuación homogénea de toda la red, para los "n" circuitos PI conectados en cascada, según la Figura A2.4.

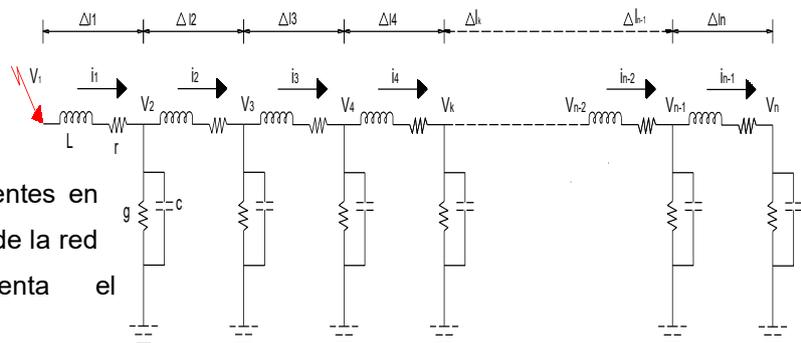


Fig. A2.4 Tensiones y corrientes en los elementos concentrados de la red equivalente que representa el electrodo de puesta a tierra.

Por lo tanto, la solución general o completa en el dominio del tiempo de las ecuaciones de propagación de las ondas de tensión y corriente a lo largo del electrodo, está expresada por.

$$V(x,t) = V_h(x,t) + V_p(x,t) \quad (\text{A2.6.1})$$

$$I(x,t) = I_h(x,t) + I_p(x,t) \quad (\text{A2.6.2})$$

Donde las ondas de Tensión y Corriente en el tiempo se descomponen en:

- a) Las soluciones particulares: $V_p(x,t)$ e $I_p(x,t)$
- b) Las soluciones generales homogéneas: $V_h(x,t)$ e $I_h(x,t)$

2.3 Solución Particular de las Ecuaciones de Onda o de D'Alembert

Expresar las tensiones y corrientes en los nodos intermedios del electrodo de PT de la Figura A2.4, en función de las tensiones y corrientes del punto de inyección, se propone una ecuación diferencial de orden de k^{th} , de la forma.

$$i_0 = a_1 D^k V_n + a_2 D^{k-1} V_n + a_3 D^{k-2} V_n + \dots a_k D V_n \quad (\text{A2.7})$$

Donde: $p = d/dt$, $A = R+Lp$, $B = G+Cp$, $k > n$ y a_i son constantes reales.

Las ecuaciones diferenciales pueden ser escritas para cada elemento circuital, para la Corriente desconocida $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$; en forma idéntica para la Tensión $V_0, V_1, V_2, \dots, V_{n-1}$, deducidas del circuito de la figura A2.4.

Para la corriente de impulso aplicada, $i_0(t) = I_0(e^{\alpha t} - e^{\beta t})$ se obtiene la tensión distribuida, en la ecuación (A2.7), que acepta la solución parcial de la tensión en el elemento "n", dada por.

$$V_n(t) = I_0(C_{\alpha,n} * e^{\alpha t} - C_{\beta,n} * e^{\beta t}) \quad (\text{A2.8})$$

Dónde, $C_{\alpha,n}$, $C_{\beta,n}$ son constantes reales.

La distribución de la corriente a lo largo del electrodo de PT se obtiene como parte de la solución de la ecuación (A2.6), dada por:

$$i_k(t) = C_{\alpha,n} e^{\alpha t} - C_{\beta,n} e^{\beta t} \quad (\text{A2.9})$$

Las constantes $C_{\alpha,k}$, $C_{\beta,k}$ se calculan para satisfacer las leyes circuitales de Kirchoff, llevando a las condiciones de contorno las ecuaciones (A2.8) y (A2.9); en el límite del cálculo se obtienen las expresiones de la tensión y corriente distribuidas, para los "n" segmentos del electrodo que tiende al infinito.

La solución particular para la tensión y la corriente distribuidas a lo largo del electrodo, están expresados por.

$$V_p(x,t) = \frac{-\cosh(\gamma_\alpha(\ell-x))}{\sinh(\gamma_\alpha\ell)} * e^{\alpha t} - \frac{\cosh(\gamma_\beta(\ell-x))}{\sinh(\gamma_\beta\ell)} * e^{\beta t} + Const * e^{-\frac{G_e t}{C_e}} \quad (A2.10)$$

$$I_p(x,t) = \frac{\sinh(\gamma_\alpha(\ell-x))}{\sinh(\gamma_\alpha\ell)} * e^{\alpha t} - \frac{\sinh(\gamma_\beta(\ell-x))}{\sinh(\gamma_\beta\ell)} * e^{\beta t} \quad (A2.11)$$

El coeficiente de propagación, es determinado por:

$$\gamma_\alpha = \sqrt{(R_e + \alpha * L_e)(G_e + \alpha * C_e)} \quad (A2.12)$$

2.4 Solución General homogénea de las Ecuaciones Diferenciales de la Tensión y Corriente de la Onda Viajera

Para obtener las soluciones generales homogéneas de las ecuaciones diferenciales de las Tensiones y Corrientes en el dominio del tiempo, la ecuación diferencial se descompone como:

$$y^{(n)} + C_1 * y^{(n-1)} + \dots C_k * y^{(n-k)} \dots + C_n y + b = 0 \quad (A2.13)$$

Donde:

$y^{(n-k)}$: Derivada en la "n-k" de la variable por calcular.

C_k : Coeficiente constante conocido, (k= 0,1,2,...n) $\in \mathbb{R}$

Se observa que la derivada n-ésima va acompañada del coeficiente unidad. El polinomio característico queda definido por una ecuación del orden "n".

$$r^{(n)} + a_1 * r^{(n-1)} + \dots a_k * r^{(n-k)} \dots + a_{n-1} * r + a_n = 0 \quad (A2.14)$$

Calculando las "n" raíces del polinomio característico r_n , la solución de la ecuación homogénea, será:

$$Y(x,t) = Y_1(x,t) + Y_2(x,t) + \dots + Y_n(x,t) \quad (A2.15)$$

Se deduce que la ecuación diferencial que relaciona la corriente de la fuente con la tensión al final del electrodo (elemento "n") esta dado por la ecuación.

$$i_0 = \left\{ \frac{\alpha_2^2 \left[-\frac{\alpha_2}{\beta_2} \right]^{n+1} - \beta_2^2 \left[-\frac{\beta_2}{\alpha_2} \right]^{n+1}}{\beta - \alpha} \right\} * V_n \quad (A2.16.1)$$

$$\alpha_2 = \frac{-AB + \sqrt{AB(AB + 4)}}{2A} \quad (\text{A2.16.2})$$

$$p = \frac{d}{dt}, A = R + Lp, B = G + Cp, \beta_2 = -\beta - \alpha_2 \quad (\text{A2.16.3})$$

Donde:

R, L : Parámetros longitudinales de la PT

G, C : Parámetros transversales de la PT

La solución general, donde el segundo miembro de la derecha tiende al valor de $-\sqrt{(G_e + xC_e/R_e + xL_e)} * \sinh(\gamma * l)$ esto es, una combinación lineal de términos exponenciales; cada uno de ellos corresponde a una raíz del polinomio característico.

Las raíces de la ecuación (A2.16), se obtienen como:

$$x = \frac{-G_e}{C_e} \quad y \quad \gamma_r l = k\pi j, k = \pm 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (\text{A2.17.1})$$

$$r_{1,2}(k) = \frac{-R_e C_e \ell^2 - L_e G_e \ell^2 \pm \sqrt{(R_e C_e \ell^2 - L_e G_e \ell^2)^2 - 4L_e C_e \ell^2 \pi^2 k^2}}{2L_e C_e} \quad (\text{A2.17.2})$$

La solución general homogénea para la tensión del elemento "n" del electrodo, está dado por la ecuación.

$$V_h(\ell, t) = \sum_{k=1}^{\infty} (C_1(k) * e^{x_1(k)t} + C_2(k) * e^{x_2(k)t}) \quad (\text{A2.18})$$

Donde $C_1(k)$, y $C_2(k)$ son constantes reales y k es número entero, donde $C_1(k)$, y $C_2(k)$ son calculados para satisfacer la condición de contorno $V(x, x\sqrt{L_e C_e}) = 0$, en cualquier punto "x" del electrodo.

La velocidad de la propagación de las ondas es $v = 1/\sqrt{L_e C_e}$. Además, si $C_1(k) = C_2(k)$, las expresiones (A2.19) y (A2.20) son simplificadas.

La solución completa de las ecuaciones de propagación de las ondas de tensiones y corrientes en el dominio del tiempo, a lo largo del electrodo de PT; se obtiene, reemplazando las ecuaciones (A2.10) y (A2.19) en (A2.6.1) para el valor de la tensión; así mismo, reemplazando (A2.11) y (A2.20) en (A2.6.2) para la corriente. Para lograr la solución de la ecuación (A2.20) con exactitud, sólo algunos de los términos de la serie infinita en (A2.19) son necesarios.

Finalmente, tomando la extensión de cada uno de estos términos exponenciales, se obtiene la tensión y corriente distribuida, para la solución general homogénea, calculada por.

$$V_h(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[C_1(k) * \text{Cosh}(\gamma_{x_1(k)}(\ell-x)) * e^{x_1(k)t} + C_2(k) * \text{Cosh}(\gamma_{x_2(k)}(\ell-x)) * e^{x_2(k)t} \right] \quad (\text{A2.19})$$

$$I_h(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[C_1(k) * \frac{\sinh(\gamma_{x_1(k)}(\ell-x))}{Z_{x_1(k)}} * e^{x_1(k)t} + C_2(k) * \frac{\sinh(\gamma_{x_2(k)}(\ell-x))}{Z_{x_2(k)}} * e^{x_2(k)t} \right] \quad (\text{A2.20})$$

El método usado para resolver la distribución de tensiones y corriente a lo largo del electrodo, está basado en la solución de las ecuaciones de onda, alcanzado en el dominio del tiempo y el espacio.

La ventaja principal de este método, consiste en que los resultados son obtenidos usando sólo unos términos en las expresiones finales, haciendo el método simple y fácil para su aplicación.

ANEXO B1

CÁLCULO DE RESPUESTA TRANSITORIA DE LA PUESTA A TIERRA A CORRIENTE DE IMPULSO

Alternative Transients Program (ATP, GNU Linux or DOS. All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA).

EXTRACTO DEL REPORTE DE CALCULOS CON EL ATP

```
Comment card. NUMDCD = 1. |C data:C:\ATPDRAW57\PROJECTS\PT_B4-25DISTB-
2000-138KV.ATP
Marker card preceding new EMTP data case. |BEGIN NEW DATA CASE
Comment card. NUMDCD = 3. |C -----
-----
Comment card. NUMDCD = 4. |C Generated by ATPDRAW abril, domingo 15,
2012
Comment card. NUMDCD = 5. |C A Bonneville Power Administration program
Comment card. NUMDCD = 6. |C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY
1994-2009
Comment card. NUMDCD = 7. |C -----
-----
Comment card. NUMDCD = 8. |C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsilon>
Misc. data. 1.000E-07 5.000E-03 0.000E+00 | 1.E-7 .005
Misc. data. 500 1 1 1 1 0 0 1 0 0 | 500 1 1 1 1 0 5 0 1 7 8
Comment card. NUMDCD = 11. |C 1 2 3 4 5 6 7 8
Comment card. NUMDCD = 12. |C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
Comment card. NUMDCD = 13. |C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
Comment card. NUMDCD = 14. |C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B
><Leng><><>0
Comment card. NUMDCD = 15. |C G1
Series R-L-C. 2.000E+02 0.000E+00 0.000E+00 | A 200. 1
Comment card. NUMDCD = 17. |C L1
Series R-L-C. 0.000E+00 1.570E-06 0.000E+00 | XX0001XX0002 .00157 0
Comment card. NUMDCD = 19. |C L1
Series R-L-C. 0.000E+00 1.570E-06 0.000E+00 | XX0003XX0004 .00157 0
Comment card. NUMDCD = 21. |C R1
Series R-L-C. 3.990E+02 0.000E+00 0.000E+00 | GT XX0003 398.98 1
Comment card. NUMDCD = 23. |C R1
Series R-L-C. 3.990E+02 0.000E+00 0.000E+00 | XX0004XX0001 398.98 1
Comment card. NUMDCD = 25. |C C1
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-10 | XX0004 .00044 0
Comment card. NUMDCD = 27. |C G1
Series R-L-C. 1.328E+02 0.000E+00 0.000E+00 | GT 132.77 1
Comment card. NUMDCD = 29. |C C1
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-10 | XX0002 .00044 0
Comment card. NUMDCD = 31. |C G1
Series R-L-C. 1.328E+02 0.000E+00 0.000E+00 | XX0004 132.77 1
Comment card. NUMDCD = 33. |C L1
Series R-L-C. 0.000E+00 1.570E-06 0.000E+00 | XX0005XX0006 .00157 0
Comment card. NUMDCD = 35. |C L1
Series R-L-C. 0.000E+00 1.570E-06 0.000E+00 | XX0007XX0008 .00157 0
Comment card. NUMDCD = 37. |C R1
Series R-L-C. 3.990E+02 0.000E+00 0.000E+00 | XX0002XX0007 398.98 1
Comment card. NUMDCD = 39. |C R1
Series R-L-C. 3.990E+02 0.000E+00 0.000E+00 | XX0008XX0005 398.98 1
Comment card. NUMDCD = 41. |C C1
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-10 | XX0008 .00044 0
Comment card. NUMDCD = 43. |C G1
Series R-L-C. 1.328E+02 0.000E+00 0.000E+00 | XX0002 132.77 1
Comment card. NUMDCD = 45. |C C1
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-10 | XX0006 .00044 0
Comment card. NUMDCD = 47. |C G1
Series R-L-C. 1.328E+02 0.000E+00 0.000E+00 | XX0008 132.77 1
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 87 46 |BLANK BRANCH
Comment card. NUMDCD = 190. |C < n 1><>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
Permanently-closed switch used for metering. | GT XX0035 MEASURING 1
Permanently-closed switch used for metering. | P XX0041 MEASURING 1
-----
Blank card ending switches. KSWTCH = 2. |BLANK SWITCH
Comment card. NUMDCD = 194. |C < n 1><><> Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1
>< TSTART >< TSTOP >
Source. 2.00E+04 -1.55E+04 -1.00E+06 0.00E+00 |15A -1 2.E4 -15500. -999900.
.5
Blank card ends electric sources. KCONST = 1 |BLANK SOURCE
```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

 From bus name | Names of all adjacent busses.

```

A      |TERRA *P      *
XX0001|XX0002*XX0004*
XX0002|TERRA *TERRA *XX0001*XX0007*
XX0003|XX0004*GT      *
XX0004|TERRA *TERRA *XX0001*XX0003*
GT     |TERRA *TERRA *TERRA *XX0003*XX0013*XX0023*XX0035*XX0041*
XX0005|XX0006*XX0008*
XX0006|TERRA *TERRA *XX0005*XX0011*
XX0007|XX0002*XX0008*
XX0008|TERRA *TERRA *XX0005*XX0007*
XX0009|XX0010*XX0014*
XX0010|TERRA *TERRA *XX0009*XX0017*
XX0011|XX0006*XX0012*
XX0012|TERRA *TERRA *XX0011*
XX0013|GT      *XX0014*
XX0014|TERRA *TERRA *XX0009*XX0013*
XX0015|XX0016*XX0018*
XX0016|TERRA *TERRA *XX0015*XX0019*
XX0017|XX0010*XX0018*
XX0018|TERRA *TERRA *XX0015*XX0017*
XX0019|XX0016*XX0020*
XX0020|TERRA *TERRA *XX0019*
XX0021|XX0022*XX0024*
XX0022|TERRA *TERRA *XX0021*XX0027*
XX0023|GT      *XX0024*
XX0024|TERRA *TERRA *XX0021*XX0023*
XX0025|XX0026*XX0028*
XX0026|TERRA *TERRA *XX0025*XX0029*
XX0027|XX0022*XX0028*
XX0028|TERRA *TERRA *XX0025*XX0027*
XX0029|XX0026*XX0030*
XX0030|TERRA *TERRA *XX0029*
XX0031|XX0032*XX0034*
XX0032|TERRA *TERRA *XX0031*XX0038*
XX0033|XX0034*XX0035*
XX0034|TERRA *TERRA *XX0031*XX0033*
XX0035|TERRA *GT      *XX0033*
XX0036|XX0037*XX0039*
XX0037|TERRA *TERRA *XX0036*XX0040*
XX0038|XX0032*XX0039*
XX0039|TERRA *TERRA *XX0036*XX0038*
XX0040|XX0037*GY      *
GY     |TERRA *TERRA *XX0040*
XX0041|GT      *P      *
P      |A      *XX0041*
TERRA |A      *XX0002*XX0002*XX0004*XX0004*GT      *GT      *GT
  
```

First 4 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
 Next 49 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);

Step	Time	GT	A	GY	P	GT	P	A	GT
XX0004	GT								
						XX0035	XX0041	TERRA	XX0003
XX0001	TERRA								
		XX0004	XX0002	XX0008	XX0002	XX0008	XX0006	XX0006	GT
XX0012	XX0014								
		TERRA	XX0007	XX0005	TERRA	TERRA	XX0011	TERRA	XX0013
TERRA	XX0009								
		GT	XX0014	XX0010	XX0018	XX0010	XX0018	XX0016	XX0016
XX0020	GT								
		TERRA	TERRA	XX0017	XX0015	TERRA	TERRA	XX0019	TERRA
TERRA	XX0023								
		XX0024	GT	XX0024	XX0022	XX0028	XX0022	XX0028	XX0026
XX0026	XX0030								
		XX0021	TERRA	TERRA	XX0027	XX0025	TERRA	TERRA	XX0029
TERRA	TERRA								
		XX0035	XX0034	XX0035	XX0034	XX0032	XX0039	XX0032	XX0039
XX0037	XX0037								
		XX0033	XX0031	TERRA	TERRA	XX0038	XX0036	TERRA	TERRA
XX0040	TERRA								

```

500      .5E-4 119171.889 935634.474 56.9095999 912954.958 1133.97581 4535.90325 4678.17237 236.394364
49.3151551 897.581448
      187.248761 10.2870521 2.14214162 39.0634747 8.15229226 .42824485 1.71545009 236.394364
.428632974 49.3151551
      897.581448 187.248761 10.2870521 2.14214162 39.0634747 8.15229226 .42824485 1.71545009
.428632974 236.394364
      49.3151551 897.581448 187.248761 10.2870521 2.14214162 39.0634747 8.15229226 .42824485
1.71545009 .428632974
      236.394364 49.3151551 897.581448 187.248761 10.2870521 2.14214162 39.0634747 8.15229226
.42824485 1.71545009
      .428632974 4535.90325 4535.90325
      1000      .1E-3 54902.9398 431050.34 26.2184679 420601.801 522.426944 2089.70778 2155.2517 108.907777
22.7196784 413.519167
      86.2662123 4.73928378 .986892744 17.9966905 3.75579187 .197294022 .790314345 108.907777
.197472832 22.7196784
      413.519167 86.2662123 4.73928378 .986892744 17.9966905 3.75579187 .197294022 .790314345
.197472832 108.907777
      22.7196784 413.519167 86.2662123 4.73928378 .986892744 17.9966905 3.75579187 .197294022
.790314345 .197472832
      108.907777 22.7196784 413.519167 86.2662123 4.73928378 .986892744 17.9966905 3.75579187
.197294022 .790314345
      .197472832 2089.70778 2089.70778
      1500      .15E-3 25293.992 198586.521 12.0789473 193772.84 240.684069 962.736274 992.932607 50.1742249
10.4670418 190.509844
      39.7431702 2.18340595 .454665219 8.29114336 1.73030751 .090894102 .364100807 50.1742249
.09097648 10.4670418
      190.509844 39.7431702 2.18340595 .454665219 8.29114336 1.73030751 .090894102 .364100807
.09097648 50.1742249
      10.4670418 190.509844 39.7431702 2.18340595 .454665219 8.29114336 1.73030751 .090894102
.364100807 .09097648
      50.1742249 10.4670418 190.509844 39.7431702 2.18340595 .454665219 8.29114336 1.73030751
.090894102 .364100807
      .09097648 962.736274 962.736274
      2000      .2E-3 11653.0377 91489.5612 5.56481668 89271.88 110.88406 443.536242 457.447806 23.1154551
4.82220571 87.7686053
      18.3098288 1.00590338 .209465985 3.81976109 .797159214 .041875256 .167742618 23.1154551
.041913208 4.82220571
      87.7686053 18.3098288 1.00590338 .209465985 3.81976109 .797159214 .041875256 .167742618
.041913208 23.1154551
      4.82220571 87.7686053 18.3098288 1.00590338 .209465985 3.81976109 .797159214 .041875256
.167742618 .041913208
      23.1154551 4.82220571 87.7686053 18.3098288 1.00590338 .209465985 3.81976109 .797159214
.041875256 .167742618
      .041913208 443.536242 443.536242
      2500      .25E-3 5368.59854 42149.5868 2.56373209 41127.8927 51.0847059 204.338824 210.747934 10.6493776
2.2216084 40.4353283
      8.43540735 .46342349 .096501771 1.75977838 .367254264 .019292089 .077279659 10.6493776
.019309574 2.2216084
      40.4353283 8.43540735 .46342349 .096501771 1.75977838 .367254264 .019292089 .077279659
.019309574 10.6493776
      2.2216084 40.4353283 8.43540735 .46342349 .096501771 1.75977838 .367254264 .019292089
.077279659 .019309574
      10.6493776 2.2216084 40.4353283 8.43540735 .46342349 .096501771 1.75977838 .367254264
.019292089 .077279659
      .019309574 204.338824 204.338824
      3000      .3E-3 2473.33365 19418.474 1.18112107 18947.7757 23.5349172 94.1396686 97.09237 4.90620851
1.02350339 18.6287086
      3.88622406 .213500954 .044458731 .810736553 .169195428 .008887938 .035603031 4.90620851
.008895994 1.02350339
      18.6287086 3.88622406 .213500954 .044458731 .810736553 .169195428 .008887938 .035603031
.008895994 4.90620851
      1.02350339 18.6287086 3.88622406 .213500954 .044458731 .810736553 .169195428 .008887938
.035603031 .008895994

```

```

.....
Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-
step loop output.
Variable maxima : 238482.948 .1872411E7 113.505747 .1827025E7 2269.34513 9077.38051 9362.05719 473.134026
98.6358631 1796.2111
      374.479115 20.5622216 4.27899568 78.072814 16.2825917 .854943737 3.42404881 473.134026
.854905075 98.6358631
      1796.2111 374.479115 20.5622216 4.27899568 78.072814 16.2825917 .854943737 3.42404881
.854905075 473.134026
      98.6358631 1796.2111 374.479115 20.5622216 4.27899568 78.072814 16.2825917 .854943737
3.42404881 .854905075
      473.134026 98.6358631 1796.2111 374.479115 20.5622216 4.27899568 78.072814 16.2825917
.854943737 3.42404881
      .854905075 9077.38051 9077.38051

```

```

Times of maxima :      .42E-5      .42E-5      .44E-5      .42E-5      .42E-5      .42E-5      .42E-5      .42E-5
.43E-5      .42E-5
.44E-5      .43E-5      .43E-5      .43E-5      .44E-5      .43E-5      .44E-5      .44E-5      .44E-5      .42E-5
.44E-5      .42E-5      .42E-5      .43E-5      .43E-5      .44E-5      .43E-5      .44E-5      .44E-5      .44E-5
.44E-5      .44E-5      .43E-5      .42E-5      .43E-5      .43E-5      .44E-5      .43E-5      .44E-5      .44E-5
.44E-5      .44E-5      .42E-5      .43E-5      .42E-5      .43E-5      .43E-5      .44E-5      .43E-5      .44E-5
.44E-5      .44E-5      .44E-5      .42E-5      .42E-5
Variable minima :    -.2206E-26      0.0    -.1785E-13      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0    -.2965E-28 -
.1215E-27    -.1661E-28
                -.1492E-12    -.1053E-27    -.2227E-28    -.1811E-12    -.1833E-13    -.3828E-29    -.354E-15    -.2965E-28 -
.1344E-15    -.1215E-27
                -.1661E-28    -.1492E-12    -.1053E-27    -.2227E-28    -.1811E-12    -.1833E-13    -.3828E-29    -.354E-15 -
.1344E-15    -.2965E-28
                -.1215E-27    -.1661E-28    -.1492E-12    -.1053E-27    -.2227E-28    -.1811E-12    -.1833E-13    -.3828E-29 -
.354E-15    -.1344E-15
                -.2965E-28    -.1215E-27    -.1661E-28    -.1492E-12    -.1053E-27    -.2227E-28    -.1811E-12    -.1833E-13 -
.3828E-29    -.354E-15
                -.1344E-15      0.0      0.0
Times of minima :      .0047393      0.0      .004585      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .0047077
.0045918    .0047393
                .0044925    .0045664    .0046862    .0043865    .0047429    .0045849    .004697    .0047077
.004585    .0045918
                .0047393    .0044925    .0045664    .0046862    .0043865    .0047429    .0045849    .004697
.004585    .0047077
                .0045918    .0047393    .0044925    .0045664    .0046862    .0043865    .0047429    .0045849
.004697    .004585
                .0047077    .0045918    .0047393    .0044925    .0045664    .0046862    .0043865    .0047429
.0045849    .004697
                .004585      0.0      0.0

```

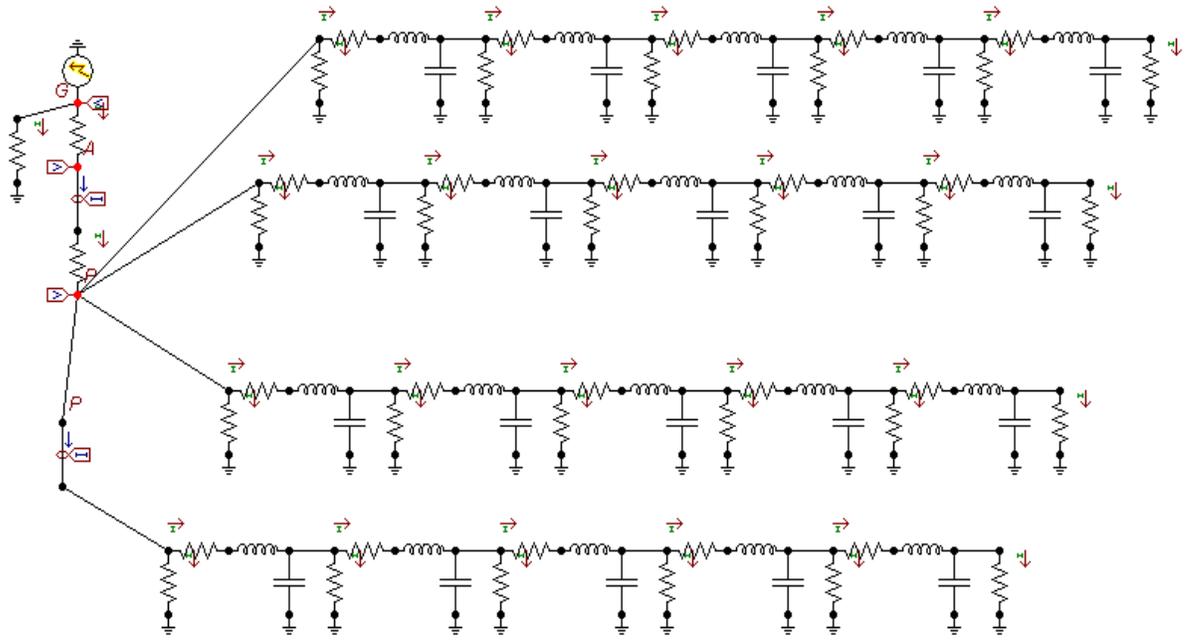


Figura B1-1 Modelo de Puesta a Tierra aproximado a Línea de Transmisión para simulaciones de cálculo de transitorios producido por corrientes de impulso tipo rayo usando el ATP.

ANEXO B2

ALGORITMOS DE CÁLCULO DE IMPEDANCIA DINAMICA DE PUESTA A TIERRA EN MATLAB

Title='CALCULO Z(l) de PT Modelo LT distribución PI Uniforme, frecuencias-LF y HF';

```
>> Ro=1000.;d=0.01076;h=0.60;u0=4*pi*10E-7;E0=8.85*10E-12;Er=5.;
>> f1=60.;f2=10000.;f3=300000.;f4=800000.;
>> w1=2*pi*f1;w2=2*pi*f2;w3=2*pi*f3;w4=2*pi*f4;
>> n1=i*w1*u0/(2.*Ro);n2=i*w2*u0/(2.*Ro);n3=i*w3*u0/(2.*Ro);n4=i*w4*u0/(2.*Ro);
>>
m1=1+i*w1*Er*E0*Ro;m2=1+i*w2*Er*E0*Ro;m3=1+i*w3*Er*E0*Ro;m4=1+i*w4*Er*E0*Ro;
>> c1=sqrt(n1/m1);c2=sqrt(n2/m2);c3=sqrt(n3/m3);c4=sqrt(n4/m4);
>> g1=sqrt(n1*m1);g2=sqrt(n2*m2);g3=sqrt(n3*m3);g4=sqrt(n4*m4);
>> x=0.01:0.001:200;
>> z0=Ro*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)/(2.*x*pi);
>> z1=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c1).*coth(abs(g1).*x);
>> z2=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c2).*coth(abs(g2).*x);
>> z3=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c3).*coth(abs(g3).*x);
>> z4=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c4).*coth(abs(g4).*x);
>> plot(x,z0,x,z1,x,z2,x,z3,x,z4);
```

Titulo='Calculo Z(l)Modelo TL-Sunde con Zc Ro=1000Ohm y Varias Frecuencias';

```
>> Ro=1000.;d=0.01076;h=0.60;u0=4*pi*10E-7;E0=8.85*10E-12;Er=10;
>> f1=60;f2=10000;f3=300000;f4=800000;f5=1200000;
>> w1=2*pi*f1;w2=2*pi*f2;w3=2*pi*f3;w4=2*pi*f4;w5=2*pi*f5;
>>
n1=i*w1*u0/(2.*Ro);n2=i*w2*u0/(2.*Ro);n3=i*w3*u0/(2.*Ro);n4=i*w4*u0/(2.*Ro);n5=i*w5*u0/(2.*Ro);
>>
m1=1+i*w1*Er*E0*Ro;m2=1+i*w2*Er*E0*Ro;m3=1+i*w3*Er*E0*Ro;m4=1+i*w4*Er*E0*Ro;
m5=1+i*w5*Er*E0*Ro;
>> c1=sqrt(n1/m1);c2=sqrt(n2/m2);c3=sqrt(n3/m3);c4=sqrt(n4/m4);c5=sqrt(n5/m5);
>> g1=sqrt(n1*m1);g2=sqrt(n2*m2);g3=sqrt(n3*m3);g4=sqrt(n4*m4);g5=sqrt(n5*m5);
>> x=0.25:0.001:200;
>> Z1=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c1).*coth(abs(g1).*x);
>> Z2=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c2).*coth(abs(g2).*x);
>> Z3=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c3).*coth(abs(g3).*x);
>> Z4=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c4).*coth(abs(g4).*x);
>> Z5=Ro/pi*(log(2.*x/sqrt(d*h))-1.)*abs(c5).*coth(abs(g5).*x);
>> plot(x,Z1,x,Z2,x,Z3,x,Z4,x,Z5);
```

CALCULO DE LA IMPEDANCIA VARIABLE CON LA FRECUENCIA, PARA LONGITUDES DE 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 100 m y 200 m, Fig 4.12 a,b,c

Titulo='Calculo PT MODELO LT-Z(f) Ro=2000 Ohm y Varias longitudes';

```
>> Ro=2000.;d=0.01076;h=0.60;u0=4*pi*10E-7;E0=8.85*10E-12;Er=10;
>> l1=20;l2=30;l3=40;l4=50;l5=100;l6=200;
>> f=1:1:1200000;
>> x=2*pi*f;
>> c1=sqrt(i*x*u0/(1+i*x*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro));
>> g1=coth(abs(sqrt(i*x*u0*(1.+i*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro))))*l1;
```

```

>> Z1=Ro/pi*(log(2.*I1/sqrt(d*h))-1.).*abs(c1).*g1;
>> g2=coth(abs(sqrt(i*x*u0*(1.+i*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro)))^I2);
>> Z2=Ro/pi*(log(2.*I2/sqrt(d*h))-1.).*abs(c1).*g2;
>> g3=coth(abs(sqrt(i*x*u0*(1.+i*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro)))^I3);
>> Z3=Ro/pi*(log(2.*I3/sqrt(d*h))-1.).*abs(c1).*g3;
>> g4=coth(abs(sqrt(i*x*u0*(1.+i*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro)))^I4);
>> Z4=Ro/pi*(log(2.*I4/sqrt(d*h))-1.).*abs(c1).*g4;
>> g5=coth(abs(sqrt(i*x*u0*(1.+i*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro)))^I5);
>> Z5=Ro/pi*(log(2.*I5/sqrt(d*h))-1.).*abs(c1).*g5;
>> g6=coth(abs(sqrt(i*x*u0*(1.+i*Er*E0*Ro)*1./(2.*Ro)))^I6);
>> Z6=Ro/pi*(log(2.*I6/sqrt(d*h))-1.).*abs(c1).*g6;
>> plot(x,Z1,x,Z2,x,Z3,x,Z4,x,Z5,x,Z6);
>> plot(x,Z1,x,Z2,x,Z3,x,Z4,x,Z5,x,Z6);

```

Titulo='Curva de FUENTE DE CORRIENTE RAPIDA I(t)';

```

>> lo=10000;a=15500;b=999900;
>> t=0:0.0000001:0.5;
>> I=lo*(exp(-a*t)-exp(-b*t));
>> plot(t,I);

```

ANEXO C1

ECUACIONES DE ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS ELÉCTRICAS

1. ECUACIONES DE LAS ONDAS VIAJERAS DE D'ALEMBERT

A partir del modelo de la PT aproximado a una LT presentado en la figura 4.2, se calcula la tensión incremental en la Línea de Transmisión, mediante la ecuación.

$$- dv = (R + L \frac{d}{dt})i dx \quad (C1.1)$$

La variación de la onda de corriente inicial es causada por la fuga en el componente $(G)v \cdot dx$ y la corriente causada por la carga del condensador de línea a tierra, de ese modo la corriente incremental total se representa por la ecuación.

$$- di = (G + C \frac{d}{dt})v dx \quad (C1.2)$$

Donde:

R : Resistencia de la línea (Ω/m)

L : Inductancia de la línea (H/m)

C : La capacitancia de la línea a la tierra (F/m)

G : Fugas en los conductores de la línea (s/m)

dx : Longitud incremental de la línea (m).

v, dv : Tensión, tensión incremental ocasionado por corriente de impulso (V)

i, di : Corriente, Corriente incremental ocasionado por corriente de impulso (A)

Diferenciando las ecuaciones (C1.1) y (C1.2), y transformándolas en el dominio de Laplace, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (R + Ls) * (G + Cs) * V \quad (C1.3)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = (R + Ls) * (G + Cs) * i \quad (C1.4)$$

La solución de las ecuaciones de onda en el dominio del tiempo será:

$$v = e^{x\tau} F_1(t) + e^{-x\tau} F_2(t) \quad (C1.5)$$

$$i = e^{x\tau} F_1(t) + e^{-x\tau} F_2(t)$$

Las ecuaciones de Tensión y corriente para una Línea de Transmisión sin y con pérdidas, se expresará como sigue:

- a) En una Línea de Transmisión ideal, sin pérdidas, se considera: $R=0$ y $G=0$, el coeficiente de propagación de la onda se calcula por:

$$\Gamma = s\sqrt{LC} = \frac{s}{v} \quad (C1.6)$$

Aplicando la expansión de Taylor a la ecuación (C1.5), se obtiene:

$$e^{\pm sx} F(t) = F\left[t \pm \frac{x}{v}\right] \quad (C1.7)$$

- b) La Tensión y Corriente en una Línea de Transmisión con pérdidas, se obtiene resolviendo las ecuaciones (C1.3) y (C1.4), luego adaptando las ecuaciones C1.5 y C1.7 se obtienen las expresiones de las ondas de Tensión y Corriente.

$$V = V^+\left(t + \frac{x}{v}\right) + V^-\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (C1.8)$$

$$I = -\sqrt{\frac{C}{L}} * \left[V^+\left(t + \frac{x}{v}\right) - V^-\left(t - \frac{x}{v}\right) \right] \quad (C1.9)$$

El valor de la Impedancia Característica de Onda esta dado por:

$$Z_c = \frac{V^+}{I^+} = -\frac{V^-}{I^-} = \sqrt{\frac{R+jL}{G+jC}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (C1.10)$$

Se observa que la Z_c es independiente de la longitud de la línea, en la práctica su valor es aproximadamente de 200 Ω a 400 Ω para las líneas de transmisión aéreas y aproximadamente 30 Ω a 80 Ω para líneas con cables subterráneos.

1.1 Velocidad de propagación de la onda

La velocidad de propagación de la onda de impulso que viaja en la línea de transmisión con pérdidas, se determina a partir de las ecuaciones.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad o \quad \frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (C1.11)$$

Cuando la Onda de Tensión se propaga en la LT, la velocidad- v (m/s) puede ser calculada por la ecuación.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{m/s}) \quad (C1.12)$$

1.2 Reflexión y Refracción de Ondas Viajeras

Cuando la onda viaja a lo largo de una línea de transmisión y alcanza un punto de discontinuidad o corte en la línea continua, ocasionada por las estructuras de retención o

anclaje; una parte de la onda se refleja de regreso a lo largo de la línea y la otra parte se transmite a la siguiente sección, ver figura C1.1.

En un caso particular, si se considera la unión entre 2 Líneas, con impedancias características Z_1 y Z_2 , se obtiene una tensión y una corriente relativa a cada sección con su respectiva impedancia, según se indica:

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_1 \quad (C1.13)$$

La reflexión y refracción de la onda que tienen las tensiones V_1 y V_2 , las corrientes i_1 e i_2 se obtiene por las siguientes expresiones:

$$I'_1 = \frac{-V'_1}{Z_1} \quad (C1.14)$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \quad (C1.15)$$

Simplificando y aplicando las leyes de Kirchhoff en el punto de discontinuidad, se obtiene:

$$V_1 + V'_1 = V_2 \quad (C1.16.1)$$

$$I_1 + I'_1 = I_2 \quad (C1.16.2)$$

De las ecuaciones (C1.13), (C1.14) y (C1.15) se obtiene:

$$\frac{V_1}{Z_1} - \frac{V'_1}{Z_1} = \frac{V_2}{Z_2} \quad (C1.16.3)$$

Resolviendo las ecuaciones (C.15) se obtiene la reflexión y refracción de la onda de Tensión por las ecuaciones siguientes:

$$V'_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} * V_1 \quad (C1.17.1)$$

$$V_2 = \frac{2 * Z_2}{Z_2 + Z_1} * V_1 \quad (C1.17.2)$$

De las ecuaciones (C1.17) se obtienen los coeficientes de Reflexión y Transmisión:

$$\text{Coeficiente de Reflexión; } T_{\text{Reflex}} = \Gamma_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (C1.18)$$

$$\text{Coeficiente de Transmisión; } T_{\text{Refrac}} = \Gamma_2 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (C1.19)$$

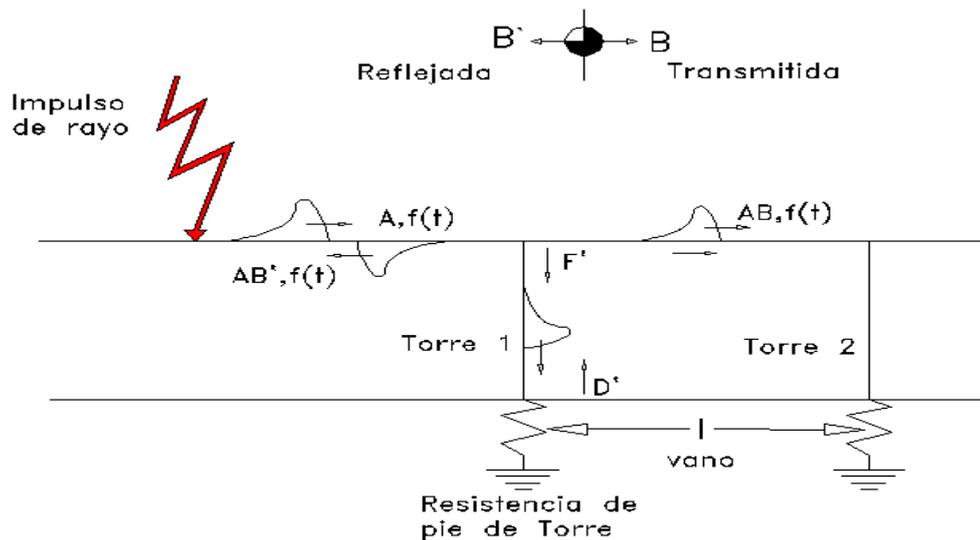


Figura C1.1 Esquema de distribución de la corriente de rayo en los elementos de Puesta a Tierra de una LT, cable de guarda, torre y Puesta a Tierra de pie de torre.

1.3 Diagrama de Enrejado o Lattice.

Las sucesivas reflexiones y refracciones de la onda viajera en la LT pueden llevar a un aumento de la Corriente o Tensión en algunos puntos a lo largo de la línea. El método llamado "Diagrama de Lattice" o enrejado fue desarrollado por [20] y [23], utilizado para determinar el efecto de la reflexión de las ondas de impulso que viajan en las LT con pérdidas, cuando una impedancia Z_c esta conectada en el terminal de una barra infinita, o cuando la impedancia interna es cero y termina recibiendo en el extremo una carga de impedancia Z .

Cuando inciden ondas en puntos de discontinuidad de la LT, una parte de la onda se refleja con un coeficiente (T_1) y la otra componente de la onda se refracta o trasmite con un coeficiente (T_2); y la onda sigue viajando a lo largo de la Línea Eléctrica; algunos autores usan un Factor de Refracción como (α), dado por.

$$\Gamma_1 = \alpha = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (C1.20)$$

Las subsecuentes reflexiones que pueden ocurrir con el coeficiente de reflexión respectivo (máximo -1). El aumento de tensión en cualquier punto a lo largo de la línea, puede ser estimado por la suma algebraica de las magnitudes de onda de Tensión después de cada refracción de la onda. En la figura C1.2 se muestra que la tensión en el extremo receptor del sistema, puede ser calculado tomando en cuenta los efectos de reflexión y refracción en cada uno de los puntos de discontinuidad. Los coeficientes son los operadores de Heaviside, cuando una onda de Impulso de Rayo incide en la cima de la torre produce

una onda refractada en el cable de tierra a una onda $A^*f(t)$, donde refleja una porción $A^*B^*f(t)$ hacia atrás en la dirección del origen y transmite una porción de $A^*B^*f(t)$ a la siguiente sección del conductor de tierra y también bajo la torre. Cuando la onda busca el pie de la torre refleja una porción $A^*B^*D^*f(t)$ atrás de la torre.

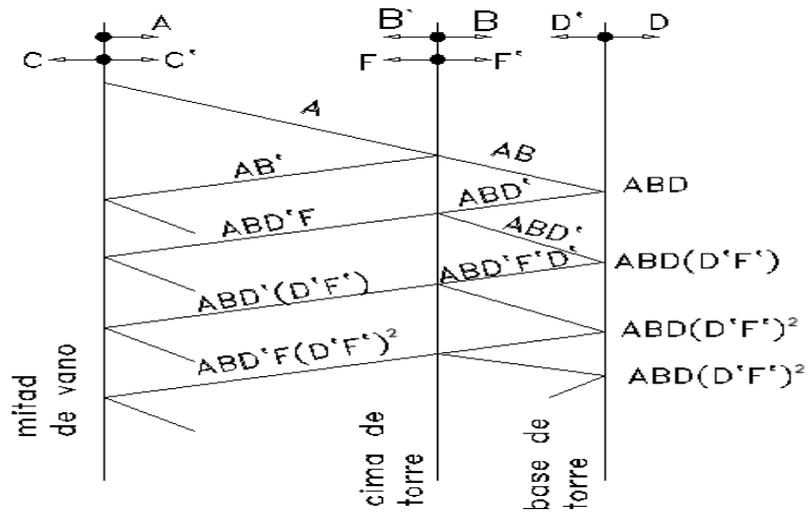
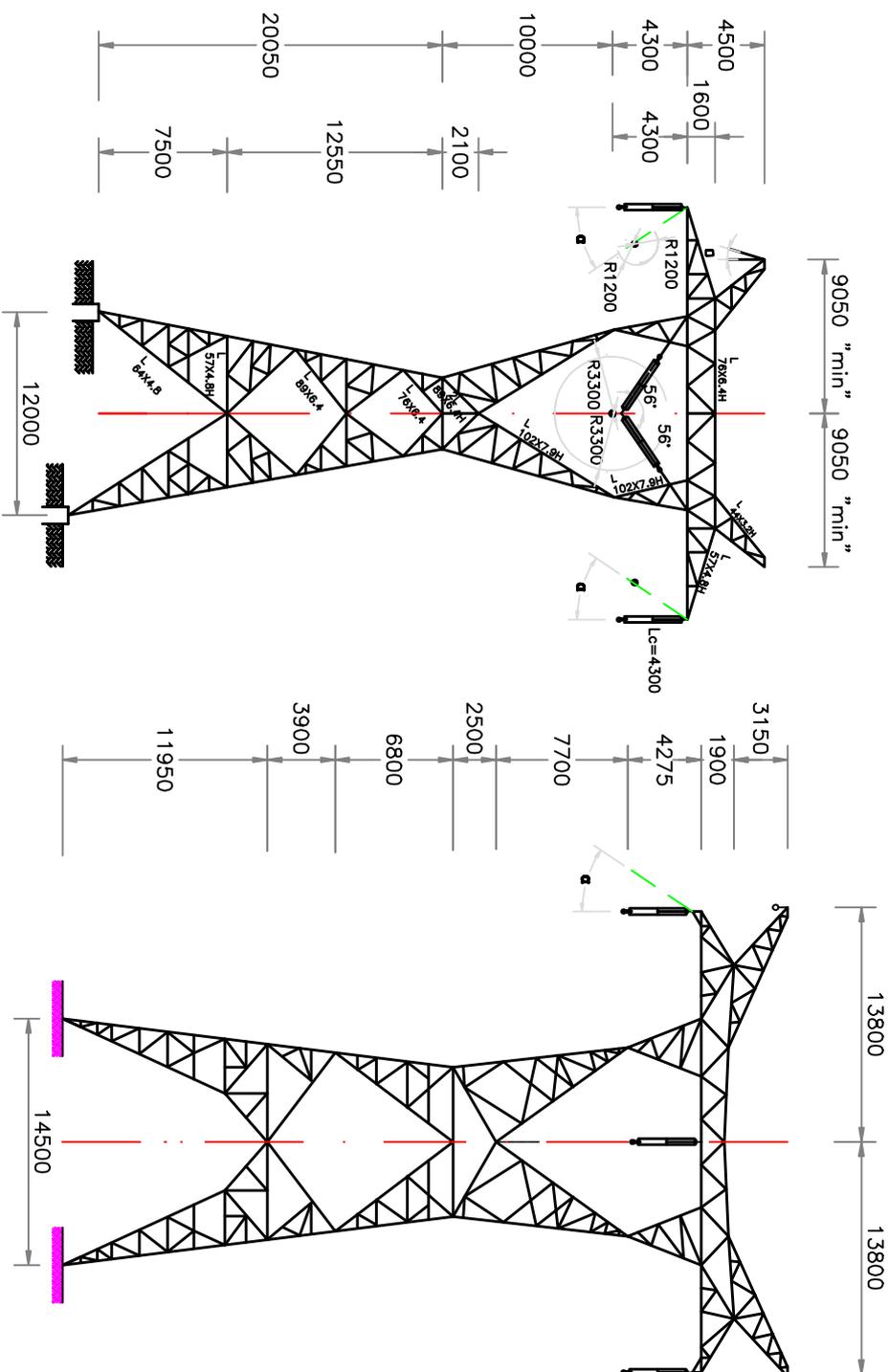


Figura C1.2 Diagrama de Enrejado desarrollado por [20], la onda de rayo se refleja o refracta en los puntos de discontinuidad de transición.

ANEXO D

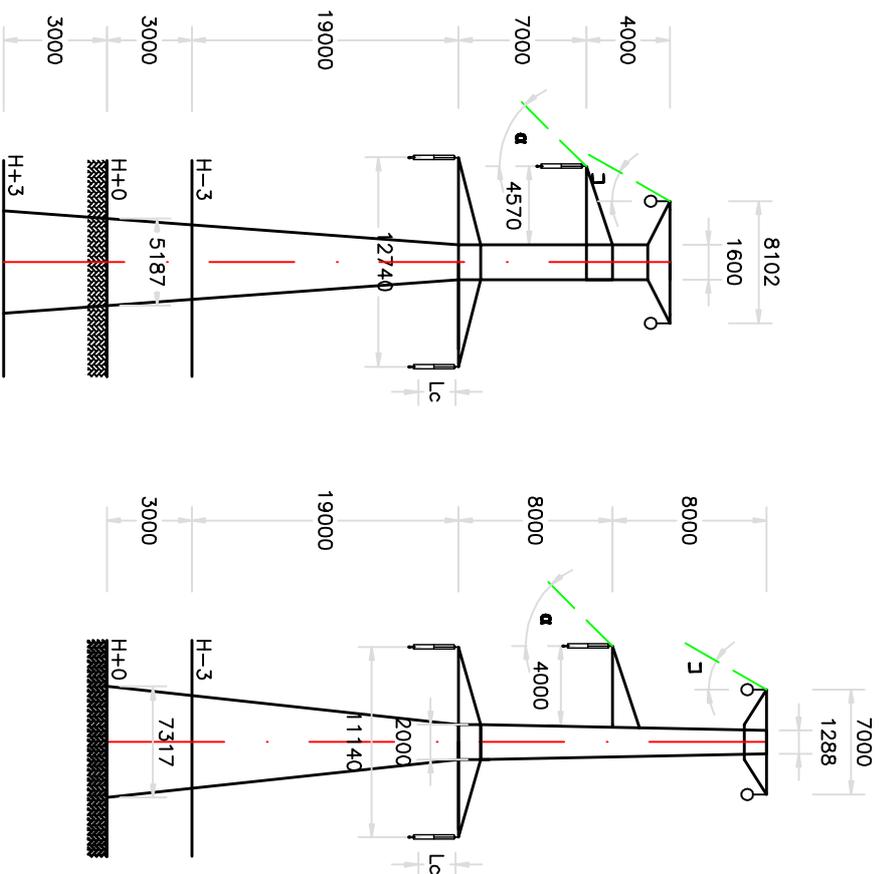
**LAMINAS DE CONFIGURACION DE ESTRUCTURAS Y
ARMADOS DE PUESTAS A TIERRA**



TIPO DE TORRE	³ S1 ³	³ S2 ³
FUNCION	SUSPENSION	SUSPENSION
ANGULO DE LINEA	1°	6°
VANO VIENTO	550	750
VANO GRAVANTE	550	750

REVISION:		DISENO:	E.E.P.
		DIBUJO:	E.E.A.
PAG : 240		LAMINA N°:	01

L.T. 500KV NEA-NOA
 ESTRUCTURAS TÍPICAS



TIPO DE TORRE	22A1.2T	22C1.2T
FUNCION	SUSPENSION	ANGULAR
ANGULO DE LINEA (m)	1°	30°
VANO VIENTO (m)	430	430
VANO PESO (m)	558	578

Lc = 3500 (21und)

REVISION:

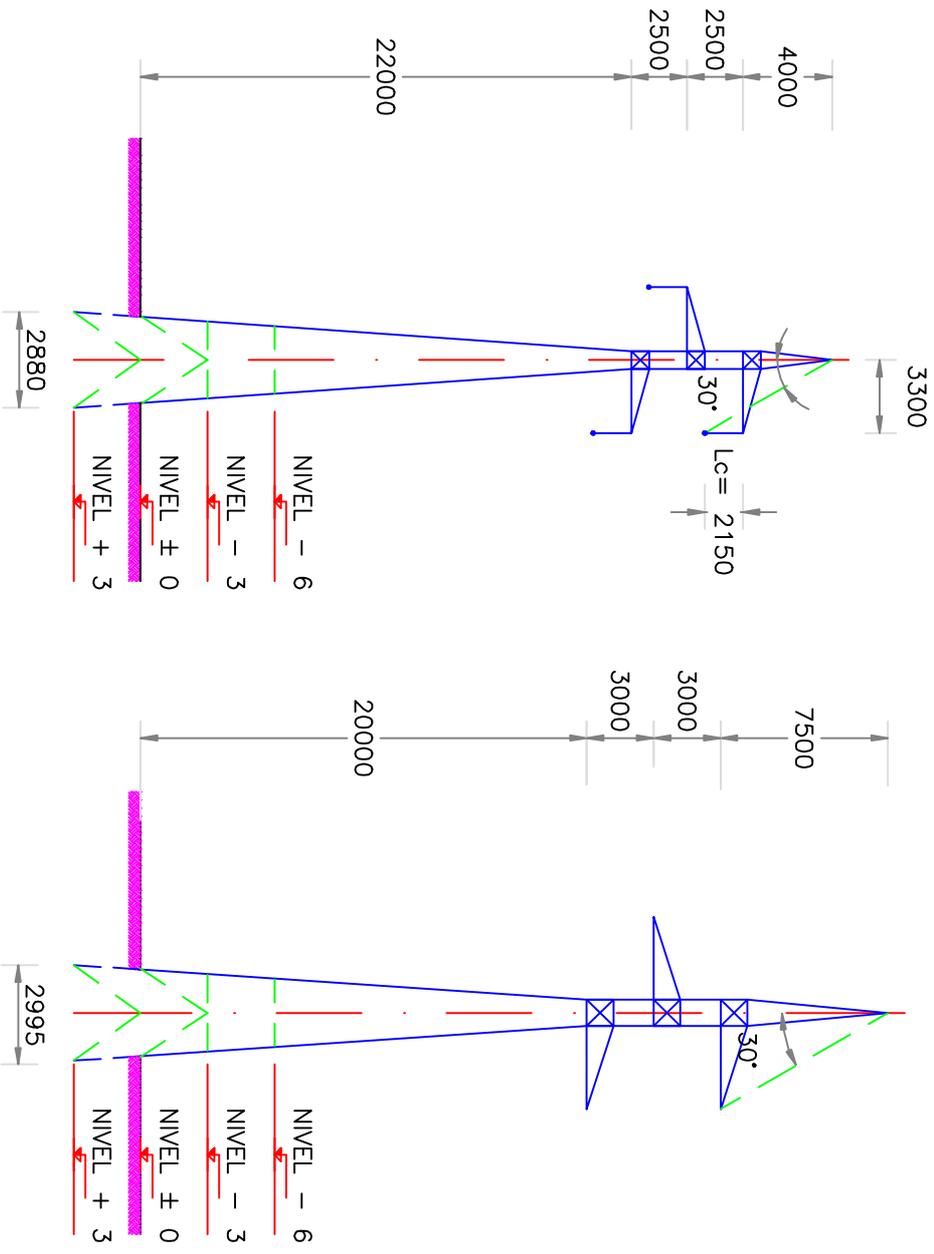
DISENO: E.E.P.
DIBUJO: E.E.A.

L.T. 220KV VIZCARRA-ANTAMINA

PAG : 241

LAMINA:

ESTRUCTURAS TÍPICAS

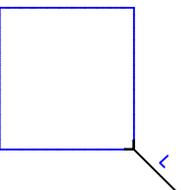


TIPO DE TORRE	"S1"	"A"
FUNCION	SUSPENSION NORMAL	ANCLAJE ANGULAR
ANGULO DE LINEA	1° (0°)	30° (0°)
VANO VIENTO	350m	350m
VANO GRAVANTE	600m	1450m

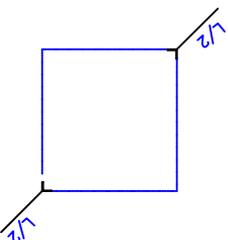
REVISION:		DISENO:	E.E.P.	L.T. 138kV HUALLANCA-TAYABAMBA ESTRUCTURAS TIPICAS
		DIBUJO:	E.E.A.	
PAG : 242		LAMINA N°: 03		

CONFIGURACION DEL ELECTRO DE PUESTA TIERRA CON RAMALES

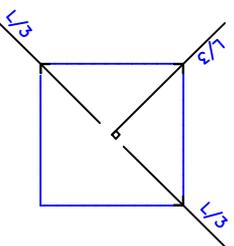
TIPO DE PUESTA A TIERRA: B1



TIPO DE PUESTA A TIERRA: B2



TIPO DE PUESTA A TIERRA: B3



TIPO DE PUESTA A TIERRA: B4

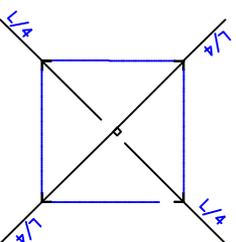
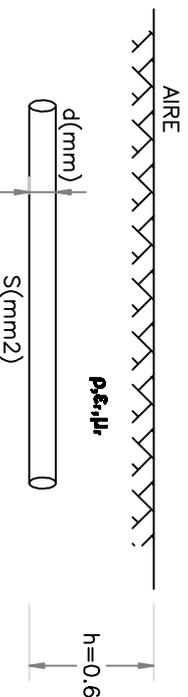


TABLA DE UTILIZACION DE PUESTA A TIERRA

TIPO P.T.A. TIERRA	RANGO DE RESISTIVIDAD DE TERRENO (ohm- m)	N° RAMALES	RESIST. EQUIVAL. CONDUCTOR (ohm)	LONG. (**)	PROFUN. L (m)	N° DE VARILLA
A(*)	0 - 100	1	15	10	0,30	1 6 2
B1	500	1	16	25	0,60	
B2	1000	2	15	60	0,60	(**)
B3	2000	3	20	90	0,60	
B4	3000	4	22,5	120	0,60	(**)

ELECTRODO HORIZONTAL ENTERRADO



CRITERIOS DE APLICACION DE PUESTAS A TIERRA

TIPO P _{suelo}	DESCRIPCION	RESISTENCIA MAXIMA Dh _m
(b)	REGIONES TIPO TRANSITABLES -ZONAS DE CULTIVO -ZONAS PARALELAS A CARRETERAS (DISTANCIA MAYOR A 20 m) -ZONA CON TRANSITO DE PERSONAS POCO FRECUENTE	25
(d)	REGIONES TRANSITABLES -ZONAS PARALELAS A CARRETERAS (DISTANCIA MENOR 20 m) -ZONA CON POSIBLE TRANSITO DE PERSONAS	15

NOTA:

- (*) EL N° DE VARILLAS SE CALCULAN SEGÚN LA NECESIDAD DEL PTO.
- (**) LA LONGITUD SE AJUSTA PARA LONG. EFICAZ(LIMITE RESPUESTA A HF).
- (d) A DEFINIRSE EN EL DISEÑO DE APLICACION.
- (b) P_{suelo} y E_s A DETERMINARSE EN INVESTIGACION Y MEDICION DE CAMPO.

REVISION:	DISEÑO:	E.E.P.
	DIBUJO:	E.E.A.
PAG : 243	LAMINA N°:	04

ARMADOS DE PUESTA A TIERRA CON ELECTRODOS TÍPICOS