

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**"OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MALLA A
TIERRA SEGÚN IEEE - 80 2000, UTILIZANDO
LOS CABLES DE GUARDA EN SUBESTACIÓN
MILPO"**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

ELABORADO POR

**CHRISTIAN EDUARDO OROSCO PARRAGA
MIGUEL ANGEL CHUQUIMAJO VALENCIA**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. A. C. V.', is written over the name Miguel Angel Chuquimajo Valencia.

Callao, Agosto, 2017

PERÚ



**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA

**"OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MALLA A TIERRA
SEGÚN IEEE - 80 2000, UTILIZANDO LOS CABLES
DE GUARDA EN SUBESTACIÓN MILPO"**

ELABORADO POR:

**CHRISTIAN EDUARDO OROSCO PARRAGA
MIGUEL ANGEL CHUQUIMAJO VALENCIA**

ASESOR:

**DR. ING. JUAN HERBER GRADOS
GAMARRA CALIFICACIÓN:
14(CATORCE)**


**DR. ING. MARCELO NEMESIO
DAMAS NIÑO**
Presidente del Jurado


**DR. ING. SANTIAGO LINDER
RUBIÑOS JIMÉNEZ**
Secretario


**ING. ERNESTO RAMOS
TORRES**
Vocal

CALLAO - PERÚ

2017

DEDICATORIA

Al creador por su amor y misericordia por cumplir el anhelo de nuestros corazones.

A mis padres; Rómulo Orosco Gómez e Ignacia Parraga Casimiro.

A mi esposa Ada Espinoza Granados y a mi hijo Crissair Orosco Espinoza.

A mis padres; Virgilio Chuquimajo Ccarhuaz y Leonarda Valencia Espillco.

A mi hermana Mery Luz Chuquimajo Valencia.

A nuestras familias por la fortaleza y apoyo en cada etapa de esta investigación.

Los autores.

AGRADECIMIENTO

A Dios todo poderoso por bendecirnos y darnos el privilegio de existir.
A nuestra alma mater la Universidad Nacional del Callao, especialmente a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, por habernos aceptado como estudiantes de pregrado de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica, a nuestros profesores, por la enseñanza y experiencia brindada en las aulas de nuestra querida facultad.

A nuestro respetable asesor y guiador de tesis el Dr. Ingeniero Juan Herber Grados Gamarra; por su valioso conocimiento e inigualable erudición del tema.
A nuestro director de escuela el Ingeniero Juan Tejada Cabanillas; por colaborar incondicionalmente durante el desarrollo de nuestra carrera.

A mí padre el Ingeniero Rómulo Orosco Gómez, 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.

A mí padrino el Ingeniero Hubler Montes Arroyo, quien ha contribuido con sus comentarios para darle claridad a esta tesis.

A nuestros compañeros de trabajo que se desempeñan profesionalmente en las áreas de subestaciones eléctricas y de líneas de transmisión; por el apoyo en referencias bibliográficas.

A nuestras familias por el apoyo moral y emocional, en el día a día. para alcanzar nuestras metas trazadas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE GRÁFICOS	12
ÍNDICE DE TABLAS	13
GLOSARIO DE ABREVIACIONES	14
RESUMEN	20
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.1. Identificación del problema.	22
1.2. Formulación del problema.....	22
1.2.1. Problema general.....	22
1.2.2. Problemas específicos.....	22
1.3. Objetivo de la investigación.	23
1.3.1. Objetivo general.....	23
1.3.2. Objetivos específicos.....	23
1.4. Justificación de la investigación.....	24
1.4 .1. Económica	24
1.4 .2. Teórica.....	24
1.5. Importancia.	24
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Antecedentes del estudio.	26
2.2. Fundamento filosófico.	37
2.2.1. Fundamento ontológico.....	37
2.2.2 Fundamento metodológico.....	38
2.2.3 Fundamento epistemológico.....	40
2.3. Marco conceptual.	44
2.3.1. Cálculo de parámetros eléctricos en las líneas de transmisión y distribución.....	44

2.3.2. Parámetros eléctricos de las puestas a tierra en las líneas de transmisión.....	66
2.3.3. Modelado de puesta tierra como circuito “R-L” desarrollado por J.G. Anderson.....	78
2.3.4. Distribución de la corriente de cortocircuito en la red de tierra de la subestación y cables de guarda.....	84
2.3.5. Parámetros y conceptos básicos para diseñar una malla a tierra según IEEE Std 80-2000.....	93
2.4. Glosario de términos.....	108
CAPITULO III: VARIABLES E HIPÓTESIS.....	114
3.1. Variables de la investigación.....	114
3.2 Operacionalización de las variables.....	115
3.3. Hipótesis.....	117
3.3.1. Hipótesis general.....	117
3.3.2. Hipótesis específicas.....	117
CAPITULO IV: METODOLOGÍA.....	119
4.1. Tipo de investigación.....	119
4.2. Diseño de la investigación.....	119
4.2.1. Toma de datos en campo.....	119
4.3. Población y muestra.....	120
4.3.1. Población.....	120
4.3.2. Muestra.....	121
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	121
4.5 Procedimientos de recolección de datos.....	123
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	126
CAPITULO V: RESULTADOS.....	171
CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	173
CAPITULO VII: CONCLUSIONES.....	180

CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES.....	182
CAPITULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	184
ANEXOS.....	186
ANEXO N° 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA	
ANEXO N° 2: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÉTODO OPTIMIZADO A PARTIR DE LA IEEE Std 80-2000	
ANEXO N° 3: PROTOCOLOS DE PRUEBA DE MALLA A TIERRA DE LA SSEE MILPO	
ANEXO N° 4: VALORIZACIÓN DE MALLA A TIERRA TRADICIONAL Y OPTIMIZADOPARTIR DE LA IEEE Std 80-2000	
ANEXO N° 5: LUGAR GEOMÉTRICO DEL FACTOR DE DIVISOR DE CORRIENTE MEDIANTE "MAT LAB"	

TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	26
Figura N°1: Esquema de las impedancias de la puesta a tierra.....	26
Figura N° 2: Tipo de impedancia subtransitoria en la torre de transmisión durante el flameo inverso.....	28
Figura N° 3: Mapa de nivel isocerámico.....	31
Figura N° 4: Diagrama unifilar proyectado.....	33
Figura N° 5: Estructura metálica de celosía.....	35
Figura N° 6: Estructura metálica de celosía para doble terna.....	36
Figura N° 7: Estructura metálica de celosía para doble terna.....	37
Figura N°8: Circuito para determinar los factores de divisor de corriente. ...	42
Figura N°9: Intensidad del campo magnético dentro y fuera del conductor. ...	49
Figura N°10: Distancias comprendidas entre un flujo interno y externo de un conductor.....	50
Figura N°11: Análisis de un flujo ligado interno de un conductor.....	50
Figura N°12: Análisis de un flujo ligado externo de un conductor.....	51
Figura N° 13: Flujo ligado debido a un grupo de conductores.	53
Figura N° 14: Corriente sobre un suelo perfectamente conductor.....	55
Figura N°15: Modelamiento mediante método de imágenes.....	56
Figura N°16: Geometría de la torre para 2 conductores genéricos.	60
Figura N°17.1: Acoplamiento de línea de 3 fases con un cable de guarda... 	64
Figura N°17.2: Acoplamiento de línea de 3 fases con un cable de guarda... 	65
Figura N°18.1: Descarga atmosférica en el vano del cable de guarda, Línea de transmisión 138 kV.	67
Figura N°18.2: Descarga atmosférica en torre. Línea de transmisión 138 kV. 	67
Figura N°19: Forma de onda ideal de un rayo.	69
Figura N°20: Flameo inverso en una torre de transmisión.....	70
Figura N°21: Distancia que recorre el impulso de onda.	76

Figura N°22: Tipos de contrapesos en líneas de transmisión.	78
Figura N° 23: Circuitos equivalentes de puesta a tierra, sometidos a Corriente de Rayo, modelo en baja y alta frecuencia.	81
Figura N°24: Línea de transmisión Paragsha II – Milpo 138kV/ SE N°3- Milpo 50kV (1.3 km de distancia).....	85
Figura N°25: Línea de transmisión Paragsha II – Milpo 138kV (11 km de distancia).	85
Figura N°26: Línea de distribución Milpo - Chicrin (Atacocha) / Candelaria – Milpo 50 kV (1.13 km de distancia).	86
Figura N°27: Esquema de impedancias de la red de tierra. Línea de distribución Milpo - Chicrín (Atacocha) / Candelaria – Milpo 50 kV. Línea diseñada con un solo cable de guarda.	87
Figura N°28: Esquema de impedancias de la red de tierra. Línea de transmisión Paragsha- Milpo 138kV/ Milpo –SE N°3 50 kV (12 km de distancia). Línea diseñada con dos cables de guarda.....	87
Figura N° 29: Línea de distribución Milpo - Chicrín (Atacocha) / Candelaria – Milpo 50 kV.	88
Figura N° 30: Esquema de impedancias de la red de tierra. Línea de transmisión Paragsha- Milpo 138kV/ Milpo –SE N°3 50 kV (12 km de distancia).....	93
Figura N°31: Método de Wenner o de los cuatro electrodos.....	102
CAPITULO III: VARIABLES E HIPÓTESIS.....	114
CAPITULO IV: METODOLOGÍA.	119
Figura N°32: Líneas de medición transversal y ortogonal de la SSEE Milpo.	121
Figura N°33: Electrodo del telurómetro distribuido en 4 puntos equidistantes.	122
Figura N°34: Diagrama de bloques para el cálculo de la malla a tierra.....	126
Figura N°35: Esquema del sistema de secuencia cero de la subestación Milpo.	134
Figura N°36: Vista de planta de la SSEE Milpo 138/50/10kV.....	135
Figura N°37: Diagrama unifilar de la SSEE Milpo 138/50/10kV configurado en el Digsilent.....	136
Figura N°38: Área total de la SSEE Milpo 138/50/10kV.	145
Figura N°39: Puntos U y V donde se anclan los cables de guarda.....	149
Figura N°40: Impedancias de las torres de transmisión.....	151

Figura N° 41: Punto D donde se ancla el cable de guarda.	151
Figura N°42: Impedancias de la torre de distribución.	153
Figura N°43: Impedancias de la torre de distribución.	155
Figura N°44: Trayecto y disminución del potencial respecto a la distancia de línea a partir de la subestación.....	160
Figura N°45: Medición final de resistencias de puesta a tierra en las torres de transmisión.....	162
Figura N°46: Instalación de contrapesos en las torres de transmisión (Cía. Milpo).	163
Figura N°47: Relleno y compactado de contrapeso con tierra cernida. (Cía. Milpo).	163
CAPITULO V: RESULTADOS.....	171
CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	173
CAPITULO VII: CONCLUSIONES.	180
CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES.	182
CAPITULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	184
ANEXOS	186

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1: Gráfica de Garrett y Pattel para determinar (S_f).....	29
Gráfico N°2: Flameo inverso en una torre de transmisión.....	71
Gráfico N°3: Variación de la impedancia transitoria (Z) y efecto del número . de contrapesos (N).....	72
Gráfico N°4: Onda normalizada para descargas atmosféricas.....	75
Gráfico N° 5: Inductancia eficaz de la torre como función de impedancia de onda de la torre (ZT) y Resistencia de puesta a tierra, para Impedancia de cable de guarda equivalente ($Z_{cg} = 200 \Omega$).....	84
Gráfico N° 6: Gráfica de Sunde.....	99
Gráfico N°7: Valores de resistividades según la distancia.	132
Gráfico N°8: Gráfico aplicado de Sunde.	133
Gráfico N°9: Falla bifásica $IRMS$ fase A; $IRMS$ fase B vs Tiempo de falla.	137
Gráfico N° 10: Falla monofásica $IRMS$ en fase A vs Tiempo de falla.	138
Gráfico N° 11: Falla bifásica $IRMS$ fase A; $IRMS$ fase B vs Tiempo de falla.....	138
Gráfico N° 12: Falla monofásica $IRMS$ en fase A vs Tiempo de falla.	139
Gráfico N°13: Gráfica del factor de reducción (CS).....	142
Gráfico N°14: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.....	176
Gráfico N°15: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.....	177
Gráfico N°16: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.....	178
Gráfico N°17: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.....	179

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Variación de la impedancia inicial según el número de cables de contrapeso.....	73
Tabla N°2: Tabla de parámetros de cables de guarda y torres metálicas de líneas de transmisión: según el nivel de tensión en torre (ZT).....	83
Tabla N°3: Constante de materiales.	105
Tabla: N°4: Constante de materiales.....	106
Tabla N°5: Variables y objetivos de la investigación.....	116
Tabla N° 6: Muestra de resistividades N°1.....	124
Tabla N° 7: Muestra de resistividades N°2.....	124
Tabla N° 8: Muestra de resistividades N°3.....	124
Tabla N° 9: Muestra de resistividades N°4.....	124
Tabla N° 10: Muestra de resistividades N°5.....	124
Tabla N° 11: Muestra de resistividades N°6.....	125
Tabla N° 12: Muestra de resistividades N°7.....	125
Tabla N° 13: Muestra de resistividades N°8.....	125
Tabla N° 14: Muestra de resistividades N°9.....	125
Tabla N° 15: Muestra de resistividades N°10.....	125
Tabla N°16: Datos de campo procesados para distancias de 1 y 2 m.....	127
Tabla N°17: Datos de campo procesados para distancias de 4 y 8 m.....	127
Tabla N°18: Datos de campo procesados.....	128
Tabla N°19: Tabla de distribución normal.....	130
Tabla N°20: Tabla de distribución normal.....	131
Tabla N°21: Instalación de contrapesos para reducción de resistencias de puestas a tierra en torres de transmisión.....	161
Tabla N°22: impedancia equivalente final con 5 contrapesos para torres de distribución.....	162

GLOSARIO DE ABREVIACIONES

Símbolo	Descripción
A	Área (m ²).
AC	Altern Current.
AAAC	Cable de aluminio con aleación de aluminio.
B	Campo magnético (T).
Cía.	Compañía.
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (Consejo Internacional en Grandes Redes Eléctricas).
C.A.	Corriente alterna.
C	Conductor de fase.
COES	Comité de operación económica del sistema.
°C	Grados Celsius.
<i>C_p</i>	Factor de crecimiento de la subestación.
CNE	Código nacional de electricidad.
D	Lado de una rejilla cuadrada de malla a tierra (m).
DC	Direct current.
<i>De</i>	Profundidad equivalente de retorno (m).
<i>D_f</i>	Factor de decremento.
EAT	Extra alta tensión.
<i>f</i>	Frecuencia (Hz).
FEM	Fuerza electromotriz (V).
FMM	Fuerza magnetomotriz (Ampere-vuelta).
CG	Cable de guarda.
GS	Superficie del suelo.
<i>GMR</i>	Radio medio geométrico del conductor (m).
GR	Tierra de referencia.
GPR	Ground potential rise (margen de potencial a tierra).

Hz	Hertz.
H_{PC}	Altura del cable de guarda al suelo (m).
H	Intensidad del campo magnético (A/m).
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineering.
I_G	Corriente de diseño de malla (A).
I_F	Corriente de falla a tierra en RMS (kA).
I_B	Corriente limite tolerable por el cuerpo (A).
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales.
IEEE Std 80-2000	Norma IEEE estándar 80, publicación del año 2000.
kV	Kilovoltio.
km	Kilómetro.
LE	Inductancia equivalente de la torre (μ H).
L_C	Longitud de varilla vertical (m).
L, L	Inductancia (H) ó (μ H).
LT	Línea de transmisión.
lt/m^2	Unidad de Precipitación.
l	Distancia través del paso de integración (m).
MATLAB	Matrix Laboratory (software de simulación).
M.A.T	Media y alta tensión.
MVA	Mega volt-ampere.
mm^2	Milímetros cuadrados.
N_G	Nivel de precipitación al año (rayos/km ² /año).
N	Número de espiras para bobinas y flujo ligado de un conductor.
ONAN	Aceite natural con ventilación natural.
ONAF	Aceite natural con ventilación forzada.
OPGW	Cable de fibra óptica con protección externa de cable de aterramiento.
PT	Puesta (s) a tierra.
p.u.	Por unidad.
RE	Resistencia equivalente de puesta a tierra (Ω).
R	Resistencia (Ω).

RMS	Valor eficaz de un parámetro.
R_{DC}	Resistencia en corriente directa (Ω).
R_g	Resistencia de malla a tierra (Ω).
S_f	Factor divisor de corriente.
Std	Estándar.
SSEE	Subestación eléctrica.
SET	Subestación eléctrica de transmisión.
SEIN	Sistema eléctrico interconectado.
S	Desviación estándar.
SI	Sistema internacional de unidades.
SPAT	Sistema de puesta a tierra.
tf	Tiempo de flameo inverso (μs).
TR	Transformador.
TP	Transformador de potencia.
T_a	Constante del tiempo de la componente DC (ms).
T_d	Días de tormenta al año (torm/año).
UAT	Ultra alta tensión.
VT	Voltaje de torre (V).
vs	Versus.
VC	Voltaje de conductor (V).
VA	Voltaje de aislamiento (V).
w	Frecuencia angular (rad/s).
X/R	Relación de la impedancia sub-transitoria de falla.
Z_S	Impedancia propia (Ω).
Z_M	Impedancia mutua (Ω).
Z_g ó Z_{cg}	Impedancia del cable de guarda (Ω).
Z_{cg-T}	Impedancia equivalente de cable de guarda en línea de transmisión (Ω).
Z_{cg-D}	Impedancia equivalente de cable de guarda en línea de distribución (Ω).

Z_{gUV}	Impedancia de cable de guarda para dos ternas U y V (Ω).
Z_t	Impedancia de torre. (Ω).
Z_0	Impedancia de secuencia cero (Ω).
Z_{fg}	Impedancia mutua entre cable de guarda y línea (Ω).
Z_1	Impedancia de secuencia positiva (Ω).
Z_2	Impedancia de secuencia negativa (Ω).
Z_{LT}	Impedancia de línea de transmisión (Ω).
Z_{LD}	Impedancia de línea de distribución (Ω).
e_0	Permeabilidad magnética en el vacío ($8.8541878176 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$).
m	Metro.
Ω	Ohm.
ρ_V	Densidad de carga volumétrica (C/m^3).
\vec{E}	Campo eléctrico (C/m).
$\vec{\nabla}$	Gradiente de.
$\vec{\nabla} \times$	Rotacional de.
μ_0	Permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$).
J	Densidad de corriente (A/mm^2).
I_T	Corriente total (A)
R_g	Resistencia de malla a tierra (Ω).
E_m	Tensión de retícula (V).
I_g	Corriente de diseño de malla (kA).
K_m	Factor geométrico de espaciamento de la malla.
K_S	Factor de corrección de paso.
K_i	Factor de corrección por geometría en forma de malla.
K_{ii}	Factor de corrección sobre los efectos en la esquina de la malla.
K_h	Factor de corrección sobre los efectos en la profundidad de la malla.
E_{t-70}	Tensión de toque a 70 kg (V).

E_{S-70}	Tensión de paso a 70 kg (V).
E_S	Tensión de paso en el diseño (V).
mm	Milímetros.
ρ	Resistividad del terreno (Ω -m).
ΔR	Variación de resistencia (Ω).
π	Pi (3.14159).
Φ	Flujo del campo magnético (Wb).
ψ	Flujo ligado al campo magnético (Wb).
P y Q	Series infinitas de la "Ecuación de Carson".
α	En relación a la ecuación de onda impulso, representa constante asociada al tiempo de frente de onda.
β	En relación a la ecuación de onda impulso, representa constante asociada al tiempo de cola de onda.
I_0	En relación a la ecuación de onda impulso, representa al valor máximo de onda de rayo (kA).
μs	Microsegundos.
φ	En relación al modelo equivalente R-L, representa al factor de acoplamiento.
Z_T	En relación al modelo equivalente R-L, representa la impedancia de la torre (Ω).
τ_T	Tiempo de viaje de la onda en la torre (μs).
Z_S	En relación al modelo equivalente R-L, representa la impedancia de cable de guarda (Ω).
Z_w	Impedancia de Impulso de la torre (Ω).
$Z_{eq_{total}}$	Impedancia equivalente total de la red de tierra de la línea de transmisión o distribución (Ω).
n_{cg}	Número de cables de guarda de una línea aérea.
C_e	Capacitancia de potencial-potencial (μF).
C_0	Capacitancia de potencial-masa (μF).
I_C	Corriente de fuga de la capacitancia (A).
ρ_s	Resistividad de la capa superficial (Ω -m).

h_s	Espesor de la capa de grava (m).
C_s	Factor de disminución de la capa superficial.
ρ_a	Resistividad aparente (Ω -m).
a	Distancia entre electrodos adyacentes en (m).
b	Profundidad de enterramiento de electrodos (m).
t_s	Duración de choque (s).
ρ_1, ρ_2	Resistividad máxima y mínima (Ω).
$1\emptyset, 2\emptyset, 3\emptyset$	Sistema monofásico, bifásico y trifásico.
Lx, Ly	Lado mayor y lado menor (m).
Lr	Longitud promedio de varillas (m).
n_r	Número de varillas verticales.
$2ac$	Diámetro del conductor de malla (m).
H	Profundidad de la malla (m).

RESUMEN

En la presente tesis, se desarrolla un diseño optimizado de la SSEE Milpo 138/50/10kV; a partir del diseño tradicional de la malla a tierra según: IEEE Std 80-2000 (Guía para la seguridad en la puesta a tierra en Subestaciones de C.A.) y IEEE Std 81-2000 (Guía para medición la resistividad de tierra. Impedancia de tierra y potenciales de tierra en sistemas de tierra); con dichas normas obtenemos niveles de tensión de toque y tensión de paso; seguros dentro y en las proximidades de la subestación.

El diseño se realizará en base al procedimiento dado por la IEEE Std 80-2000; dentro de este procedimiento tenemos el método utilizado por la norma para determinar el factor de divisor de corriente (método de Endrenyi); el cual se reemplazará por la expresión deducida y elaborada en esta tesis y se realizará la comparación de ambos para elegir el resultado más favorable para optimizar el diseño; la otra parte de la optimización se da en la línea de trasmisión y distribución mediante el aumento de contrapesos disminuyendo así la resistencia de puesta a tierra de las torres de alta tensión y en consecuencia también disminución de la corriente de falla hacia la malla a tierra; mejorando así el diseño en el aspecto económico y en seguridad.

ABSTRACT

This present thesis, develops an optimized design from SSEE Milpo 138/50/10kV the traditional design of the mesh to ground: IEEE Std 80-2000 (Guide to Grounding Safety in AC Substations) and IEEE Std 81-2000 (Guide to Measuring Ground Resistivity, Ground Impedance and Ground Potentials in Ground Systems); with such standards we obtain levels of touch voltage and pitch voltage; insurance within and near the substation.

The design is based on the procedure given by IEEE Std 80-2000; Within this method with the method used by the standard to determine the current divider factor (Endrenyi method); which was replaced by the expression was deduced and elaborated in this thesis report and the comparison of two results was made to choose the most favorable result to optimize the design; the other part of the optimization is given by the transmission and distribution line during the increase of the counterweights to decrease the resistance of putting a ground of the high voltage towers. In summary the optimization of this thesis report is in the reduction of the distribution of fault current to the mesh in the ground with the improvement of the design both economically and in operation.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación del problema.

¿Es posible optimizar el diseño de la malla a tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV; según las normas internacionales IEEE Std 80-2000, considerando los cables de guarda (elementos pasivos) y la malla a tierra?

1.2. Formulación del problema.

1.2.1. Problema general.

¿Cómo obtener una expresión analítica que permita optimizar el diseño de la malla a tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV; según el procedimiento de la IEEE Std 80-2000?

1.2.2. Problemas específicos.

- a. ¿Cómo se determinaría la impedancia equivalente de los cables guarda, en el cálculo del factor de divisor de corriente, teniendo en consideración las diferentes impedancias que componen la línea de transmisión y distribución; cuando ocurre una falla a tierra en la SSEE Milpo 138/50/10kV?
- b. ¿Cómo interviene el factor de divisor de corriente en la distribución de la corriente de falla a tierra; por la malla a tierra y los cables de guarda; cuando

descarga una falla a tierra en la barra de alta o media tensión de la SSEE Milpo 138/50/10kV?

c. ¿Cuál sería el caso más desfavorable de la resistencia de la malla a tierra cuando esta entra a la etapa de operación?

d. ¿Qué tipos de falla existen en una subestación de potencia de alta tensión con conexiones de neutros a tierra?

1.3. Objetivo de la investigación.

1.3.1. Objetivo general.

Encontrar una expresión analítica que permita disminuir el efecto de las impedancias de los cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución, impedancias y resistencias de puestas a tierra de las torres de transmisión y distribución; tal que el factor de divisor de corriente sea el más óptimo para el diseño de la malla tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV.

1.3.2. Objetivos específicos.

- a. Determinar una expresión analítica para el cálculo de la impedancia equivalente de todos los elementos que involucran el cable de guarda a través del trayecto de la línea de transmisión y distribución, relacionarla con el factor de divisor de corriente, para obtener la corriente de diseño de la malla.

- b. Determinar qué impedancias pueden reducir el factor de divisor de corriente optimizando las impedancias en las torres y las puestas a tierra de las torres con métodos reconocidos en libros y experiencias personales en la práctica.
- c. Determinar el valor de resistencia de malla a tierra más desfavorable para un diseño que vaya de acuerdo a la etapa de operación.
- d. Determinar qué tipo de falla produce la corriente máxima de cortocircuito y dónde se ubica en el diagrama unifilar de la SSEE Milpo 138/50/10kV.

1.4. Justificación de la investigación.

1.4 .1. Económica.

Realizar un ahorro en el cable de cobre horizontal y accesorios eléctricos utilizados en la malla a tierra, ya que, al disminuir la tensión de toque aumenta la dimensión de la rejilla.

1.4 .2. Teórica.

Realizar un análisis teórico detallado de los cables de guarda, de las torres de transmisión y distribución, y su influencia en el diseño de la malla a tierra, ya que la IEEE Std 80-2000 y libros de autores relacionados al diseño de malla a tierra; no se detalla cómo se obtienen las ecuaciones que determinan la impedancia equivalente de los cables de guarda y parámetros que intervienen; para que sea utilizado como referente en posteriores investigaciones.

1.5. Importancia.

Se basa en conocer el sistema eléctrico de secuencia cero, ya que su operación se da en tiempos cortos y cuando existe una falla a tierra (cortocircuito). Es tan complejo debido a su característica de estar interconectado con otras redes, además para su estudio se requiere trabajar en el plano complejo a partir de dos dimensiones debido a que en la escala real no se podría completar su estudio.

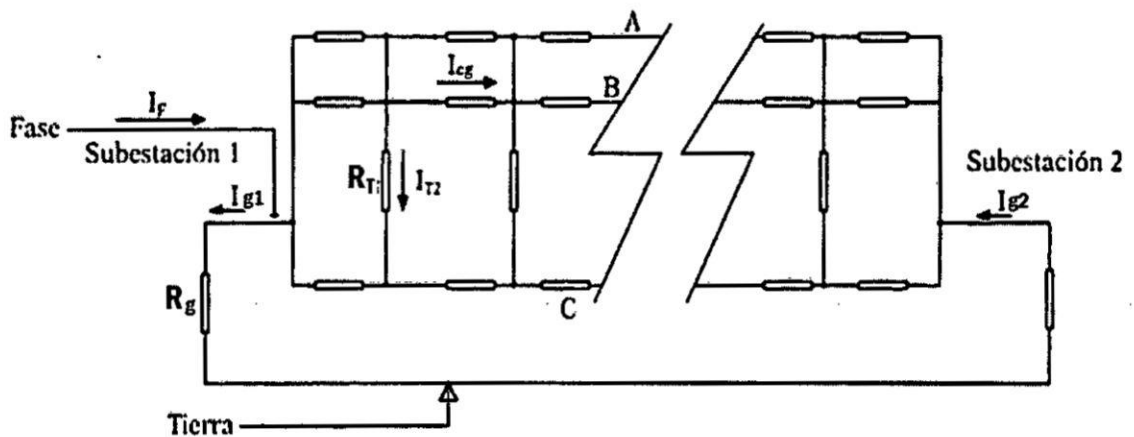
El estudio de los cable de guarda también es importante ,ya que, radica en conocer qué elementos se involucran cuando recorren distancias largas y la influencia de la superficie de la tierra sobre dicho cable.

En cuanto al diseño del factor de divisor de corriente, la IEEE Std 80-2000 recomienda usar dos métodos: el primero es un método aproximado de gráficas denominado Garrett and Patel; el segundo es el método aplicado en esta tesis, el método Endrenyi, es un método analítico que muestra valores más exactos que el método anterior. El método presentado en esta *investigación* es un método elaborado a partir del método de Endrenyi, originando así un margen mínimo de error de diseño.

2.1. Antecedentes de estudio.

Con respecto a estudios sobre el análisis de los cables de guarda y el sistema de secuencia cero se puede tener más información en autores de libros de alta tensión como "Transporte de la energía eléctrica: Líneas aéreas a M.A.T. y C.A.", cuyo autor José Luis Tora Galván detalla temas y casos de estudios de cortocircuitos en líneas de transmisión, además este libro representa un esquema de la red equivalente de tierra con sus respectivas impedancias.

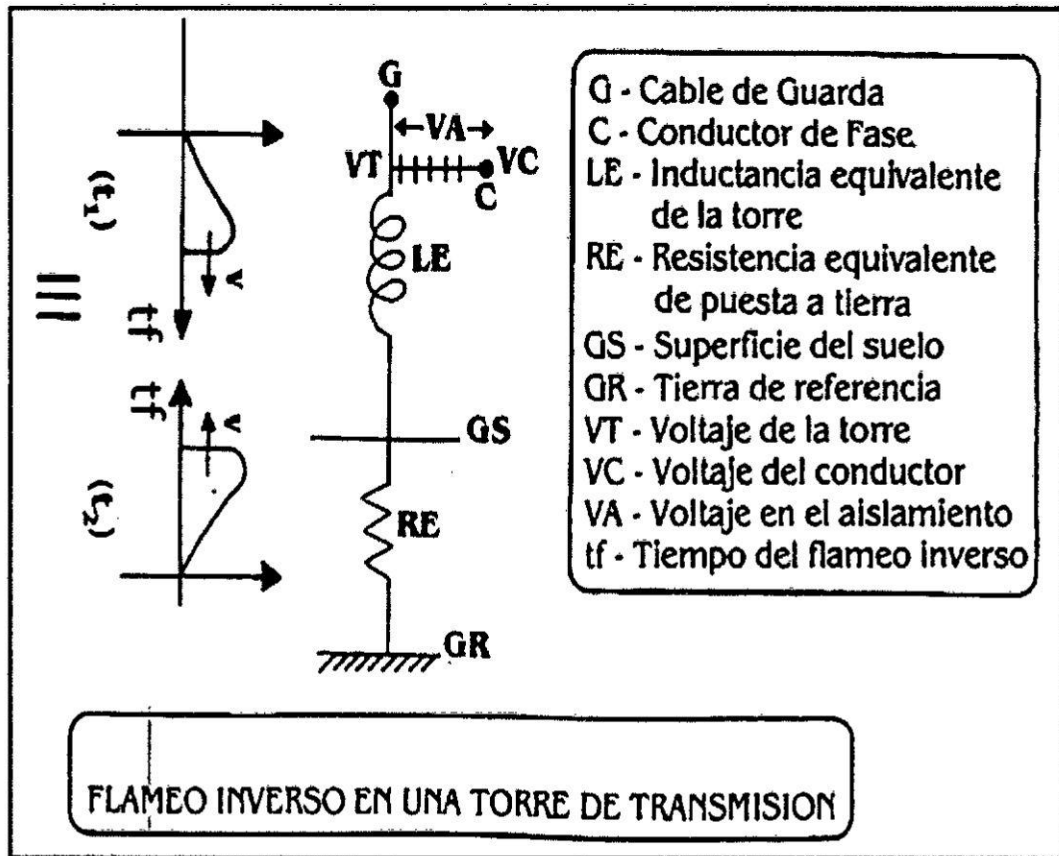
Figura N°1: Esquema de las impedancias de la puesta a tierra.



Fuente: Transporte de la energía eléctrica: Líneas aéreas a M.A.T. y C.A.
 Autor: José Luis Tora Galván.

Como se puede observar, el estudio de los sistemas de secuencia cero, se tiene una distribución de corrientes de falla en un circuito cerrado cumpliendo así la 1° ley de Kirchoff. El estudio de estos sistemas tiene años de investigación y en el transcurso del tiempo se ha logrado diseñar modelos similares para calcular la impedancia equivalente de los cables de guarda, sin embargo la conformación de impedancias de la red de tierra son mucho más complejos es por ello que se usan programas computacionales para determinar valores más exactos para el estudio de fallas a tierra en sistemas eléctricos de potencia.

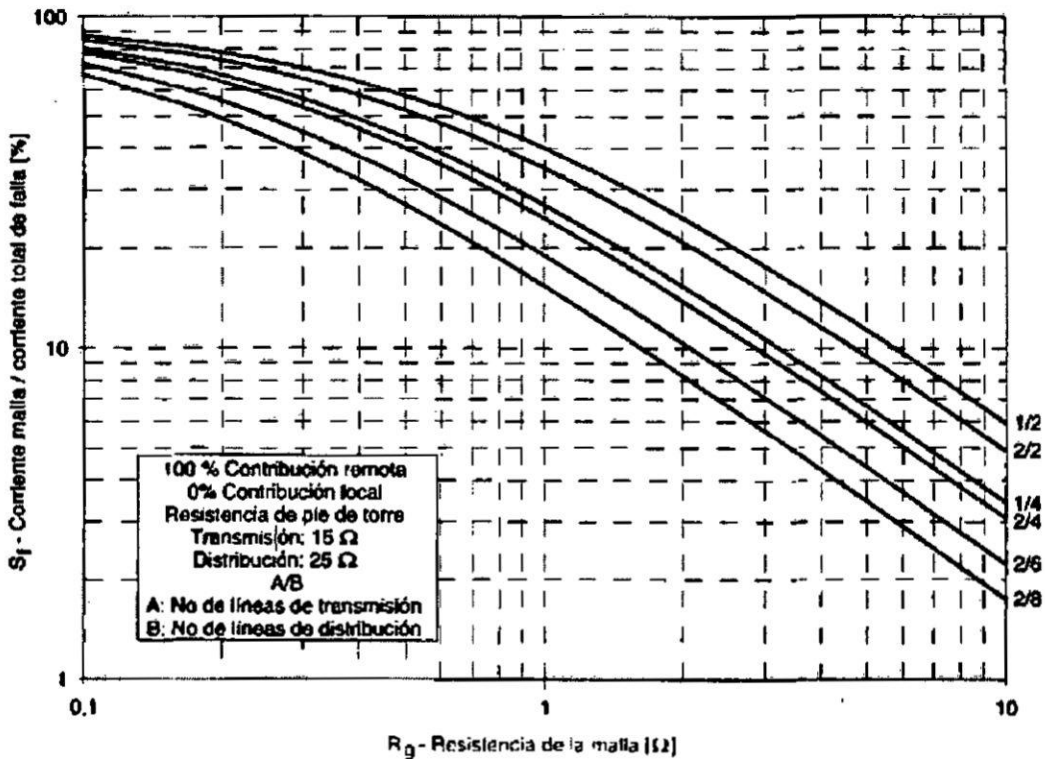
En cuanto a las puestas a tierra de las torres podemos conocer esta área de estudio en publicaciones como el de Jaime Ortiz León "Puestas a tierra de líneas de transmisión, boletín N°5"; en esta publicación se detalla el comportamiento de las descargas atmosféricas en las torres de transmisión y puestas a tierra, también da información de cómo mejorar las resistencias de las puestas a tierra con la adición de contrapesos y tratamientos con aditivos, aquí donde se mencionamos a las impedancias transitorias de las torres de transmisión y distribución ya que el comportamiento en el estado subtransitorio se da en periodos comprendidos en microsegundos, se manifiestan también impedancias capacitivas e inductivas en dichas torres.



Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.
 Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

En el estudio de los diseños de malla a tierra se tiene a la IEEE Std 80-2000 como información metodológica de amplio prestigio en varios países, en esta norma específica en el procedimiento para determinar el factor de divisor de corriente, se conocen dos métodos de cálculo que nos proporciona dicha norma el primero es el método gráfico de Garrett y Patel mediante el cual obtenemos dicho factor sin tener datos de la impedancia equivalente de los cables de guarda siendo este un método con un margen de error considerable.

Gráfico N° 1: Gráfica de Garrett y Pattel para determinar (S_f).



Fuente: Subestaciones de Alta y extra- Alta tensión.
 Autor: Ing. Mejía Villegas S.A.

El otro método analítico es el denominado (método de Endrenyi) con este método se obtienen resultados más exactos debido a que utiliza como dato las impedancias de los cables de guarda y puestas a tierra de las torres de transmisión y distribución. En libros de diseño de subestaciones se menciona los dos métodos como procedimientos de diseño válidos para el cálculo de la malla a tierra. También podemos mencionar que en el caso de la SSEE Milpo 138/50/10kV, en la etapa de ingeniería básica se realizó un diseño preliminar de la malla a tierra de dicha subestación, en ella el diseño constaba de una malla de 61x32 m y la rejilla de la malla era de: (D=4 m) y una resistencia de malla a tierra de ($R_g=2.4896 \Omega$); con este precedente fue que se decidió tomar el caso de esta SSEE Milpo ya que tenía condiciones para un rediseño de la

malla a tierra y demostrar también como ejemplo práctico el uso de la expresión analítica para determinar el factor de divisor de corriente (S_f).

Descripción del proyecto de estudio.

En la ciudad de Pasco se han ejecutado la construcción de las subestaciones (SSEE Milpo, SSEE Chicrin, SSEE Paragsha II) que son proyectos de unidades mineras, esto con motivo del aumento de la producción y unificación de alimentadores de las unidades mineras en el sistema interconectado (SEIN).

La investigación presentada está en relación a la construcción de la nueva SSEE MILPO 138/50/10kV, cuyo diseño de malla a tierra es una ingeniería básica, lo cual a través de un rediseño con la Norma IEEE Std-80 2000 se obtuvo resultados más favorables tanto en seguridad como económicamente. A continuación describimos las características de la SSEE MILPO 138/50/10kV; que son:

Ubicación geográfica.

El proyecto pertenece a la Cía. Minera Milpo; que está ubicada en la región de Junín, provincia de Cerro de Pasco, departamento de Pasco, las unidades mineras beneficiadas son: El porvenir y Atacocha.

Condiciones climáticas.

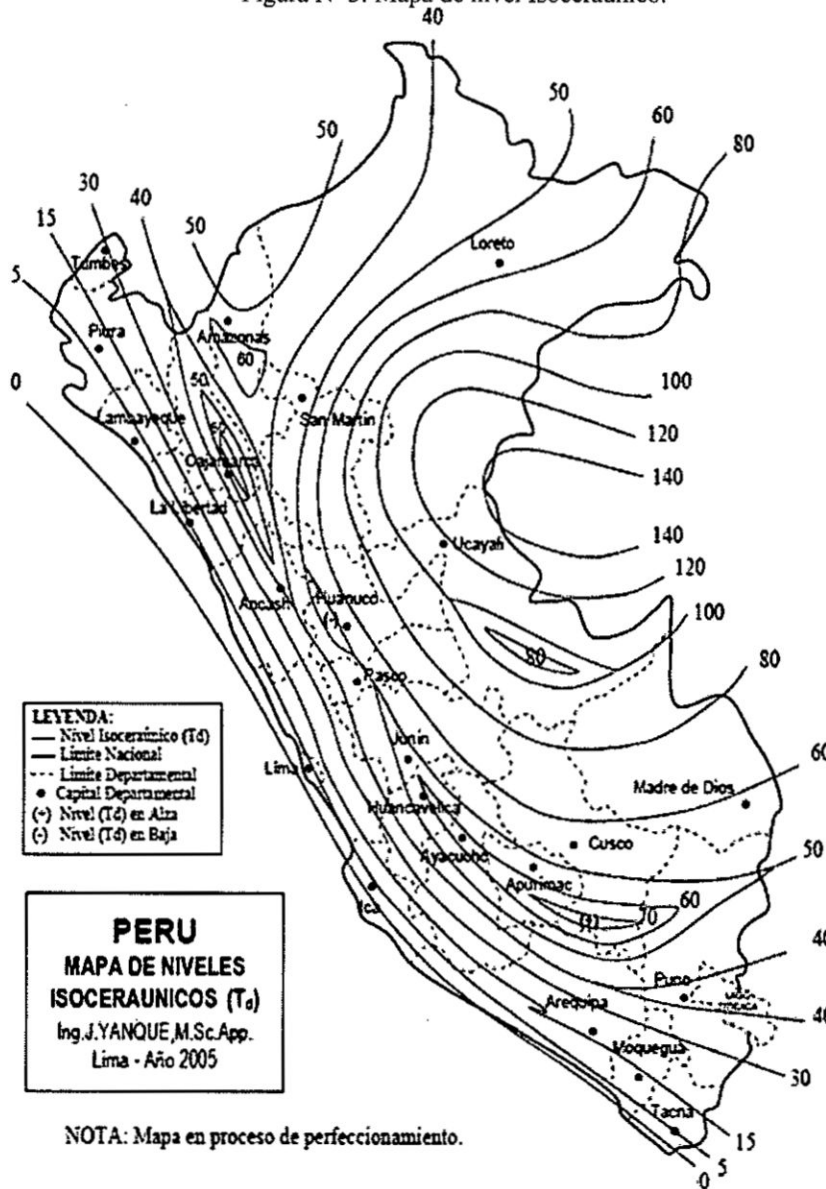
La información que se detalla fue tomada del Mapa Ecológico del Perú (INRENA) – 1993), Guía Explicativa, Capítulo III, “Zonas de Vida del Perú”, página 175, la zona de vida predominante en el área de estudio es: Páramo cuyo clima es muy húmedo “Subalpino Tropical”:

- La biotemperatura media anual máxima 6.0°C.

- La biotemperatura mínima media anual 3.8°C .
- El promedio máximo precipitación total por año $1254.8 \text{ lt}/\text{m}^2$.
- El promedio mínimo precipitación total por año $589.0 \text{ lt}/\text{m}^2$.

Además según la zona donde se encuentra el nivel isoceráunico está en un nivel de consideración:

Figura N° 3: Mapa de nivel Isoceráunico.



Fuente: Curso de alta tensión.
 Autor: Justo Yanque Montufar.

En el mapa notamos que Pasco se encuentra en un nivel de Td 60 a 80 (que quiere decir entre 60 y 80 días de tormenta al año). Si queremos determinar la densidad total de rayos en Cerro de Pasco sería:

Según la fórmula establecida por CIGRE:

$$N_G = 0.04x(T_d)^{1.25} \text{ (rayos/km}^2\text{/año)} \quad (1)$$

Lugar del proyecto está en la zona de (Td= 60), luego reemplazamos en la ecuación (1):

$$N_G = 0.04x(60)^{1.25} \quad (2)$$

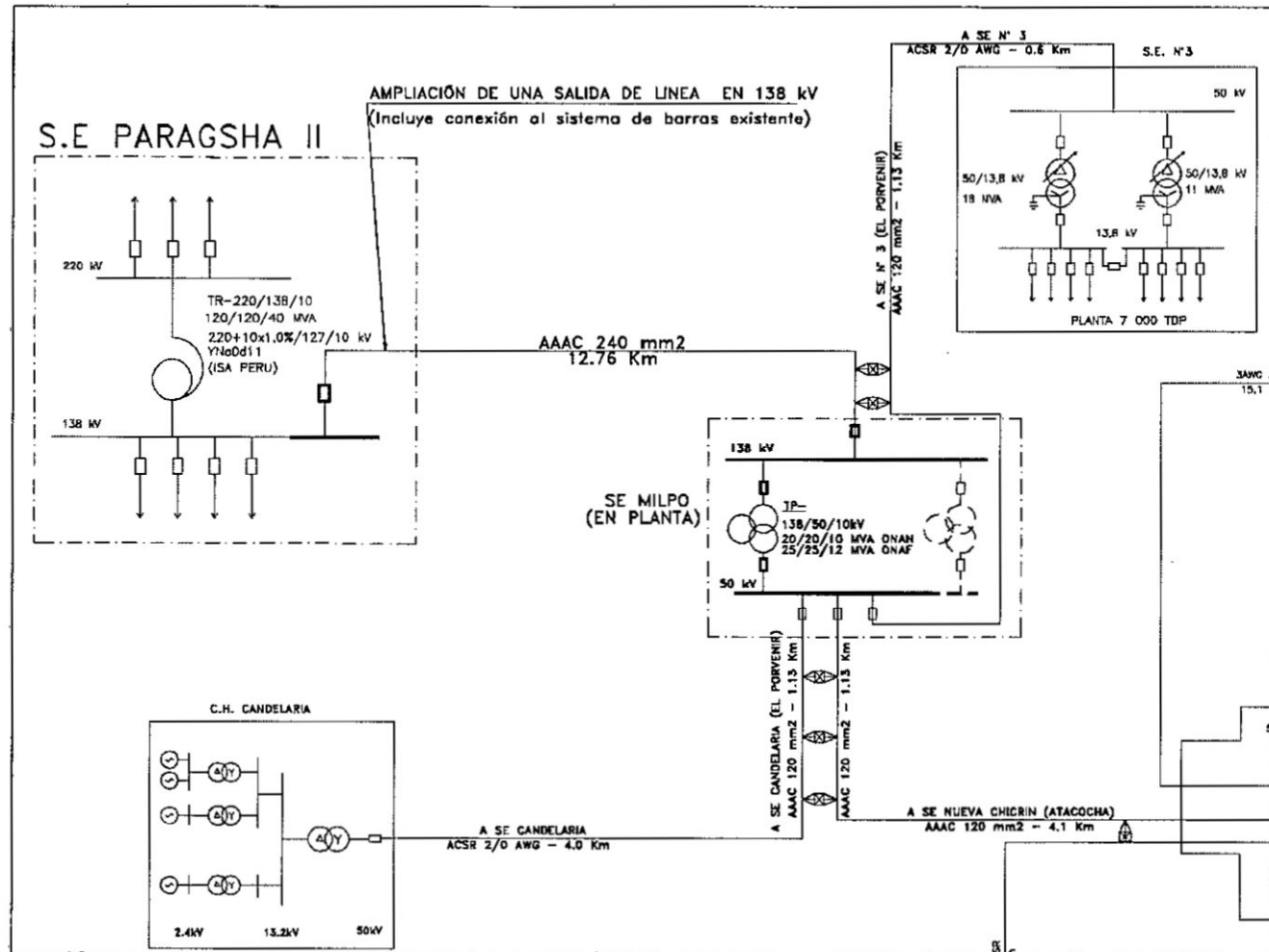
$$N_G = 6.679 \text{ rayos/km}^2\text{/año} \quad (3)$$

El resultado de (N_G) nos indica que el lugar del proyecto tiene alta precipitación; por ende se tiene que tomar en cuenta en el diseño la instalación de equipos de protección contra descargas atmosféricas tales como; pararrayos, apantallamientos y cables de guarda de tal manera que la operación del sistema de potencia no sea interrumpida.

Sistema interconectado proyectado de subestaciones y líneas de transmisión para la SSEE Milpo 138/50/10kV.

Las líneas de transmisión y distribución entorno a la SSEE Milpo 138/50/10kV, son líneas soportadas por torres metálicas de celosía, para la línea de transmisión de 138kV se tienen torres de hasta 34 m de altura, mientras en las líneas de distribución de 50 kV se tienen torres de hasta 25m de altura. El sistema interconectado está construido según el diagrama unifilar (véase figura N°4, página 33).

Figura N° 4: Diagrama unifilar proyectado.



Fuente: propia

Se observa que la SSEE Milpo 138/50/10kV se encuentra enlazada con dos alimentadores como son: Línea de transmisión Paragsha II- Milpo 138kV, línea de transmisión en 50 kV C.H. Candelaria - Milpo y dos líneas de distribución en 50kV: Línea Milpo - SE N°3 y Línea Milpo – Chicrín (Atacocha).

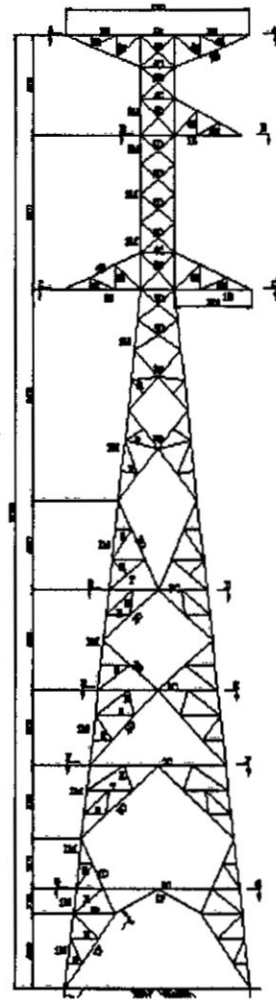
**Línea de transmisión y distribución que conectarán a la SSEE
Milpo 138/50/10kV.**

a. Línea de transmisión Paragsha - Milpo 138kV.

La línea tiene una distancia de 12.76 km y contiene 2 cables de guardas de material OPGW, la línea es de simple terna hasta la distancia de 11 km luego comparte en doble terna con la línea Milpo - SEN°3, además esta línea es alimentada desde la subestación Paragsha II en un nivel de tensión de 138 kV (en barra). Al ser una línea de distancia corta (menor a 40 km) no se considerará el efecto capacitivo en los cálculos, pero si se considerará las inductancias, las resistencias, las capacitancias parasitas, efecto Skin y las impedancias de secuencia en la línea así como en el cable de guarda.

Hasta la distancia de 11km, el tipo de torre a utilizar para esta línea de transmisión de una sola terna es similar tal la figura N°5, no se realiza transposición de línea por ser una línea corta.

Figura N° 5: Estructura metálica de celosía.

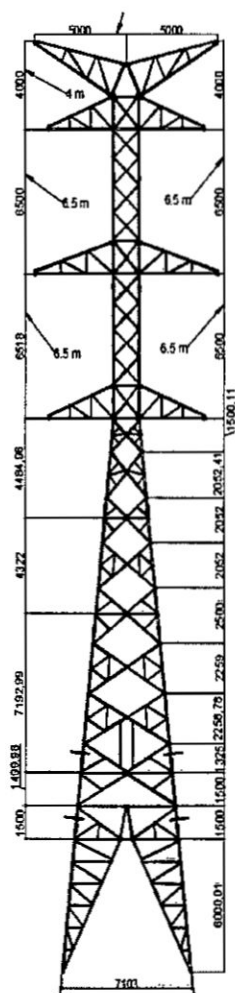


Fuente: propia

b. Línea de transmisión Paragsha - Milpo 138kV y línea de distribución Milpo - SE N°3 50kV.

Luego de recorrer 11 km la línea de transmisión Paragsha - Milpo 138kV recorre 1 km en doble terna junto a la línea de distribución Milpo - SE N°3 50kV para luego llegar a la SSEE Milpo. En este tramo también se cuenta con doble cable de guarda y estructuras de hasta 35 m de alto, además se calculará los parámetros eléctricos correspondientes a este tramo.

Figura N° 6: Estructura metálica de celosía para doble terna.

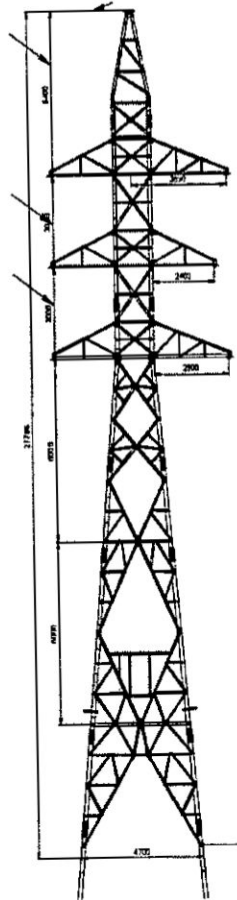


Fuente: propia

c. Línea de distribución Milpo – Chicrin (Atacocha) 50kV y línea de distribución Candelaria - Milpo 50kV.

Ambas líneas están en doble terna con una distancia de 1.13km luego se separan en líneas de simple terna hasta llegar a sus respectivas subestaciones las torres de distribución son de celosía y cuentan con un solo cable de guarda de material OPGW, para determinar la corriente de falla a tierra en la SSEE Milpo 138/50/10kV primero se calculó los parámetros eléctricos involucrados en esta línea, asimismo se calculó la resistividad del terreno en cada torre.

Figura N° 7: Estructura metálica de celosía para doble terna.



Fuente: propia

2.2. Fundamento filosófico.

2.2.1. Fundamento ontológico.

Esta investigación se centra en el estudio del flujo de energía eléctrica en los sistemas eléctricos de potencia durante un escenario de falla a tierra, en la SSEE Milpo 138/50/10kV, generando así un peligro para la vida del ser humano que se encuentra en la cercanía de dicha falla. Para reducir el riesgo eléctrico generado por tensiones de toque y paso, la energía proveniente de la falla será canalizada hacia la gran tierra mediante, cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución, contrapesos y malla a tierra, aprovechamiento

del cable de guarda, las puestas a tierra de las torres de transmisión y manteniendo de esta manera las tensiones de toque y paso en valores permisibles (de acuerdo a la norma IEEE Std 80-2000 la tensión de toque $E_{t-70} = 1004.182 \text{ V}$ y tensión de paso $E_{s-70} = 3350.633 \text{ V}$) estableciéndose la seguridad correspondiente a los seres humanos relacionados a la operación de dicha subestación.

Asimismo, la sociedad y los sectores de producción se benefician al establecerse una continuidad en el servicio eléctrico, debido a que el impacto de las descargas atmosféricas se reduce en los aisladores de las líneas de transmisión y distribución, por el mejoramiento de la puesta a tierra de las torres. El diseño optimizado de la malla a tierra reduce el costo del proyecto el cual va en beneficio de la economía de la sociedad (Ver Anexo N°4 valorización de la malla a tierra tradicional y optimizada).

2.2.2. Fundamento metodológico.

En esta investigación el tema central es contribuir al diseño óptimo de una malla a tierra, realizando un esquema de las partes que componen un sistema de potencia podemos visualizar dónde tiene que estar ubicado esta investigación, aquella ubicación corresponde a los sistemas de cables de guarda y la malla a tierra de una subestación, estos dos elementos corresponden al sistema de secuencia cero por el que fluye una eventual falla a tierra. En general nuestro objetivo partirá primero en determinar las diferentes descargas eléctricas a tierra que existen en una línea de transmisión y en una subestación eléctrica, de igual manera los escenarios más críticos que existen en dicha descarga eléctrica, ello

distribución y la malla a tierra de la subestación. Y por último, para el mejor aprovechamiento de recursos, una posible optimización del diseño de la malla a tierra será la finalidad de utilizar esta metodología. Con respecto a lo explicado la norma IEEE Std 80-2000 nos resume la metodología explicada a través de un procedimiento que consta de 12 pasos: (Ver anexo N°2 Diagrama de bloque del método optimizado a partir del IEEE Std 80-2000). El paso uno, consta de la recolección de datos de campo para determinar la resistividad aparente del terreno mediante métodos estadísticos e interpolación, con la gráfica de Sunde, el paso dos, está centrado en calcular la máxima corriente de falla a tierra en la subestación eléctrica, dicho evento debe ocurrir en la situación más crítica, siendo ésta, una falla bifásica en la barra de alta tensión o en la barra de media tensión; además de ello en este paso se debe determinar el tiempo de duración de la falla. El paso tres, consiste en el cálculo de la sección del conductor de la malla horizontal, esto se determina con la corriente máxima de falla en valor eficaz (RMS) y las características del material a usar. El paso cuatro, es el diseño de las tensiones de paso y de toque utilizando expresiones designadas por la IEEE Std 80-2000. En paso cinco se plantea el dimensionamiento inicial de la malla con parámetros tales como: área, longitud de varillas verticales, profundidad de enterramiento de la malla, etc.; estos parámetros serán la base del diseño inicial (sin optimización). En el paso seis, consiste en calcular la resistencia de malla a tierra (R_g), para ello se emplea la ecuación de Schwarz. El paso siete, consiste en calcular la corriente de diseño (I_g) mediante el producto de la corriente máxima de falla eficaz (RMS) y el factor de divisor de corriente (S_f) dicho factor será calculado de acuerdo a la expresión

deducida en esta investigación (ver ecuación N°108 de la página 91 luego, para constatar resultados, serán comparadas con el método analítico de Edrenyi (ver ecuación N°209 de la página 164 recomendado por la IEEE Std 80-2000 y finalmente se determinarán los lugares geométricos para comprobar la exactitud de ambas expresiones con la ayuda del MATLAB. El paso ocho, es la evaluación de la tensión de malla a tierra (GPR), este valor tiene que ser menor a la tensión de toque a 70 kg (E_{t-70}) del diseño; en la mayoría de casos difícilmente este valor llega ser menor que la tensión de toque, así que al no cumplirse la condición pasa a la evaluación del nuevo valor de tensión de retícula (E_m). En el paso nueve, se calcula la tensión de retícula, para ello se calcula los factores que depende de la geometría de la malla (K_m, K_S, K_t, K_{ii} y K_h). En el paso diez, una vez hallada dicha tensión se verifica la condición de que $E_m < E_{t-70}$; si se cumple la condición se realiza la optimización con la expresión (108) aumento de contrapesos en las torres que se enlazan con la subestación, se re calculan los valores de (S_t), (I_g) y los nuevos parámetros de la malla, dando resultados más favorables en cuanto a la tensión (E_m) y la corriente de malla (I_g) luego se prosigue con el diseño en el paso once, caso contrario se retorna al paso ocho y se modifica el diseño. En el paso once, se calcula la tensión de paso (E_s) y se evalúa la condición $E_s < E_{s-70}$; si no se cumple la condición retorna al paso ocho para el rediseño, si dicha condición es válida se termina con el diseño y se empieza a realizar el diseño detallado.

2.2.3 Fundamento epistemológico.

Esta investigación es fundamentada mediante leyes basadas en los postulados de Carl Friedrich Gauss "ley de la divergencia del campo eléctrico" y Michael

Faraday “ley de la rotacional del campo eléctrico” (véase ecuación 4 y 5) respectivamente.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_V}{\epsilon_0} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

También la “ley de Ampere-Maxwell” en su forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (6)$$

Relacionando la “ley de Ampere” con la “ley de Gauss” se obtiene la ecuación de la conservación de la carga.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\vec{\nabla} \cdot \frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{\partial \rho_V}{\partial t} \quad (7)$$

En forma integral, dice que la corriente que fluye a través de una superficie cerrada es igual a la tasa de pérdida de carga del volumen encerrado (Teorema de Divergencia). La ley de Kirchhoff es equivalente a decir que la divergencia de la corriente es cero, para un tiempo invariante, o siempre verdad si la corriente de desplazamiento está incluida en J .

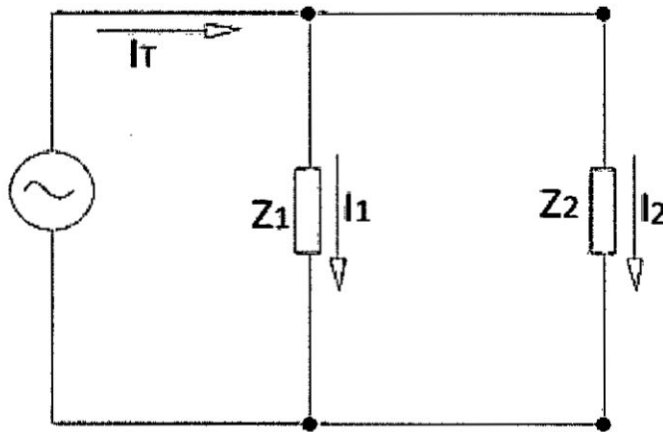
$$\int_V (\nabla \cdot \vec{J}) dV = \oint \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

Como $\nabla \cdot \vec{J} = 0$ entonces $\sum \vec{I} = 0$ (Primera ley de Kirchhoff).

La corriente de falla o también denominada corriente de secuencia cero, aunque dure un tiempo de no más de 1 segundo por la red de tierra, cumple la ley de la conservación de la carga “Primera ley de Kirchhoff”; donde se tiene fuente de corriente por parte de los elementos activos (fuente de tensión o corriente) como las generadoras y elementos pasivos (cargas) como las resistencias, inductancias y capacitancias (Ver figura N°35, página 134). En los circuitos

eléctricos, existen fuentes de tensión o corriente e impedancias también existe un factor denominado factor de divisor de corriente, el cual determina cuanta corriente pasa en una impedancia teniendo como dato la red equivalente y la corriente total.

Figura N°8: Circuito para determinar los factores de divisor de corriente.



Fuente: Propia.

De la figura N°8, determinamos las corrientes I_1 e I_2 están en función de los factores de división de corriente S_{fa} y S_{fb} :

$$I_1 = I_T \times S_{fa} \tag{9}$$

$$I_2 = I_T \times S_{fb} \tag{10}$$

$$S_{fa} = \left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| \tag{11}$$

$$S_{fb} = \left| \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right| \tag{12}$$

Donde:

S_{fa} y S_{fb} : Factores de divisor de corriente de la malla a tierra y el cable de guarda respectivamente.

Z_1 : Resistencia de la malla a tierra de la subestación en (Ω).

Z2: Impedancia equivalente de los cables guarda, puestas a tierra de las torres e impedancias de las líneas de transmisión y distribución en (Ω).

La aplicación del factor de divisor de corriente al sistema eléctrico de la SSEE Milpo138/50/10kV, que comprende resistencia de malla a tierra (Z1) e impedancias de cable de guarda (Z2), comprende en calcular la corriente de diseño de la malla a tierra, cumpliéndose que: $S_{fa} + S_{fb} = 1$.

Sabemos que la energía se conserva en cualquier lugar del universo, es decir toda la energía que ingresa a un punto sale, por esta razón la energía proveniente de una falla a tierra en la SSEE Milpo138/50/10kV podemos canalizarla hacia la gran tierra a través de dos circuitos eléctricos: el primer circuito correspondiente a la malla a tierra ubicada en la subestación y el segundo constituido por los cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución, torres de transmisión y distribución y sistemas de puestas a tierra de dichas torres conformadas por contrapesos, tierra cernida y tratada con sales higroscópicas; de acuerdo al circuito del divisor de corriente (ver figura N°8, página 42) para la solución al problema objeto de estudio, (Z1) será la impedancia del circuito 1 y (Z2) por la impedancia del circuito 2, I_1 será la corriente derivada a través de Z1 e I_2 la corriente a través de Z2 e I_T será la corriente de falla a tierra.

El cálculo de las corrientes derivadas I_1 e I_2 , así como la optimización de I_2 se realizarán aplicando los factores de divisores de corriente S_{f1} y S_{f2} . Este valor de I_2 determina las nuevas características de la malla a tierra lo cual redundará en un ahorro económico.

2.3. Marco conceptual.

2.3.1. Cálculo de parámetros eléctricos en las líneas de transmisión y distribución.

a. Resistencia DC de la línea de transmisión y distribución (RDC).

Para la línea de transmisión se ha proyectado usar cable de 240 mm² AAAC (conductor totalmente de aleación de aluminio) y para las líneas de distribución se usará cable de 120mm² también de AAAC.

La resistencia de la línea se determina en laboratorio los cuales son conocidos como datos de fábrica. Si no se cuenta con tablas de datos técnicos se determina el efecto resistivo de los conductores mediante cálculos o por mediciones. Hay varios factores que determinan dicho cálculo. Estos factores son los siguientes: la temperatura, el efecto skin (pelicular), la frecuencia de la corriente, la tierra como sistema de retorno.

La resistencia DC de un conductor de material uniforme se puede calcular como:

$$R_{DC} = \frac{\rho l}{A} \quad (13)$$

Donde:

RDC: Resistencia DC del conductor en (Ω).

A: Área de la sección transversal del conductor en (m²).

l : Longitud del conductor en (m).

ρ : Resistividad del material del conductor en (Ω -m), para el aluminio a 20 °C (ρ

Al= 2.83 x 10⁻⁸ Ω -m).

**b. Resistencia AC de la línea de transmisión y distribución (RAC),
influencia del efecto skin.**

La resistencia también se ve afectada por el efecto skin (pelicular o superficial). Este consiste en la tendencia que tiene la corriente alterna a concentrarse en la superficie del conductor, efecto que se incrementa con la frecuencia. La resistencia se ve incrementada con efecto, ya que, disminuye al área efectiva del conductor para transportar la corriente.

El cálculo del incremento de la resistencia debido al efecto skin es complejo, dando lugar a ecuaciones tipo Bessel. Este valor se da para la frecuencia de trabajo del conductor, a una temperatura determinada y para diferentes valores de corriente (pequeñas y mucho menores al 75% de la corriente nominal).

**c. Resistencia total de la línea de transmisión y distribución (RTOTAL),
influencia del sistema de retorno en la resistencia.**

Cuando el sistema de retorno de una corriente es un conductor físico o una tierra de características ideales ($r = 0.0 \Omega$), la resistencia total será simplemente la suma de las dos resistencias de los respectivos conductores, el de fase y el de retorno.

Cuando el sistema de retorno lo constituye la tierra física la resistencia total está dada por las correcciones de Carson:

$$R_{TOTAL} = R_{DC} + \Delta R \quad (14)$$

Siendo (ΔR) una serie infinita; cuya expresión matemática se muestra:

$$\Delta R = 8\pi \cdot 10^{-4} f \left[\frac{\pi}{8} - \frac{4}{3} \sqrt{10} \pi 10^{-4} h \sqrt{\frac{f}{\rho}} \dots \dots \right] \quad (15)$$

Donde:

h : Altura del conductor con respecto a la superficie del suelo en (m).

f : Frecuencia de la corriente en (Hz).

ρ : Resistividad del suelo en (Ω - m).

Para efectos del cálculo se considera ($f=60$ Hz), considerando únicamente el primer término de la serie.

$$\Delta R = 8\pi \cdot 10^{-4} f \left[\frac{\pi}{8} \right] \rightarrow \Delta R = 0.00098696f \quad (16)$$

Finalmente la resistencia de la línea de transmisión o distribución; quedaría definida así:

$$R_{TOTAL} = RDC + 0.00098696f \quad (17)$$

d. Inductancia de la línea de transmisión y distribución (L).

La fuerza electromotriz (FEM) inducida a lo largo de un conductor, de acuerdo a la "Ley de Faraday", se calcula de la siguiente manera:

$$e = \int_L E \cdot dl = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot ds \quad (18)$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la fuerza electromotriz está definida como la integral de línea del campo eléctrico. Igualmente se puede evaluar la (FEM) como la variación del flujo ligado con respecto al tiempo. El signo menos se introduce de acuerdo a la "Ley de Lenz", para definir el sentido de la diferencia de potencial que se opone a la corriente que produjo la caída de tensión.

La relación entre el flujo ligado, la inductancia y la corriente, se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$e = \Delta v = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (19)$$

Se obtiene:

$$\psi = Li \quad (20)$$

Donde:

ψ : Flujo ligado en (Wb).

L: Inductancia de la línea en (H).

i : Corriente que produce la caída de tensión en (A).

De la ecuación (19) se puede establecer que el flujo ligado es igual al flujo magnético multiplicado por el factor "N". Este factor tiene un significado diferente al que normalmente tiene en una bobina; por ejemplo, (donde corresponde al número de vueltas. Para el caso de puntos exteriores a un conductor, N tiene un valor de 1 y para puntos interiores N corresponde a la fracción de corriente total que es rodeada por un diferencial de flujo.

La ecuación anterior (teorema del flujo ligado) nos dice que existe una relación directa entre el flujo ligado y la corriente. El flujo ligado total sobre un conductor es el resultado del flujo ligado interno del conductor y el flujo ligado externo al conductor.

La Ley de Ampere permite calcular la Fuerza Magnetomotriz (FMM), en Ampere-vuelta alrededor de una trayectoria cerrada:

$$FMM = \int_L H \cdot dl = I_{encerrada} \quad (21)$$

Donde:

H: Intensidad de campo magnético en (A/m).

l : Distancia a través del paso de integración en (m).

l encerrada: Corriente encerrada por la trayectoria de integración en (A).

e. Intensidad de campo magnético (H) debido a la corriente de un solo conductor.

En puntos interiores del conductor, es decir para valores de ($x \leq r$), se tiene:

$$I_{encerrada} = \frac{x^2}{r^2} I \quad (22)$$

$$\int_L H \cdot dl = \frac{x^2}{r^2} I \quad (23)$$

En la trayectoria escogida de integración (H_x) tiene un valor constante.

$$2\pi x H_x = \frac{x^2}{r^2} I \quad (24)$$

De lo anterior se deduce que para puntos interiores, la intensidad de campo magnético se puede evaluar.

$$H_x = \frac{x^2}{2\pi r^2} I \quad (25)$$

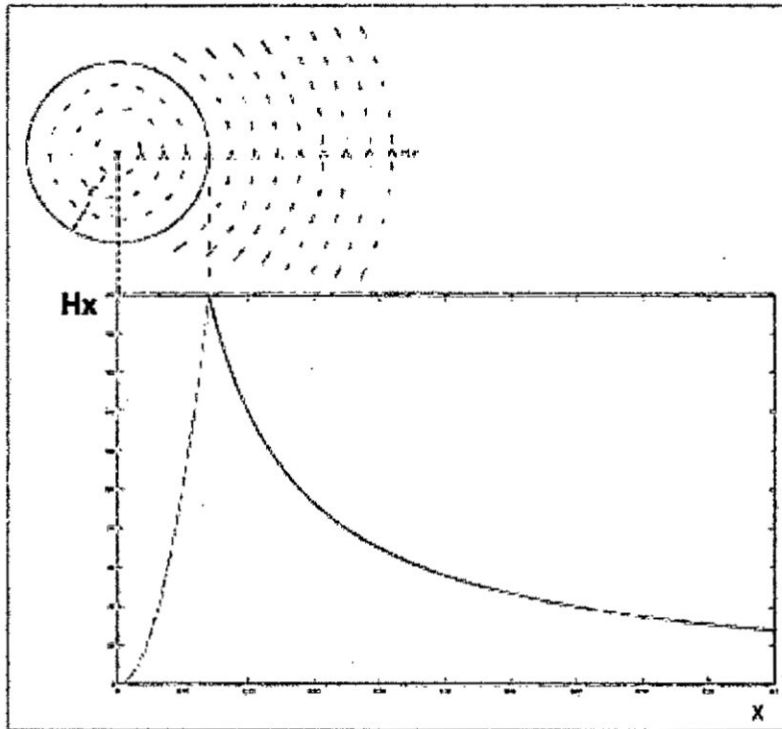
Para puntos exteriores, lo único que cambia en la evaluación de la ecuación (21) es la corriente encerrada por la trayectoria de integración, que en este caso ya corresponde a la totalidad de la corriente (I).

$$\int H_x \cdot dl = I \rightarrow H_x = \frac{I}{2\pi^2 x} \quad (26)$$

El campo (H_x) (véase la figura N°9) nos muestra para puntos interiores y exteriores al conductor de línea de radio (r) cuyo valores de ($x \leq r$) tal que la

intensidad de campo magnético varía linealmente con la distancia al centro del conductor y para valores de ($x > r$), dicho campo decrece de manera inversa al valor de (x).

Figura N°9: Intensidad del campo magnético dentro y fuera del conductor.

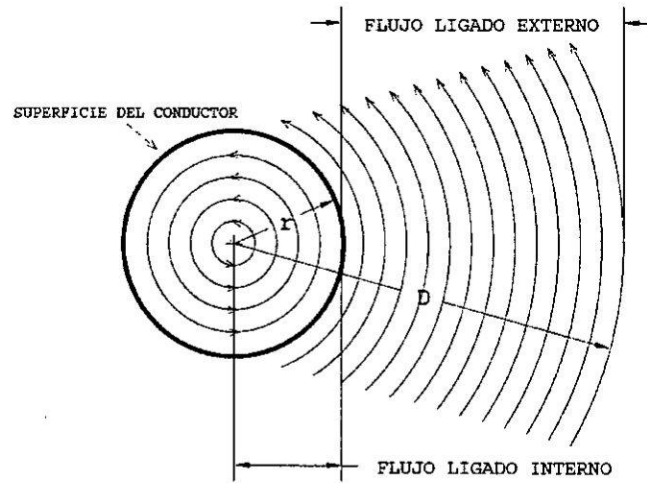


Fuente: propia

f. Flujo ligado total (ψ_{total}).

Tal como quedó establecido en la ecuación (21) para calcular la inductancia de un conductor en el espacio (sin efecto del suelo), hay que evaluar el flujo ligado total que produce la corriente que circula por el conductor. En la figura N°10 se ilustra este flujo ligado total hasta un punto exterior que está a una distancia (D) del centro del conductor.

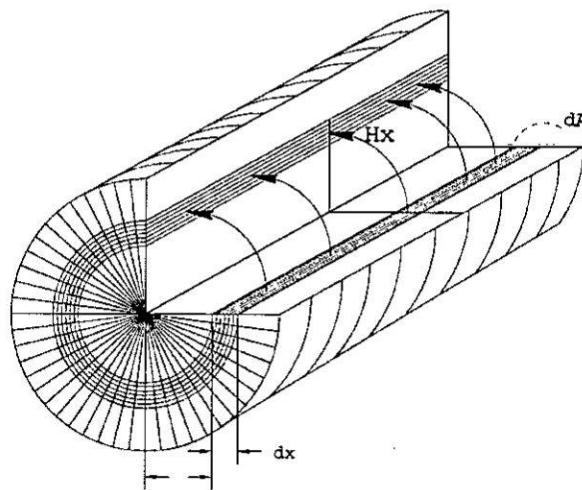
Figura N°10: Distancias comprendidas entre un flujo interno y externo de un conductor.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica
Autor: Leonardo Cardona C.

Para la evaluación del flujo ligado interno, se realiza la integración en una trayectoria radial desde $(x=0)$ hasta $(x=r)$, y tomando un diferencial de área como se ilustra en la figura N° 11.

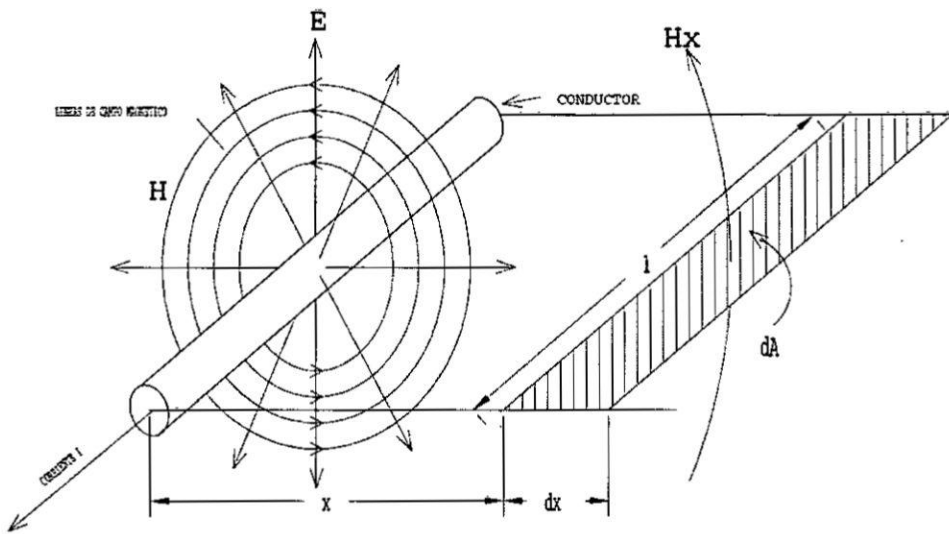
Figura N°11: Análisis de un flujo ligado interno de un conductor.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica
Autor: Leonardo Cardona C.

Para la evaluación del correspondiente flujo ligado externo se realiza la respectiva integración desde ($x=r$) hasta un punto externo a una distancia genérica (D) y tomando un diferencial de área como el que se ilustra en la figura N°12.

Figura N°12: Análisis de un flujo ligado externo de un conductor.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica

Autor: Leonardo Cardona C.

Las ecuaciones básicas para obtener el flujo ligado total serían:

$$d\Psi = Nd\phi \quad (27)$$

$$d\phi = BdA \quad (28)$$

Donde:

B: Densidad de flujo magnético en (T).

El diferencial se toma por cada unidad de longitud, es decir:

$$dA = \frac{l dx}{l} = dx \quad (29)$$

De las ecuaciones (27), (28) y (29) la intensidad de campo magnético (H) y la densidad de campo magnético ($B = \mu H$), un diferencial de flujo ligado en cualquier punto se puede evaluar como:

$$d\Psi = N\mu H dx \quad (30)$$

Haciendo la correspondiente integración se obtiene la expresión:

Para el flujo ligado interno, se obtiene:

$$\Psi_{interno} = \frac{\mu I}{8\pi} \quad (31)$$

Para el flujo ligado externo, se obtiene:

$$\Psi_{externo} = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{D}{r} \quad (32)$$

El flujo ligado total, será entonces:

$$\Psi_{total} = \frac{\mu I}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right] \quad (33)$$

Como el flujo ligado interno resulta independiente del radio del conductor, la ecuación (33) se puede expresar de manera que se elimine el flujo ligado interno y quede expresado el flujo ligado total en función de un radio ficticio (r'), que representa un conductor sin flujo interno

$$\Psi_{total} = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{D}{r'} \quad (34)$$

Donde:

$$r' = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} \quad (35)$$

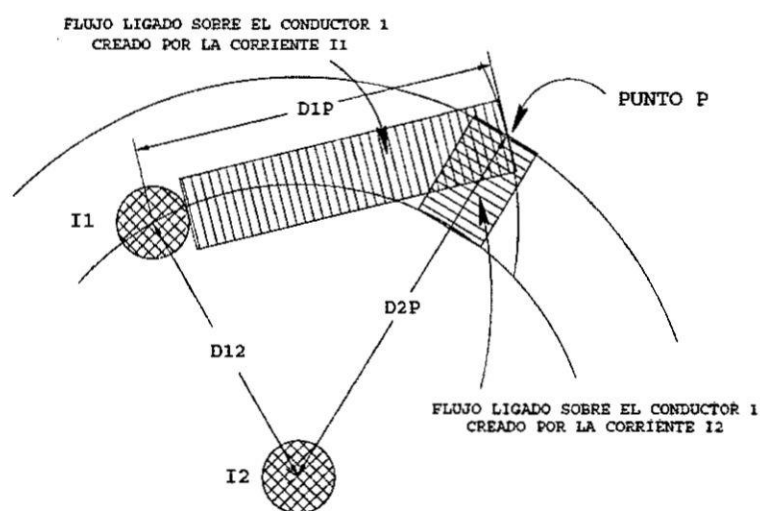
Según la ecuación (34) la inductancia de un conductor cilíndrico, sería:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D}{r'} \quad (36)$$

g. Flujo ligado sobre un conductor debido a un grupo de corrientes.

Sobre un conductor además de su propia corriente, también tienen influencia las corrientes de conductores vecinos. Estos últimos crean enlaces de flujo que rodean al conductor sobre el que se desea calcular el flujo ligado total. Ver figura N°13.

Figura N° 13: Flujo ligado debido a un grupo de conductores.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica

Autor: Leonardo Cardona C.

Para el cálculo del flujo ligado total sobre un conductor debido a un grupo de corrientes, se puede utilizar la ecuación (34) para la evaluación del flujo ligado total debido a su propia corriente. El cálculo del flujo ligado sobre el conductor debido a otras corrientes, se puede hacer con la ecuación (32), pero evaluado desde una distancia (D1) hasta una distancia (D2) al centro del conductor.

$$\Psi_{externo} = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{D2}{D1} \quad (37)$$

Tal como se ilustra en el figura (13), solamente se va a considerar un grupo de dos corrientes actuando sobre un conductor y a partir del resultado se hace la correspondiente generalización.

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12} \quad (38)$$

$$\Psi_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi} \ln \frac{D_{1P}}{r_{1'}} + \frac{\mu I_2}{2\pi} \ln \frac{D_{2P}}{D_{12}} \quad (39)$$

Luego haciendo la descomposición de los logaritmos neperianos, se obtiene:

$$\Psi_1 = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_1 \ln D_{1P} + I_2 \ln D_{2P} + I_1 \ln \frac{1}{r_{1'}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} \right] \quad (40)$$

Como la suma de corrientes debe ser cero, se puede expresar (I_2) en función de (I_1). Agrupando términos la ecuación (40) se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Psi_1 = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_1 \ln \frac{1}{r_{1'}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_1 \ln \frac{D_{1P}}{D_{2P}} \right] \quad (41)$$

En la ecuación anterior el último término tiende a cero, cuando se evalúa el flujo ligado hasta un punto P muy alejado. La ecuación (41) queda reducida a:

$$\Psi_1 = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_1 \ln \frac{1}{r_{1'}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} \right] \quad (42)$$

Generalizando la ecuación anterior se puede concluir:

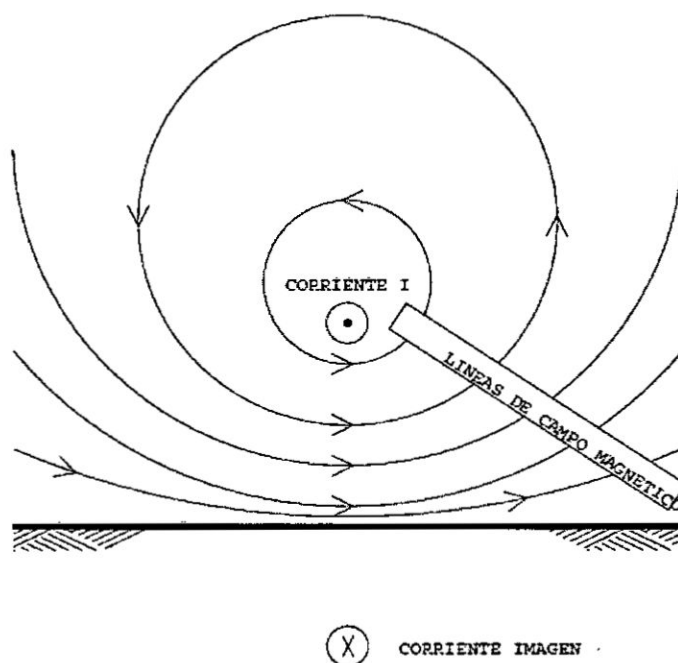
$$\Psi_1 = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_1 \ln \frac{1}{D_{11}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} \dots \dots I_i \ln \frac{1}{r_i'} \dots \dots I_n \ln \frac{1}{D_{in}} \right] \quad (43)$$

La anterior ecuación corresponde al flujo ligado por unidad de longitud sobre un conductor genérico i (Ψ_1), debido a un grupo de (n) corrientes.

h. Inductancia de una línea trifásica considerando suelo ideal.

Inicialmente se va a considerar el caso de una línea monofásica, que transporta una corriente (I), y se encuentra sobre un suelo ideal (conductividad infinita). Sobre la superficie del terreno ideal, el campo magnético, creado por la corriente del conductor, es tangente (ver figura N°14).

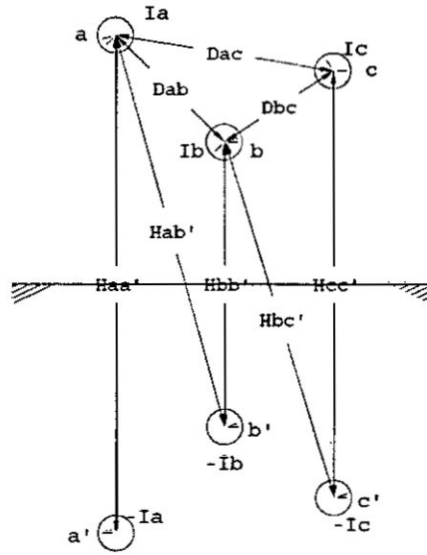
Figura N° 14: Corriente sobre un suelo perfectamente conductor.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica
Autor: Leonardo Cardona C.

Para cumplir con la anterior condición de borde, el suelo se puede reemplazar por una corriente imagen situada a una distancia ($2h$) del conductor que transporta la corriente y con una dirección contraria. Para una red trifásica se puede aplicar el mismo recurso de las corrientes imágenes (Ver figura N°15).

Figura N°15: Modelamiento mediante método de imágenes.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica
 Autor: Leonardo Cardona C.

Para calcular el flujo ligado sobre los conductores (a, b y c), se utiliza la ecuación (43) incluyendo la contribución de las corrientes imágenes. El flujo ligado sobre el conductor (a) sería:

$$\Psi_1 = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_a \ln \frac{1}{r_{a'}} + I_b \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{D_{ac}} - I_a \ln \frac{1}{H_{a'a}} - I_b \ln \frac{1}{H_{a'b}} - I_c \ln \frac{1}{H_{a'c}} \right] \quad (44)$$

La ecuación (44) se puede utilizar para evaluar el flujo ligado para las dos fases restantes. El resultado se puede expresar matricialmente:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \frac{\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{H_{a'a}}{r_{a'}} & \ln \frac{H_{a'b}}{D_{ab}} & \ln \frac{H_{a'c}}{D_{ac}} \\ \ln \frac{H_{b'a}}{D_{ba}} & \ln \frac{H_{b'b}}{r_{b'}} & \ln \frac{H_{b'c}}{D_{bc}} \\ \ln \frac{H_{c'a}}{D_{ca}} & \ln \frac{H_{c'b}}{D_{cb}} & \ln \frac{H_{c'c}}{r_{c'}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (46)$$

La anterior ecuación tiene la misma forma de la ecuación (20) ($\Psi = L i$). Se concluye que la matriz de inductancias para una línea trifásica sobre suelo ideal, es la siguiente:

$$L_{abc} = \frac{\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{H_{a'a}}{r_{a'}} & \ln \frac{H_{a'b}}{D_{ab}} & \ln \frac{H_{a'c}}{D_{ac}} \\ \ln \frac{H_{b'a}}{D_{ba}} & \ln \frac{H_{b'b}}{r_{b'}} & \ln \frac{H_{b'c}}{D_{bc}} \\ \ln \frac{H_{c'a}}{D_{ca}} & \ln \frac{H_{c'b}}{D_{cb}} & \ln \frac{H_{c'c}}{r_{c'}} \end{bmatrix} \quad (47)$$

La ecuación (46) escrita en forma compacta:

$$\Psi_{abc} = L_{abc} i_{abc} \quad (48)$$

La correspondiente generalización de un elemento de la matriz de inductancias para una línea de (n) conductores sería:

$$L_{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{H_{i'i}}{r_{i'}} \quad (49)$$

$$L_{ij} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{H_{i'j}}{D_{ij}} \quad \text{Para } (i \neq j) \quad (50)$$

La permeabilidad magnética m para el aire se toma igual a la del vacío. Este valor corresponde a:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \rightarrow \frac{\mu}{2\pi} = 0.2 \frac{mH}{km} \quad (51)$$

i. Matriz de reactancias inductivas de una red trifásica.

La ecuación (48) puede llevarse a una ecuación fasorial que relacione las caídas de potencial con las corrientes:

$$\Delta V(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \rightarrow \overline{\Delta V} = j\omega\overline{\Psi} \quad (52)$$

La ecuación (55) se puede convertir en una relación entre las diferencias de potencial en los conductores y las corrientes de línea:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = j \frac{\omega\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{H_{a'a}}{r_{a'}} & \ln \frac{H_{a'b}}{D_{ab}} & \ln \frac{H_{a'c}}{D_{ac}} \\ \ln \frac{H_{b'a}}{D_{ba}} & \ln \frac{H_{b'b}}{r_{b'}} & \ln \frac{H_{b'c}}{D_{bc}} \\ \ln \frac{H_{c'a}}{D_{ca}} & \ln \frac{H_{c'b}}{D_{cb}} & \ln \frac{H_{c'c}}{r_{c'}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} X_{aa} & X_{ab} & X_{ac} \\ X_{ab} & X_{bb} & X_{bc} \\ X_{ca} & X_{cb} & X_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (54)$$

Las diferencias de potencial y corrientes en las dos ecuaciones anteriores son variables fasoriales. La ecuación (53) en forma simplificada sería:

$$\Delta V_{abc} = X_{abc} \cdot I_{abc} \quad (55)$$

j. Impedancia serie de una red con retorno por tierra, considerando suelo real.

Hasta ahora se ha considerado el suelo con unas características ideales, es decir de una conductividad infinita. Partiendo del hecho de que no es posible resolver el problema teniendo en cuenta las características desiguales de la superficie del suelo, y capas con diferentes resistividades, Carson estudió el problema considerando la tierra como un plano sólido semi-infinito y homogéneo. Las soluciones que obtuvo, Carson son correcciones a las que se han obtenido

considerando el suelo ideal. Las expresiones de impedancia serie desarrolladas por Carson para un conductor genérico *i* son las siguientes:

Para la impedancia propia del conductor:

$$Z_{ii} = R_{ac_i} + \Delta R_{ii} + j \left[\frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{H_{ii}}{r_i} + \Delta X_{ii} \right] \Omega/km \quad (56)$$

Para las impedancias mutuas:

$$Z_{ij} = \Delta R_{ij} + j \left[\frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}} + \Delta X_{ij} \right] \Omega/km \quad (57)$$

Donde:

R_{ac_i} : Resistencia AC del conductor en (Ω/km).

r_i : Radio corregido del conductor "i", RMG de tablas de fabricante en (m).

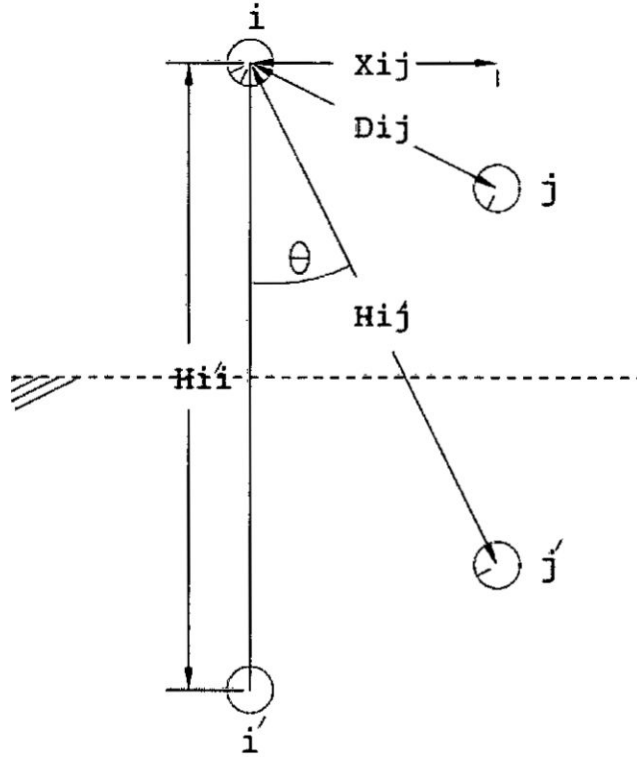
H_{ii} : Distancia del conductor "i" a su imagen en (m).

H_{ij} : Distancia del conductor "i" a la imagen del conductor "j" en (m).

D_{ij} : Distancia del conductor "i" al conductor "j" en (m).

Las anteriores definiciones están dispuestos en el espacio según se observa en la figura N°16.

Figura N°16: Geometría de la torre para 2 conductores genéricos.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica
 Autor: Leonardo Cardona C.

Las correcciones en la impedancia mutua (ΔR_{ij} , ΔX_{ij}); dependen del ángulo (θ) ilustrado en la figura N°16, de la distancia entre el conductor "i" y la imagen del conductor "j", además dependerán de la resistividad y la frecuencia.

Para el caso de las correcciones en la impedancia propia se utilizan las mismas expresiones para las correcciones en la impedancia mutua haciendo el ángulo (θ) igual a 0° y la distancia H_{ij} en la distancia del conductor a su imagen, es decir a $(2h)$. Las correcciones para impedancias mutuas son:

$$\Delta R_{ii} = 2w \frac{\mu}{2\pi} P = 4 \cdot w \cdot 10^{-4} \cdot P \quad \Omega/\text{km} \quad (58)$$

$$\Delta X_{ij} = 2w \frac{\mu}{2\pi} Q = 4 \cdot w \cdot 10^{-4} \cdot Q \quad \Omega/\text{km} \quad (59)$$

En las dos ecuaciones anteriores (w) corresponde a la frecuencia angular en (rad/s) y los términos (P) y (Q) a valores adimensionales cuyas expresiones son las siguientes:

$$P = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos \theta + \frac{K^2}{16} \cos 2\theta \left(0.6728 + \ln \frac{2}{k} \right) + \frac{K^2}{16} \theta \cos 2\theta + \frac{K^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{\pi K^4}{1536} \cos 4\theta \dots \dots \dots \quad (60)$$

$$Q = -0.0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos \theta - \frac{\pi K^2}{64} \cos 2\theta + \frac{K^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{K^4 \theta}{384} \sin 4\theta - \frac{K^4}{384} \cos 4\theta \left(1.0895 + \ln \frac{2}{k} \right) \dots \dots \dots \quad (61)$$

$$k = 2.81 \times 10^{-3} H_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (62)$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{H_{ij}}{X_{ij}} \right) \quad (63)$$

Donde:

K: Profundidad equivalente de la tierra de retorno en (m).

Las ecuaciones para (P) y (Q), corresponden a los primeros términos de una serie infinita. Los términos que se han indicado en las ecuaciones (60) y (61) dan una buena precisión para todos los cálculos que se hagan a baja frecuencia.

k. Aproximación de Lewis para cálculo de impedancia serie a baja frecuencia.

Una aproximación que se considera práctica para cálculos a baja frecuencia es la denominada, aproximación de Lewis. Esta considera solamente el primer término en la serie (P) para el cálculo de (ΔR). Para el cálculo de la corrección (ΔX) considera los dos primeros términos para (Q).

Las ecuaciones (56) y (57) considerando la aproximación de Lewis quedarían:

$$Z_{ii} = Rac_i + 4. w. 10^{-4} \frac{\pi}{8} + j \frac{w\mu}{2\pi} \left[\ln \frac{H_i}{r_i} + 2x \left(-0.0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k} \right) \right] \Omega/km \quad (64)$$

Reemplazando el valor de (k) de acuerdo a la ecuación (62), se llega a la siguiente expresión:

$$Z_{ii} = Rac_i + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot x \cdot w + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{658.86 \sqrt{f}}{r_i} \quad (65)$$

De la ecuación (65) se reemplaza: $Rn = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot x \cdot w$

Para una frecuencia industrial de 60 Hz y definiendo.

$$De = 658.86 \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (66)$$

Para las impedancias propias:

$$Z_{ii} = Rac_i + 0.0592 + j0.0754 \ln \frac{De}{r_i} \Omega/km \quad (67)$$

Para las impedancias mutuas:

$$Z_{ij} = Rn + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{D_{ij}} = 0.0592 + j0.0754 \ln \frac{De}{D_{ij}} \Omega/km \quad (68)$$

I. Impedancias de secuencia considerando la aproximación de Lewis.

Para una red trifásica la matriz de impedancias serie Z_{abc} tendría la siguiente forma:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Rac_a + Rn & Rn & Rn \\ Rn & Rac_b + Rn & Rn \\ Rn & Rn & Rac_c + Rn \end{bmatrix} = j \frac{w\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{De}{r'_a} & \ln \frac{De}{D_{ab}} & \ln \frac{De}{D_{ac}} \\ \ln \frac{De}{D_{ba}} & \ln \frac{De}{r'_b} & \ln \frac{De}{D_{bc}} \\ \ln \frac{De}{D_{ca}} & \ln \frac{De}{D_{cb}} & \ln \frac{De}{r'_c} \end{bmatrix} \quad (69)$$

Si la línea es completamente transpuesta o se considera como tal, la matriz de impedancias tendrá la forma:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_S & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_S & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_S \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$Z_S = Rac + Rn + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{R'MG} \quad (71)$$

$$Z_M = Rn + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{DMG} \quad (72)$$

Donde:

Z_S : Impedancia propia en (Ω).

Z_M : Impedancia mutua en (Ω).

Las impedancias de secuencia de acuerdo a la aproximación de Lewis serían:

$$Z_1 = Z_2 = Rac + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{DMG}{R'MG} \right) \quad (73)$$

$$Z_0 = Rac + 3Rn + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De^3}{R'MG \times DMG^2} \quad (74)$$

Donde:

Z_0 : Impedancia de secuencia cero en (Ω).

Z_1 y Z_2 : Impedancias de secuencia positiva y negativa, respectivamente en (Ω).

De las ecuaciones (51) y (55) verificamos que las impedancias de secuencia cero no dependen del sistema de retorno por tierra, sin embargo la variación de la impedancia de secuencia cero, teniendo en cuenta la influencia de un suelo real, se ve reflejada en la modificación de la distancia (De), lo que quiere decir es que

se está considerando una línea con un conductor ficticio de retorno, situado a una distancia de los conductores de fase igual a $De = 658.86 \sqrt{\frac{f}{\rho}}$.

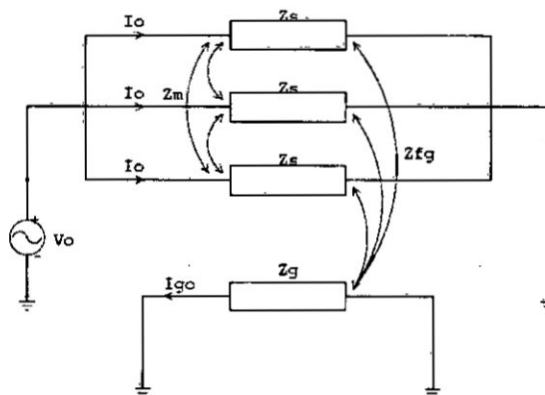
m. Impedancia de secuencia cero de una red trifásica.

En las líneas de transmisión y distribución, que estarán enlazadas con la SSEE Milpo 138/50/10kV, estarán diseñadas por torres metálicas que llevarán en su cúpula dos cables de guarda y torres metálicas que llevan un cable de guarda, por ello las ecuaciones para determinar la impedancia de secuencia cero de cada circuito se tendrán los siguientes casos.

m.1. Impedancia de secuencia cero de una red trifásica de un circuito con un cable de guarda.

Para determinar la expresión correspondiente consideremos todos los acoplos que están presentes entre las fases y el cable de guarda (Ver figura N°17.1). El circuito trifásico se alimenta con una fuente de voltaje de secuencia cero. Para obtener la impedancia de secuencia cero Z_0 basta con determinar la relación (V_0/I_0) .

Figura N°17.1: Acoplamiento de línea de 3 fases con un cable de guarda.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica

Autor: Leonardo Cardona C.

La diferencia de potencial en las fases es igual a V_0 y se puede evaluar en una de las tres ramas.

$$V_0 = Z_S \cdot I_0 + 2 Z_M \cdot I_0 - Z_{fg} \cdot I_{g0} \quad (75)$$

En la rama correspondiente al cable de guarda:

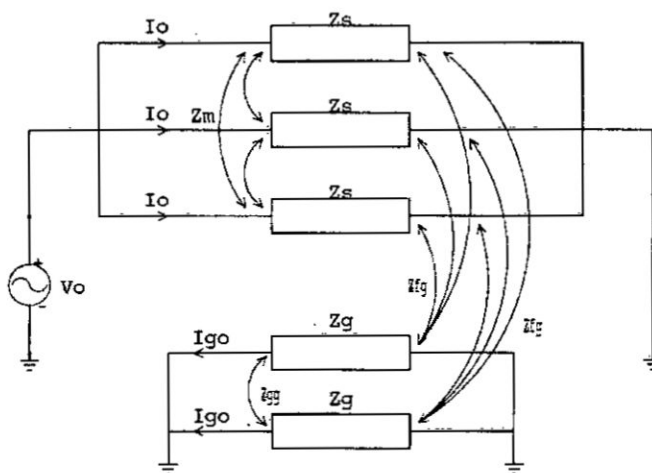
$$I_{g0} = \frac{3Z_{fg} \cdot I_0}{Z_g} \quad (76)$$

$$Z_{0E} = (Z_S + 2 Z_M) - \frac{3Z_{fg}^2}{Z_g} = Z_0 - 3 \frac{3Z_{fg}^2}{Z_g} \quad (77)$$

m.2. Impedancia de secuencia cero de una red trifásica de un circuito con dos cables de guarda.

En la figura N°17.2 se observa los acoplos de impedancias que se presentan entre las tres fases de un circuito y los dos cables de guarda.

Figura N°17.2: Acoplamiento de línea de 3 fases con un cable de guarda.



Fuente: Modelamiento de redes de transmisión de energía eléctrica
 Autor: Leonardo Cardona C.

Evaluamos la tensión (V_0) en cualquiera de las fases:

$$V_0 = (Z_S + 2 Z_M) \cdot I_0 - 2Z_{fg} \cdot I_{g0} \quad (78)$$

La ecuación de voltajes sobre uno de los cables de guarda:

En la rama correspondiente al cable de guarda:

$$I_{g0}Z_g = 3Z_{fg} \cdot I_0 - Z_{gg} \cdot I_{g0} \quad (79)$$

$$I_{g0} = \frac{3Z_{fg} \cdot I_0}{Z_g + Z_{gg}} \quad (80)$$

La impedancia de secuencia cero será:

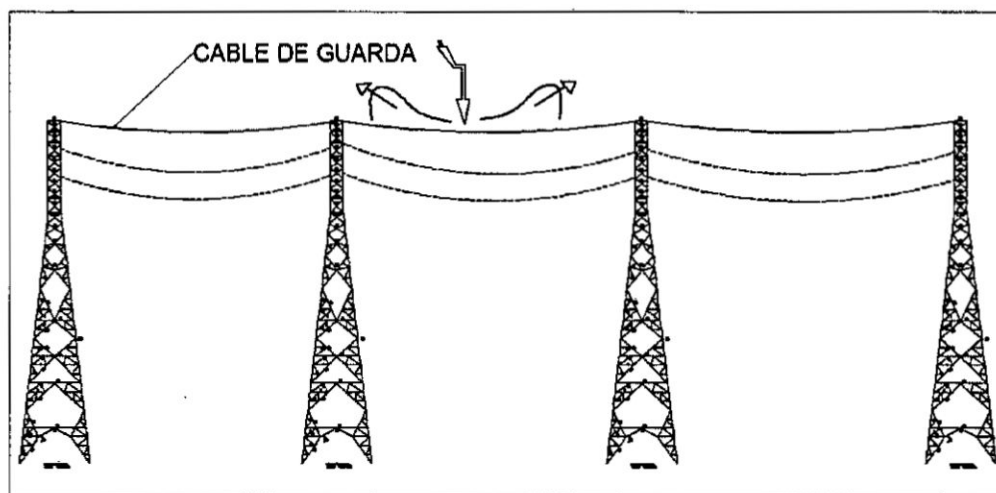
$$Z_{0E} = (Z_S + 2 Z_M) - 6 \frac{Z_{fg}^2}{Z_g + Z_{gg}} = Z_0 - 6 \frac{3Z_{fg}^2}{Z_g + Z_{gg}} \quad (81)$$

2.3.2. Parámetros eléctricos de las puestas a tierra en las líneas de transmisión.

El primer escenario se muestra en la figura N°18.1, y se da cuando una descarga atmosférica cae en un cable de guarda, la corriente debido a la descarga fluye en ambos sentidos a través de la impedancia impulso del cable de guarda.

La corriente y la tensión se propagan hasta llegar a las torres, donde se propagan hasta llegar hacia la base de las torres, encontrándose con una resistencia de puesta a tierra que disipa la energía asociada con la descarga atmosférica.

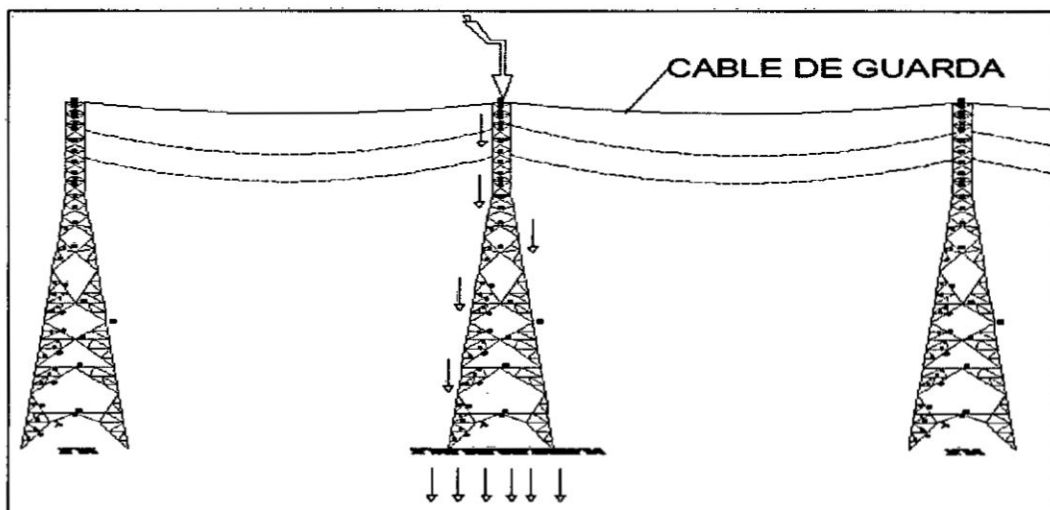
Figura N°18.1: Descarga atmosférica en el vano del cable de guarda, Línea de transmisión 138 kV.



Fuente: Propia

El otro escenario se muestra en la figura N° 18.2, y se da cuando la descarga atmosférica cae directamente en la torre, en este caso la dirección que sigue la descarga es hacia la puesta a tierra de dicha torre, dicha descarga viene acompañado de una corriente que avanza en dirección a la puesta a tierra teniendo como oposición la impedancia de la torre.

Figura N°18.2: Descarga atmosférica en torre. Línea de transmisión 138 kV.



Fuente: propia.

Las descargas atmosféricas que inciden en los vanos de los cables de guarda y en las torres, tienen la tendencia de caer en las proximidades de dichos cables, porque constituyen los puntos más elevados de las líneas de transmisión. Dependiendo del tipo de torre y de su masa metálica pueden llegar a caer hasta el 60% de los rayos en las proximidades de la torre.

Cuando la descarga atmosférica cae en el cable de guarda, induce una fracción de su potencial en los conductores de fase (factor de acople capacitivo entre conductores y cable de guarda).

El problema se presenta cuando la resistencia de puesta a tierra de la torre es alta y la corriente del rayo "rebota", quiere decir que desarrolla una alta tensión que eleva el potencial de la torre de transmisión con relación a la resistencia de puesta a tierra.

La descarga atmosférica que cae en el cable de guarda o directamente en la torre, al llegar a la base de la torre (suelo) y encontrar una alta resistencia (resistencia de puesta a tierra de la estructura) no encuentra un medio propicio para el esparcimiento de la corriente del rayo de manera eficiente y hace que la torre alcance un alto potencial eléctrico, que aumenta súbitamente la tensión entre el brazo de la torre y el conductor de fase, hasta el punto que se supera el aislamiento proporcionado por el aire exterior a la cadena de aisladores y se presenta un flameo desde el brazo de la torre (que se encuentra a un alto potencial) y el conductor de fase. Lo anterior es lo que se conoce como flameo

inverso y se llama así porque se genera desde el brazo de la torre hacia el conductor de fase, como puede apreciarse en la figura N°20.

Además la corriente a través de la torre también produce un campo magnético variable entre el conductor de fase y la torre, que contribuye al flameo inverso.

Según todo lo anterior para obtener un número de salidas de la línea aceptable, la resistencia de puesta a tierra debe ser muy baja y más aún cuando el nivel isocerámico es alto.

La ecuación (82), representa la ecuación de la onda impulso en función del tiempo.

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (82)$$

Donde:

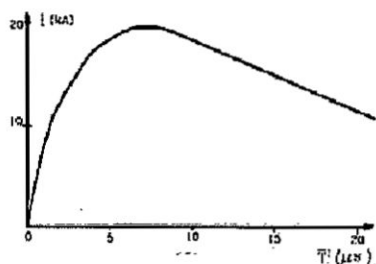
I_0 : Corriente máxima de la onda del rayo en (kA).

α : Constante asociada al tiempo de cola de la onda.

β : Constante asociada al tiempo de frente de la onda.

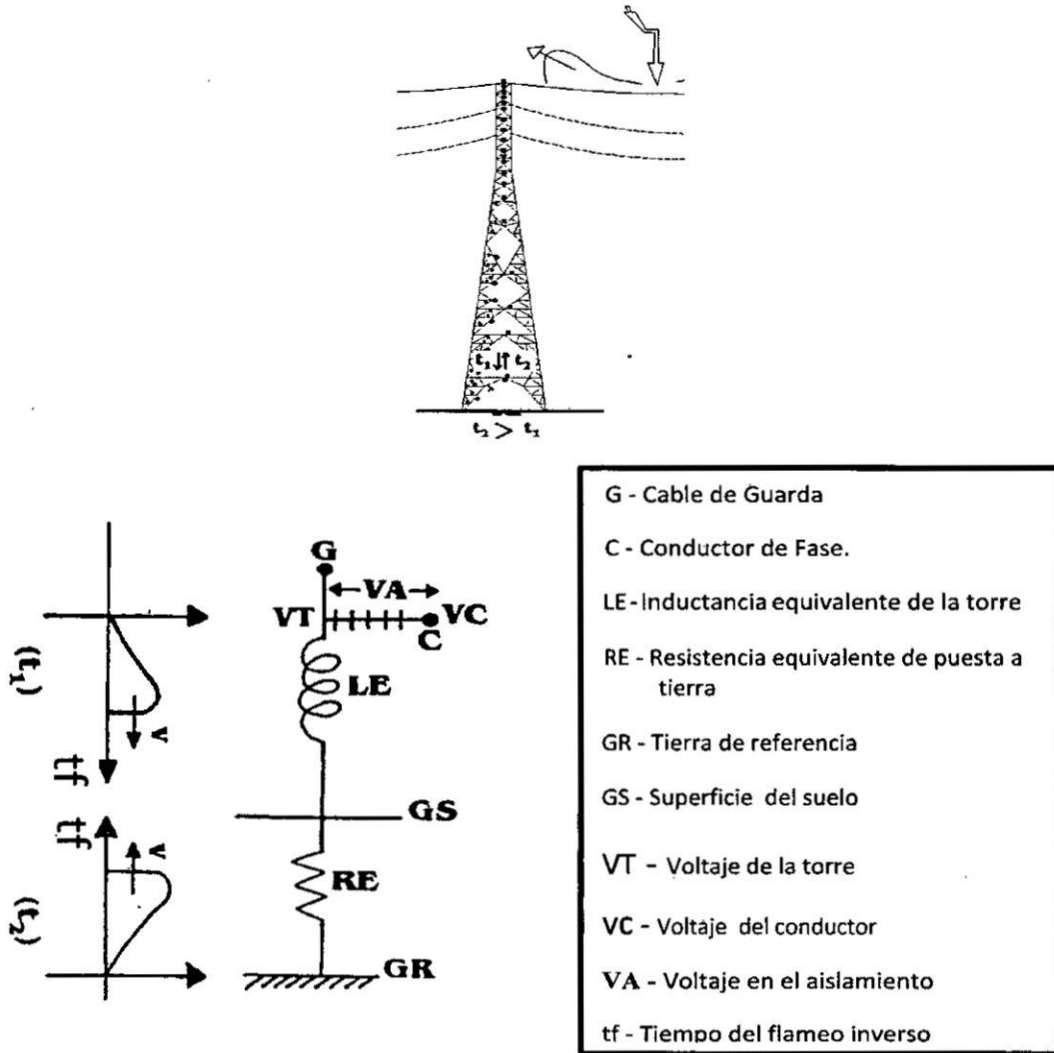
Se muestra en la figura N°19, la onda normalizada de impulso al rayo de origen atmosférico.

Figura N°19: Forma de onda ideal de un rayo.



Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.
Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

Figura N°20: Flameo inverso en una torre de transmisión.



Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.

Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

a. Resistencia de puesta a tierra de una torre de transmisión y distribución.

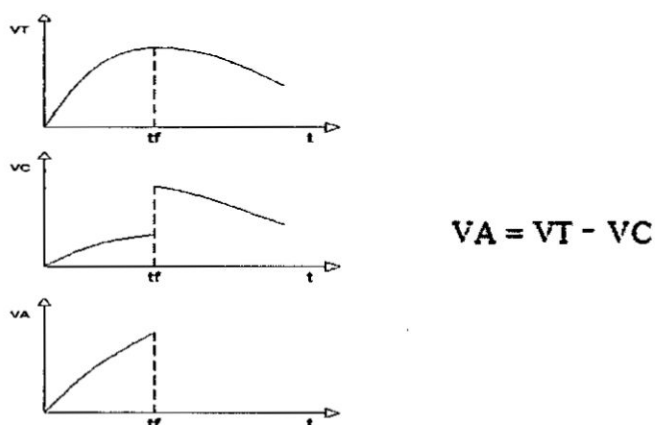
La corriente asociada con la descarga atmosférica al llegar a la base de la estructura se encuentra con la puesta a tierra de la torre, cuya instalación depende de la composición del suelo cuya finalidad es disipar la energía del rayo. Cuando una línea de transmisión tiene continuas salidas debido a flameos

inversos por altas resistencias de puesta a tierra en las estructuras, se debe reducir la resistencia que la corriente asociada al rayo encuentra al llegar al suelo.

Sabiendo el nivel cerámico de la zona por donde cruza la línea de transmisión y distribución, podemos por medio de una gráfica probabilística de distribución de rayos, calcular el valor de la corriente de rayo que aceptaremos nos produzca flameo inverso (la anterior decisión, se toma dependiendo del grado de confiabilidad que pretendemos dar a la línea de transmisión); con dicha corriente y con el voltaje de flameo de la cadena de aisladores podemos buscar el valor necesario de resistencia de puesta a tierra.

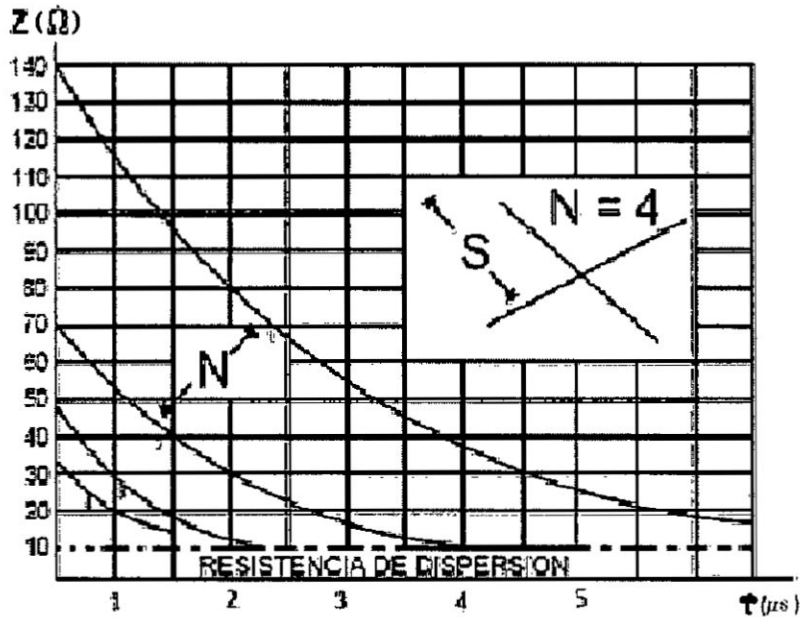
En la práctica una línea de transmisión no tiene un valor constante de resistencia de puesta a tierra, ya que presenta una gama de valores según; la localización de las distintas torres, por lo que al reducir las resistencias de las puestas a tierra de las líneas de transmisión, se miden los valores de resistencia de las torres de transmisión de cada torre.

Gráfico N°2: Flameo inverso en una torre de transmisión.



Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.
Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

Gráfico N°3: Variación de la impedancia transitoria (Z) y efecto del número de contrapesos (N).



Z = 150 Ω ; Impedancia de impulso inicial.
 R = 10 Ω ; Resistencia de dispersión.
 N = 4, 3, 2, 1; Número de cables de contrapeso.
 Cada curva corresponde a un contrapeso instalado

Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.
 Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

b. Cables de contrapeso.

La utilización de estos cables es de práctica común y consiste en enterrar horizontalmente cables conductores pegados a las estructuras de las torres, la resistencia disminuirá con el aumento de la longitud y con aumento del diámetro del contrapeso enterrado (hasta cierto punto).

El sistema de puesta a tierra se comporta como una impedancia transitoria, variando desde su valor inicial hasta el valor de resistencia de dispersión.

En el gráfico N°3 están indicadas las curvas que muestran esta variación para determinada configuración de contrapesos. Un cable de contrapeso tiene una impedancia inicial de impulso, dependiendo de las condiciones del suelo, normalmente entre 150 y 200 Ω . Con la propagación de la onda de corriente a través del contrapeso, esta impedancia de impulso es reducida a su resistencia de dispersión en un período de tiempo dependiendo de la longitud del cable y de la velocidad de propagación de impulso. En el gráfico anterior podemos observar que al colocar más contrapesos bajamos el valor total de la impedancia transitoria inicial. (Es como colocar resistencias de aproximadamente 140 Ω en paralelo).

Tabla N°1: Variación de la impedancia inicial según el número de cables de contrapeso.

N° de cables de contrapeso	Impedancia Inicial (Ω)
1	140
2	$\frac{140 \times 140}{140 + 140} = 70$
3	$\frac{70 \times 140}{70 + 140} = 46.6$
4	$\frac{46.6 \times 140}{46.6 + 140} = 35$

Fuente propia.

Los impulsos atmosféricos se propagan en una estructura con una velocidad aproximada del 80% de la velocidad de la luz, por lo que la velocidad de propagación será:

$$V_{pt} = 0.8 \times 300,000 \frac{km}{s} \cdot \frac{1 s}{10^6 \mu s} \cdot \frac{1000 m}{1 km} \quad (83)$$

$$V_{pt} = 240 \frac{m}{\mu s} \quad (84)$$

V_{pt} : Velocidad de propagación de la corriente de un rayo en un contrapeso en $(\frac{m}{\mu s})$.

Según lo anterior, un contrapeso de 300m con una impedancia de impulso de aproximadamente 150 Ω , tardaría 6 μs para que su resistencia efectiva sea reducida a su resistencia de dispersión, haciendo el análisis para esta conclusión sería:

$$t = \frac{s}{v} \quad (85)$$

t: Tiempo que dura el rayo en (s).

s: Espacio de ida y vuelta (s= 600 m).

v : Velocidad del rayo ($V_{pc} = 100 \frac{m}{\mu s}$).

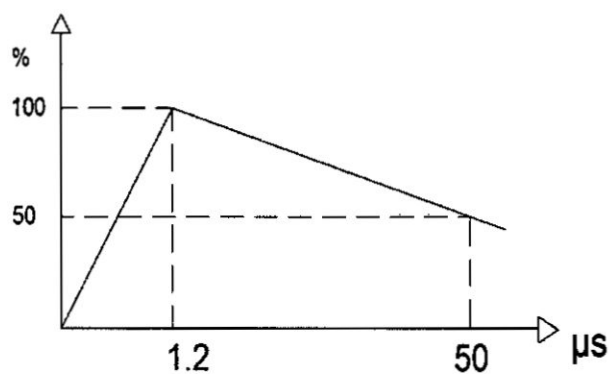
$$t = \frac{600}{100 \frac{m}{\mu s}} = 6 \mu s \quad (86)$$

Del mismo modo, un cable de contrapeso de 75m con una impedancia de impulso de aproximadamente 150 Ω , solo necesitará 1.5 μs para reducir su resistencia efectiva a su resistencia de dispersión.

Lo anteriormente descrito, sirve para demostrar que desde el punto de vista de respuesta transitorio (fenómenos muy rápidos) es mejor la utilización de varios cables contrapesos con longitudes menores que un cable contrapeso con longitud muy grande. La impedancia de impulso inicial de los contrapesos, depende de las condiciones del suelo (normalmente entre 150 y 200 Ω) y no depende directamente de la longitud del cable. Por lo que la longitud del contrapeso debe ser tal que el tiempo que tarde el impulso en ir a la punta y volver, sea superior al tiempo de crecimiento del fenómeno. Como estamos hablando de una descarga atmosférica, la cual es normalizada por una onda de

1,2 x 50 μ s o superior garantizándonos que cuando la onda vuelve, (el fenómeno) ya se encuentra decreciendo (Ver gráfico N° 4).

Gráfico N°4: Onda normalizada para descargas atmosféricas.

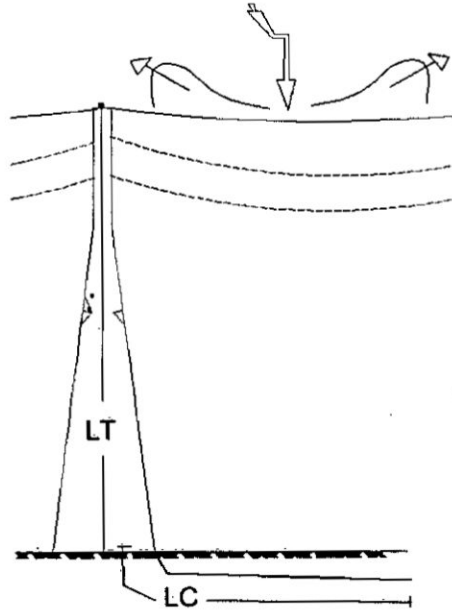


Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.
Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

Como conocemos las velocidades de propagación del impulso en la torre y en los contrapesos además el tiempo de crecimiento del fenómeno, podemos calcular la longitud del contrapeso. Visualicemos la distancia que ha de recorrer el impulso según la figura N°21.

Estableciendo que la transición es prácticamente completa en el tiempo necesario para la onda retornar del extremo remoto del cable contrapeso.

Figura N°21: Distancia que recorre el impulso de onda.



Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.

Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

Donde:

LT: Longitud de la torre en (m).

LC: Longitud del contrapeso en (m).

Ltotal: Longitud total en (m).

$$L_{total} = 2 LT + 2LC \quad (87)$$

Para el caso de la línea de transmisión Paragsha II-Milpo 138kV se está proyectando torres de 35 m de altura entonces el tiempo que transcurre la onda impulso en recorrer la torre será:

t_T : Tiempo en la torre en (μs).

t_C : Tiempo en el contrapeso en (μs).

s: Espacio; ida y vuelta ($s = 70$ m).

v: Velocidad del rayo, ($V_{PT} = 240 \frac{m}{\mu s}$).

$$t_T = \frac{2 \cdot Lt}{V_{PT}} = \frac{70m}{240 \frac{m}{\mu s}} = 0.29 \mu s \quad (88)$$

Hallando el tiempo en el contrapeso:

$$t_C = t_{TOTAL} - t_T \quad (89)$$

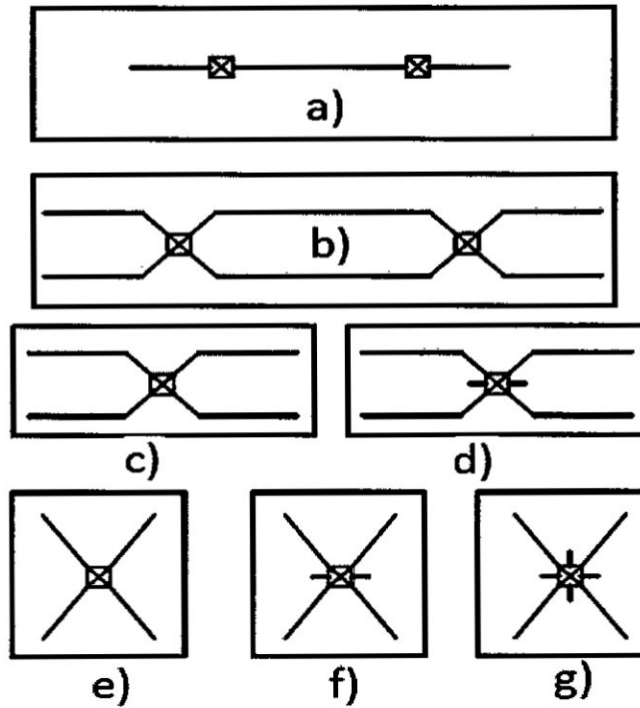
$$t_C = 1.5\mu s - 0.29\mu s = 1.21\mu s \quad (90)$$

$$s = vt = 100 \frac{m}{\mu s} \times 1.21\mu s = 121m \quad (91)$$

Como es el espacio de ida y vuelta, el contrapeso debe tener una longitud de aproximadamente 60 m. Obtendríamos un valor un poco más corto de la longitud de contrapesos si asumimos un tiempo total más cercano al pico de la onda normalizada (1.2 μs), o si tenemos una estructura más alta. Si el contrapeso es muy largo, la parte crítica de la descarga (el ascenso) ya pasó y el impulso no ha llegado a la punta del contrapeso, lo que podría verse como "sobrecostos innecesario".

Algunos tipos de arreglos de cables contrapesos, utilizados para el mejoramiento de las puestas a tierra de las estructuras de una línea de transmisión son mostrados en la figura N° 22. Los arreglos (a) y (b) son muy costosos y solo traen ventaja para fenómenos de baja frecuencia (60Hz), pues es el caso de los contrapesos muy largos el arreglo más común es el (e).

Figura N°22: Tipos de contrapesos en líneas de transmisión.



Fuente: Puestas a tierra de líneas de transmisión.
Autor: Ing. Jaime León Ortiz.

Los contrapesos teóricamente no tienen que ser demasiados profundos, pero si están cerca de la superficie pueden ser saqueados fácilmente.

2.3.3. Modelado de puesta tierra como circuito "R-L" desarrollado por J.G. Anderson.

a. Criterios del modelado en circuito "R-L".

En esta sección se evalúa el estudio de la PT para descargas de Rayo de J.G. Anderson, utilizando un modelo de circuito de una Impedancia (Z_s) del cable de guarda en paralelo con la Inductancia (L) de la torre y en serie con la resistencia (R) de la PT; donde el modelo del circuito de aterramiento en baja frecuencia es equivalente al circuito en alta frecuencia con respuesta transitoria a las corrientes

de impulso de rayo como en la figura N° 23; para la protección del aislamiento de la Línea Eléctrica se considera:

- Las resistencias de pie de torre deben ser menor a 25Ω (CNE) y los ángulos de blindaje (γ) deben tener el valor adecuado, considerando que está relacionado con la configuración de la estructura y el coeficiente de disrupción (δ) de avería a la distancia de descarga de Rayo; los autores han usado ($\delta = 0.64$) 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".

b. 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 N° 23 a) y 23 b) representan dos circuitos equivalentes convencionales de la puesta a tierra de una línea de transmisión, conformada por el cable de guarda, la estructura o torre y la resistencia de puesta a tierra 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 están conectados en serie con la resistencia de puesta a tierra y se obtiene el modelo del circuito "R-L".

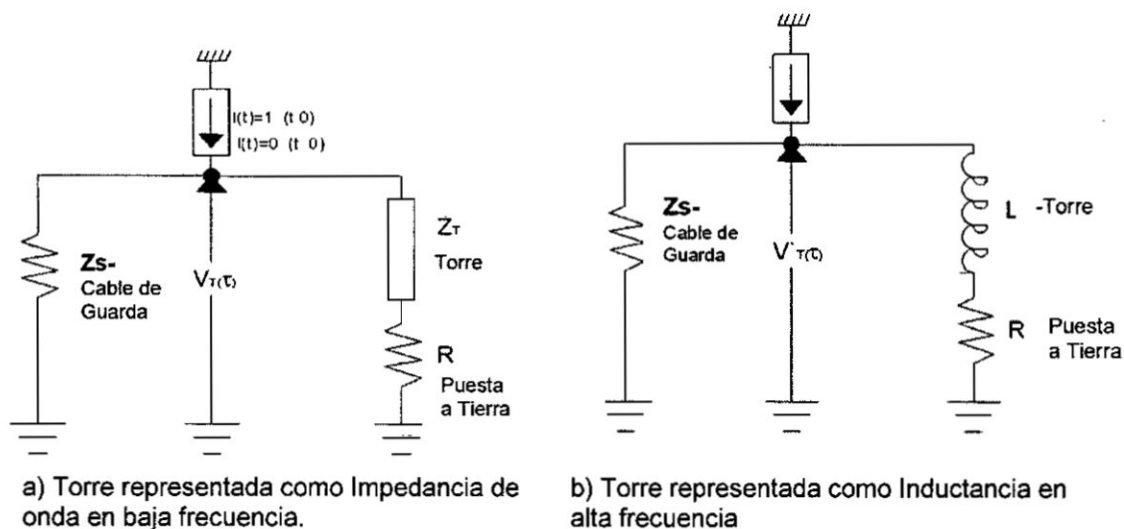
Los componentes del circuito de la figura N°23 b) se han seleccionado según el criterio desarrollado por J.G. Anderson, el cual considera que estos circuitos son equivalentes; en las condiciones de frontera debe cumplir que las respuestas de la tensión inicial y final de ambos circuitos deben ser iguales. Según el modelado de J.G. Anderson se ha seleccionado valores únicos para (Z'_s) y (R'), expresados por las ecuaciones siguientes:

$$Z'_s = \frac{2xZ_S Z_T}{Z_S + 2Z_T} \quad (92)$$

$$R' = \frac{RxZ_T}{Z_S - R} \quad (93)$$

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.

Figura N° 23: Circuitos equivalentes de puesta a tierra, sometidos a Corriente de Rayo, modelo en baja y alta frecuencia.



Fuente: Modelado y análisis de la respuesta transitoria de puestas a tierra no extensas
 Autor: Erasmo Amador Echeverría Peche.

Para las condiciones equivalentes de respuesta de Tensión $V(t)$ de los circuitos (23 a) y (23 b) se ha seleccionado el valor de la Inductancia "L" equivalente, dada por la ecuación.

$$L = \left(\frac{Z'_S + 2R'}{Z'_S} \right)^2 \times \frac{2 \cdot Z_w \cdot \tau_T}{(1-\varphi)^2} \quad (94)$$

Donde:

L : Inductancia total de la torre en (μH) ó también L/Hpc en (H/m).

τ_T : Tiempo de viaje de la onda en la torre en (μS) $\rightarrow \tau_T = 3 Hpc / 100(S)$,

Z_w : Impedancia de Impulso de la torre (no la impedancia de onda característica de torre) en (Ω).

Z_S : Impedancia del Cable de Guarda en (Ω).

φ : Factor de acoplamiento.

De acuerdo al modelo propuesto por J.G. Anderson, la impedancia de impulso de la torre se ha definido como:

$$Z_w = \frac{(2 \cdot Z_S^2 + Z_T)}{(Z_S + 2 \cdot Z_T)^2} \cdot \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \quad (95)$$

El factor de acoplamiento de onda (φ), queda definido como:

$$\varphi = \left(\frac{2 \cdot Z_T - Z_S}{Z_S + 2 \cdot Z_T} \right) \cdot \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (96)$$

El factor de acoplamiento " φ ", puede ser negativo, cero y positivo, cero en los puntos críticos de: $Z_T = R$ y $Z_T = \frac{Z_S}{2}$

$\varphi < 0$, El sistema es no acoplado,

$\varphi = 0$ El sistema es críticamente acoplado y

$\varphi > 0$, El sistema es sobre acoplado, ya que decrece lentamente del valor inicial al valor final de la Tensión en la cima de la torre VT (t).

Si $R = R' = 0$, reemplazando las ecuaciones (95) y (96) en la ecuación (94), se reduce a la fórmula clásica de la inductancia de la torre.

$$L = Z_T \cdot \tau_T \quad (97)$$

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 (94), (95) y (96) 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 puesta a tierra de; 15, 25, 40, 60 y 100 Ω ; el

resultado de la simulación para cada valor de (R) se muestra en el gráfico N° 5; se observa que los valores de la inductancia eficaz (L) cerca al origen crecen hacia el infinito (indeterminado) cuando la resistencia de la puesta a tierra 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 puesta a tierra con $R > 0$. En casos específicos, los valores de la inductancia de la torre pueden utilizarse en el circuito de la figura N° 23 b) para el cálculo de la tensión en la cima de la torre.

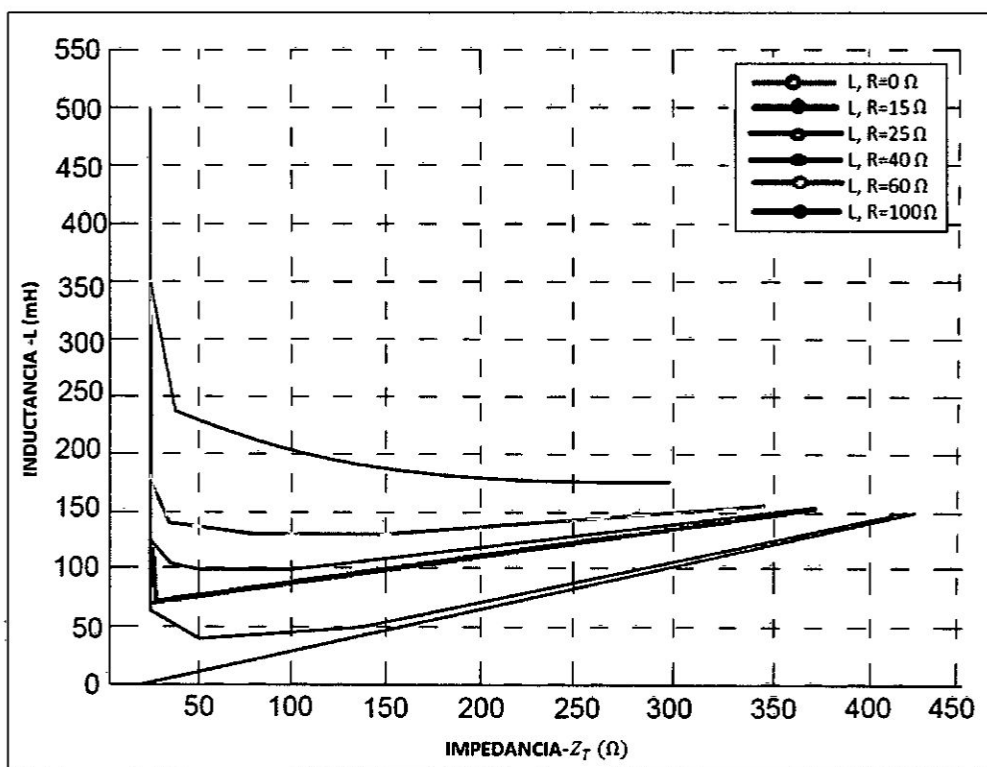
Tabla N°2: Tabla de parámetros de cables de guarda y torres metálicas de líneas de transmisión: según el nivel de tensión en torre (Z_T).

Tensión (kV)	Longitud de cadena de aisladores (m)	Impedancia de torre (Ω)	Cable de guarda		Impedancia de cable de guarda (Ω)
			Número	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

Fuente: modelado y análisis de la respuesta transitoria de puestas a tierra no extensas

Autor: Erasmo Amador Echeverría Peche.

Gráfico N° 5: Inductancia eficaz de la torre como función de impedancia de onda de la torre (ZT) y Resistencia de puesta a tierra, para Impedancia de cable de guarda equivalente (Zcg = 200 Ω).



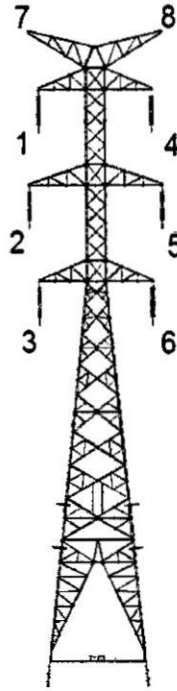
Fuente: Modelado y análisis de la respuesta transitoria de puestas a tierra no extensas

Autor: Erasmo Amador Echeverría Peche.

2.3.4. Distribución de la corriente de cortocircuito en la red de tierra de la subestación y cables de guarda.

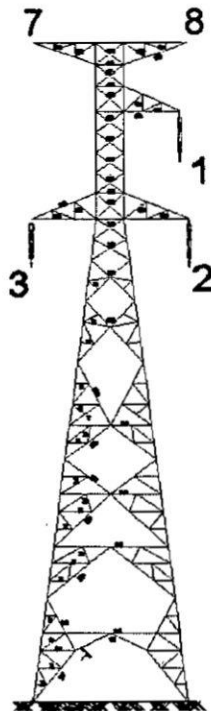
Luego de los conceptos establecidos en el marco conceptual sobre los parámetros eléctricos se empezarán a analizar las redes de transmisión y distribución que estén conectadas a la SSEE Milpo 138/50/10kV. A continuación se muestra los tipos de armados en las líneas que conectan a la SSEE Milpo 138/50/10kV.

Figura N°24: Línea de transmisión Paragsha II – Milpo 138kV/ SE N°3- Milpo 50kV (1.3 km de distancia).



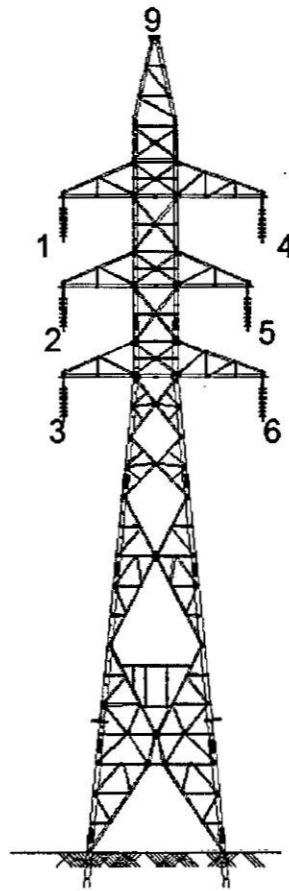
Fuente: propia

Figura N°25: Línea de transmisión Paragsha II – Milpo 138kV (11 km de distancia).



Fuente: propia

Figura N°26: Línea de distribución Milpo - Chicrin (Atacocha) / Candelaria – Milpo 50 kV (1.13 km de distancia).

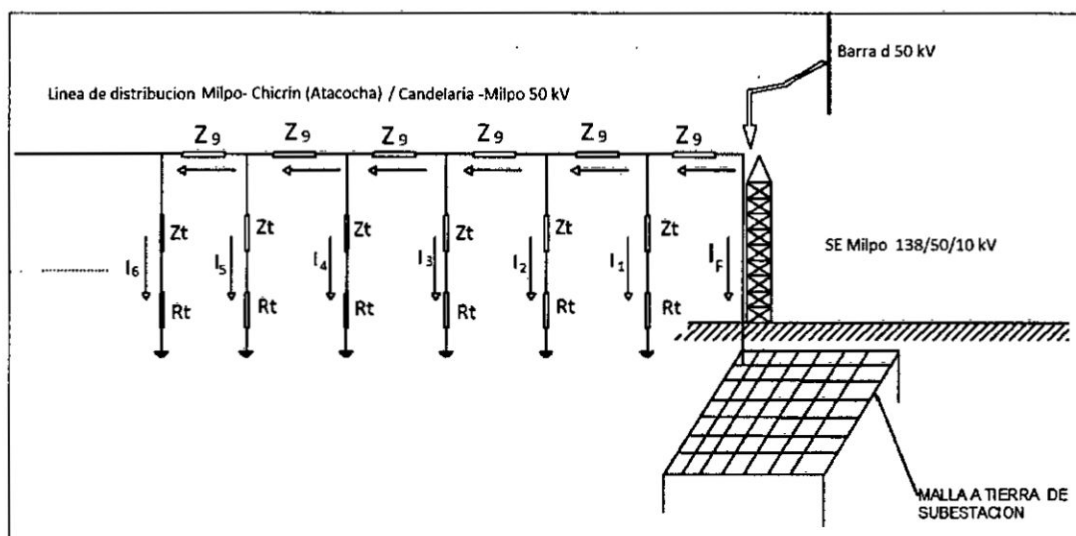


Fuente: propia

El diagrama unifilar correspondiente a la red (véase figura N°27) donde circulan las corrientes de cortocircuitos corresponde a la conexión de elementos como son: cables de guarda y mallas a tierra, en el cable de guarda y las torres se tienen elementos tales como: impedancia propia e impedancia mutua del cable de guarda. En las torres metálicas de celosía de transmisión y distribución; se origina una inductancia al momento de descargar las corrientes de fallas, luego de descender por las torres la corriente se encuentra con las puestas a tierra para luego descargar en el subsuelo. En la malla a tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV; la corriente de falla (cortocircuito) se descarga a través de la malla

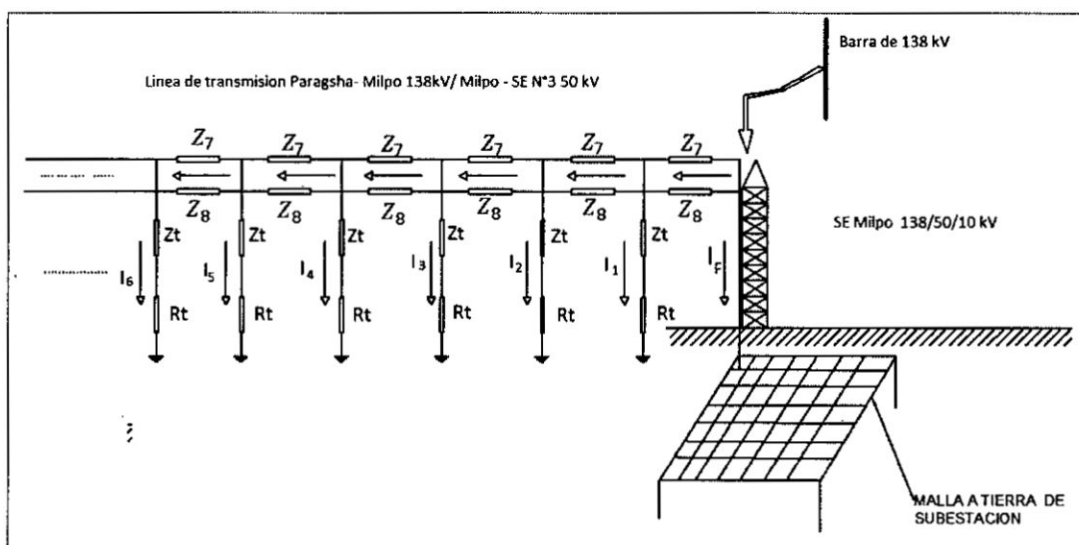
horizontal y jabalinas, la duración del proceso de descarga está en el intervalo de los milisegundos, la corriente máxima es la subtransitoria que corresponde a medio ciclo de onda.

Figura N°27: Esquema de impedancias de la red de tierra. Línea de distribución Milpo - Chicrín (Atacocha) / Candelaria - Milpo 50 kV. Línea diseñada con un solo cable de guarda.



Fuente: propia.

Figura N°28: Esquema de impedancias de la red de tierra. Línea de transmisión Paragsha- Milpo 138kV/ Milpo -SE N°3 50 kV (12 km de distancia). Línea diseñada con dos cables de guarda.



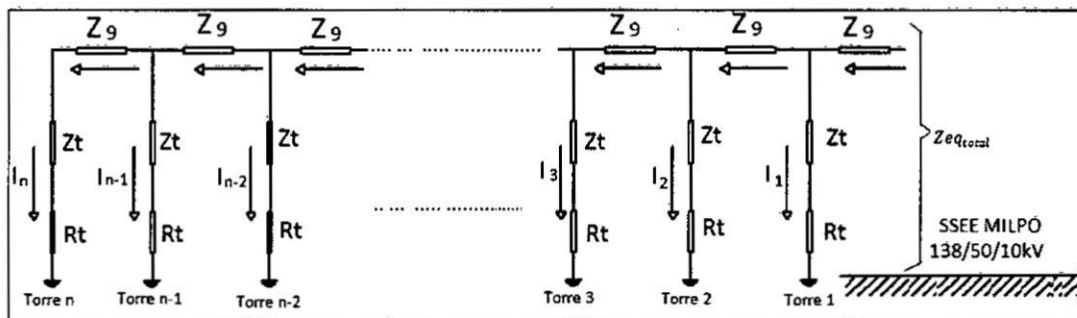
Fuente: propia

Analizamos la figura N° 28, la corriente de falla proveniente de una de las fases de la línea en 138 kV, se distribuirá en los conductores de tierra y en el cable de guarda, en este se distribuye una parte de la corriente de cortocircuito en cada torre, donde la torre más cercana a la SSEE Milpo 138/50/10kV; tiene la corriente de mayor proporción y la torre más lejana a la subestación se distribuye una corriente de mínima proporción.

Para hallar la proporción de corriente que se distribuye por el cable de guarda se realizará el siguiente análisis para hallar la impedancia equivalente de los cables de guarda y torres distribuidos a lo largo del terreno.

Tomamos como ejemplo a la línea de distribución Milpo - Chicrín (Atacocha) / Candelaria – Milpo 50 kV de la figura N°26.

Figura N° 29: Línea de distribución Milpo - Chicrín (Atacocha) / Candelaria – Milpo 50 kV.



Fuente: propia

Donde:

Z_t: La impedancia de la torre metálica de celosía en (Ω).

R_t: Resistencia de puesta a tierra en (Ω).

Z_g: Impedancia del cable de guarda de un determinado vano en (Ω).

Para la última torre "n" de la línea, la impedancia equivalente sería:

$$Z_{eq_n} = Z_0 + Z_t + R_t \quad (98)$$

Hasta la torre "n-1" la impedancia equivalente sería:

$$Z_{eq_{n-1}} = Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + Z_t + R_t}} \quad (99)$$

Hasta la torre "n-2" la impedancia equivalente sería:

$$Z_{eq_{n-2}} = Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + Z_t + R_t}}}} \quad (100)$$

Hasta la torre "n-3" la impedancia equivalente sería:

$$Z_{eq_{n-3}} = Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + Z_t + R_t}}}}}} \quad (101)$$

Haciendo la misma secuencia hasta llegar a la torre N°1 la impedancia total sería:

$$Z_{eq_1} = Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_0 + Z_t + R_t}}}}}}}}}}}} \quad (102)$$

Asumimos que la línea es de larga distancia y que hay numerosas torres de celosía con esta suposición podemos realizar el siguiente artificio para resolver la ecuación:

$$Z_{eq_{total}} = Z_9 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_9 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_9 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_t + R_t} + \dots}}}} \quad (103)$$

$$Z_{eq_{total}} = Z_9 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + Z_{eq_{total}}} \quad (104)$$

Reemplazando ($Z_{eq_{total}}$):

$$Z_{eq_{total}} = Z_9 + \frac{1}{\frac{1}{Z_t + R_t} + \frac{1}{Z_{eq_{total}}}} \quad (105)$$

Cambiamos de variables para hallar la solución de ($Z_{eq_{total}}$):

$Z_{eq_{total}} = M ; Z_9 = a ; Z_t + R_t = b$ y lo reemplazamos para hallar la solución:

$$M = a + \frac{1}{\frac{1}{b} + \frac{1}{M}} \rightarrow (M + b)M = aM + ab + bM \rightarrow M^2 - aM - ab = 0 \quad (106)$$

Utilizamos la expresión de las soluciones cuadráticas para nuestro problema y reemplazamos las variables de impedancias y resistencias:

$$Z_{eq_{total}} = \frac{Z_9 \pm \sqrt{Z_9^2 + 4 \cdot Z_9 \cdot (Z_t + R_t)}}{2} \quad (107)$$

Como tenemos 2 soluciones de impedancia equivalente, elegimos las soluciones positivas ya que son valores positivos de resistencias e inductancias que se tiene, con ello tenemos para cualquier tipo de línea con cable de guarda de transmisión o distribución:

$$Z_{eq_{total}} = \frac{Z_{c.g} + \sqrt{Z_{c.g}^2 + 4 \cdot Z_{c.g} \cdot (Z_t + R_t)}}{2} \quad (108)$$

Donde:

$Z_{eq_{total}}$: Impedancia equivalente total de: Cables de guarda, resistencia de puesta a tierra de torres e impedancia de torres en una línea de transmisión o distribución en (Ω).

$Z_{c.g}$: Impedancia de cable de guarda de un vano de línea en (Ω).

Z_t : Impedancia de la estructura de soporte (madera, celosía), en el estado estable $Z_t = 0 \Omega$, en el estado transitorio se tiene que $Z_t \neq 0 \Omega$.

R_t : Resistencia de puesta a tierra de la base de las estructuras de soporte en (Ω).

La impedancia de los cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución se obtiene mediante la ecuación descrita a continuación y podemos tener dos casos, el primero es cuando en la torre se tiene un cable de guarda el segundo es cuando en dicha torre se tiene 2 cables de guarda.

$$Z_{cg} = \left[R_{CD} + 0.000988f + j0.002938 \cdot f \cdot \ln \left(\frac{D_e}{GMR} \right) \right] \frac{1}{n_{cg}} \quad (109)$$

Donde:

Z_{cg} : Impedancia del cable de guarda en (Ω/km)

f : Frecuencia en (Hz).

R_{CD} : Resistencia del conductor (Ω/km).

n_{cg} : Número de cables de guarda por torre.

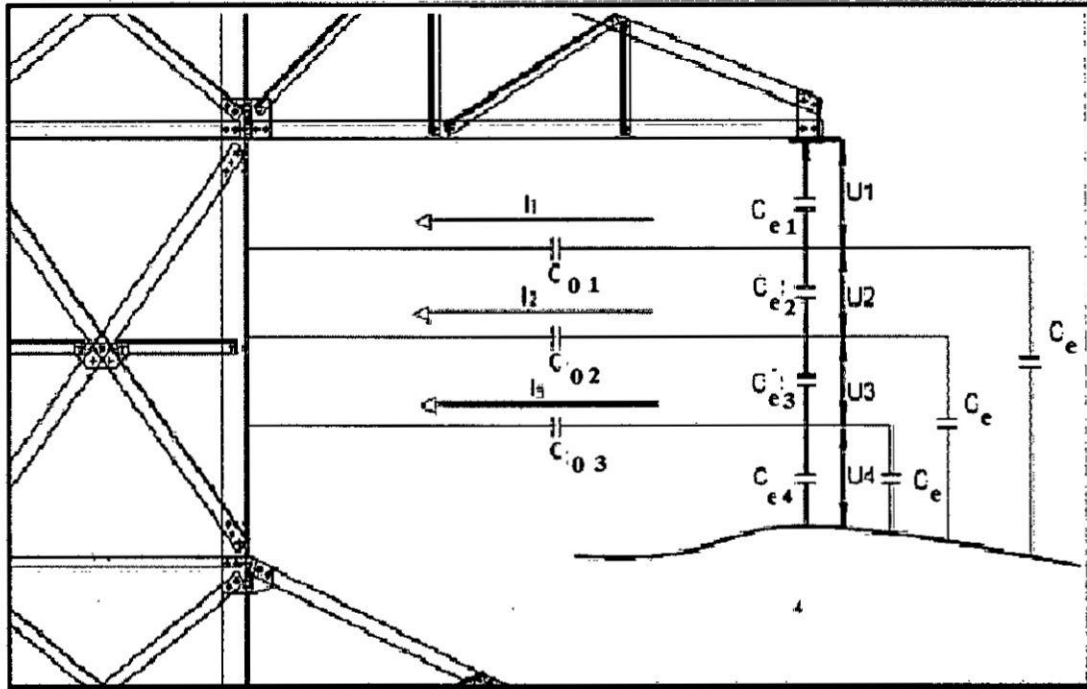
GMR : Radio medio geométrico del conductor en (m).

D_e : Profundidad equivalente de retorno que es igual a $658.86 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$ en (m).

2.3.5. Influencia de las corrientes de fuga a tierra de las líneas de transmisión y distribución.

Existe una mínima influencia de las corrientes de fuga a través de las capacitancias parásitas en la cadena de aisladores, existen dos tipos de capacitancia, se trata de la capacitancia parásita (C_e) presente en potencial – potencial (son pequeñas) y la capacitancia parásita (C_0) entre potencial – tierra o masa (son grandes).

Figura N° 30: Esquema de impedancias de la red de tierra. Línea de transmisión Paragsha- Milpo 138kV/ Milpo -SE N°3 50 kV (12 km de distancia).



Fuente: propia

Se cumple la relación:

$$I_C = U_n \cdot 2\pi \cdot C_n \quad (110)$$

Donde:

I_C : Corriente de fuga a tierra a través de la capacitancia potencial – masa o tierra en (A).

U_n : Tensión capacitiva en (V).

C_n : Capacitancia en (μ F). n: 1, 2, 3.....

2.3.5. Parámetros y conceptos básicos para diseñar una malla a tierra según IEEE Std 80-2000.

Antes de describir los parámetros eléctricos del sistema de malla a tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV; debemos señalar que en una subestación pueden

ocurrir diversos eventos de falla a tierra, estas fallas pueden ser línea- línea con tierra, línea-tierra, por ello se debe evaluar el tipo y la localización de la falla a tierra que produzcan la mayor circulación de corriente entre la malla de tierra y la tierra circundante y, por lo tanto, el más alto GPR y la mayor tensión en la superficie. Para determinar el tipo de fallas aplicables se debe dar importancia y consideración a la probabilidad de ocurrencia de la falla. Que puede ser múltiples y simultáneas, aunque puedan resultar en corrientes a tierra mayores, no deben considerarse si la probabilidad de ocurrencia es despreciable (para el caso de la SSEE Milpo 138/50/10kV; es despreciable porque se tiene un solo alimentador en 138kV). Es entonces recomendable, por razones prácticas, que la evaluación se centre en las fallas fase-tierra y fase-fase a tierra.

La corriente de falla más crítica puede ser definida como la resultante en la más alta circulación de corriente de secuencia cero hacia la tierra, es decir ($3I_0$). En un sitio dado, una falla fase-tierra será la de más alto tipo si, $Z_0 \cdot Z_1 > Z_2^2$ si se cumple que $Z_0 > Z_1$, $Z_1 = Z_2$ en el punto de la falla, y una falla fase - fase a tierra será la de más alto tipo si, ($Z_0 \cdot Z_1 < Z_2^2$ si se cumple que $Z_0 < Z_1$, si $Z_1 = Z_2$ (véase ecuaciones (112) y (113), de la página 96 y 97 respectivamente). Para determinar el mayor valor de corriente para una determinada subestación, es necesario estudiar las fallas, tanto en el lado de alta como en el de baja tensión del transformador, así como dentro y fuera de la subestación. Por ejemplo, en una subestación de distribución, una falla en el lado de baja tensión dentro de la

subestación resulta en una corriente de falla despreciable, ya que la corriente retorna al neutro del transformador por los conductores de la malla.

Los siguientes parámetros, que dependen de la zona donde se va a construir la subestación, tienen un sustancial impacto en el diseño del sistema de malla a tierra.

a. Corriente máxima a disipar por la malla (I_G).

El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la subestación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_G = I_f \times D_f \times S_f \times C_p \quad (111)$$

Donde:

$I_f = 3I_0$: Corriente simétrica de falla a tierra en (A).

D_f : Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

S_f : Factor de división de corriente.

C_p : Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de falla, en este caso ($C_p=1$).

b. Corriente simétrica de falla a tierra (I_f).

Según la IEEE Std 80-2000 por razones prácticas, se recomienda hallar los siguientes tipos de falla:

b.1. Falla línea – línea – tierra. Ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_f)_{L-L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3 \cdot E \cdot Z_2}{Z_1(Z_0 + Z_2)Z_2 \cdot Z_0} \quad (112)$$

b.2. Falla línea – tierra. Ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_f)_{L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3 \cdot E}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (113)$$

Donde:

I_0 : Valor (RMS) de secuencia (0) de la corriente simétrica de falla en (A).

E: Tensión fase – neutro (RMS) en (V).

Z_1 : Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla en (Ω).

Z_2 : Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla en (Ω).

Z_0 : Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla en (Ω).

c. Factor de decremento (Df).

En el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-\frac{2 \cdot t_f}{T_a}})} \quad (114)$$

Donde:

t_f : Duración de la falla en (s).

T_a : Constante de tiempo de la componente (DC).

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (115)$$

X, R son las componentes de la impedancia subtransitoria de falla en (Ω); que se utilizan para determinar la relación (X/R).

d. Factor de divisor de corriente (S_f).

El proceso para el cálculo del factor divisor de corriente consiste en derivar una representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. Esto significa, conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros, hacia los contrapesos de las torres que entran y sacan líneas de la subestación; (S_f) depende de:

1. Localización de la falla.
2. Magnitud de la resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación.
3. Cables y tubos enterrados en las vecindades de la subestación o directamente conectados al sistema de puesta a tierra.
4. Cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno por tierra.

5. Líneas de transmisión que entran y alimentadores que salen de la subestación; cantidad, número de cables de guarda y la impedancia de cada uno; cantidad y resistencia de puestas a tierra de pies de torre; longitud de líneas de transmisión y alimentadores; material y calibre de cables de guarda y neutros.

Existe una serie de desarrollos matemáticos, curvas y tablas que permiten encontrar el valor de (S_f) .

A continuación mostramos la definición matemática:

$$(S_f) = \frac{1}{\left[\sum_{k=1}^p \left(\frac{1}{Z_{eq\ total\ k}} \right) \right] \times \left[\sum_{k=1}^p \left(\frac{1}{Z_{eq\ total\ k}} \right) + R_g \right]} \quad (116)$$

Donde:

S_f : Factor de divisor de corriente de la impedancia equivalente.

R_g : Resistencia de la malla a tierra de la subestación en (Ω) .

$Z_{eq\ total}$: Impedancia equivalente total de: Cables de guarda, resistencia de puesta a tierra de torres e impedancia de torres en una línea de transmisión o distribución en (Ω) .

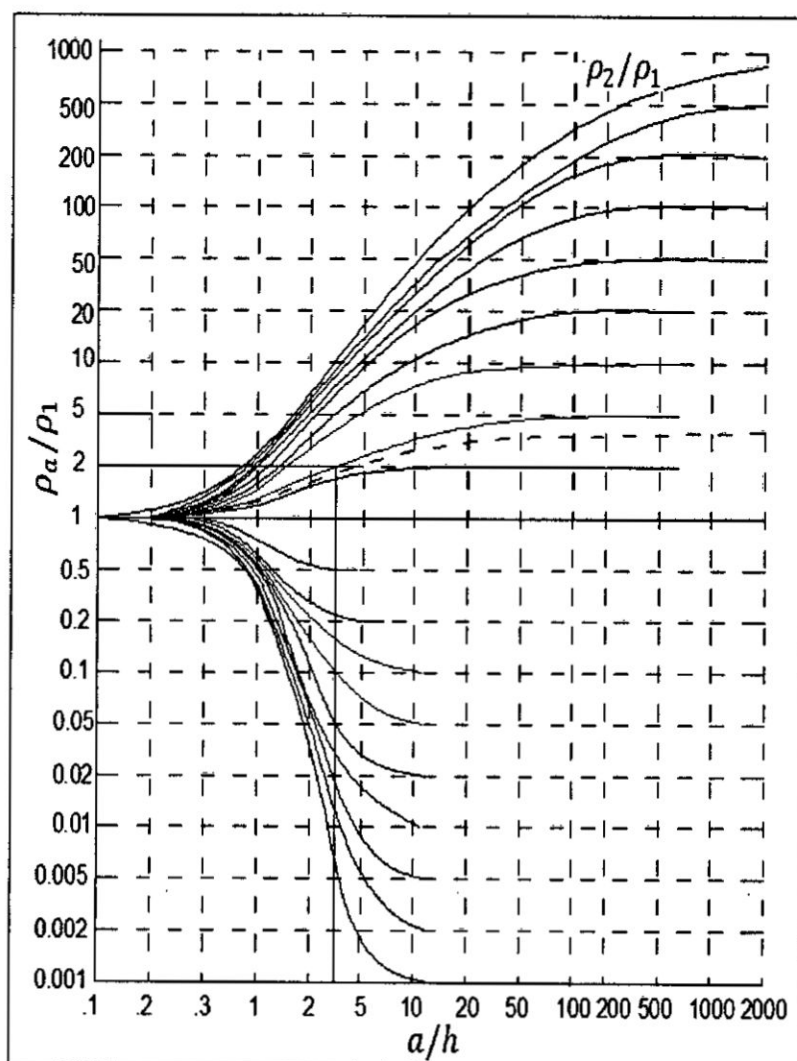
k : Número de líneas que conectan a la subestación, $k= 1, 2, 3, \dots$

e. **Factor de reflexión para un modelo de dos capas.**

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión k , definido como:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (117)$$

Gráfico N° 6: Gráfica de Sunde.



Fuente: propia.

f. Resistividad del terreno (ρ).

La resistencia de la malla y los gradientes de tensión dentro de una subestación están directamente relacionados con la resistividad del terreno, lo cual variará horizontal y verticalmente. Se deben reunir suficientes datos relacionados con el patio de la subestación, en base a mediciones directas de resistividad empleando un telurómetro. La resistividad del terreno es directamente afectada por la humedad, la temperatura ambiente y el contenido de químicos.

g. Resistividad de la capa superficial (ρ_s).

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo. Una capa superficial con un espesor (h_s) entre 0.1m y 0.15m; de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente.

La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla, y del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la vaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad que varía entre: $5000 \Omega\text{-m} > \rho_s > 2000 \Omega\text{-m}$.

Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m, disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de

cortocircuito) a una relación de 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

h. Factor de disminución de la capa superficial (Cs).

Puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de (Cs); sin embargo, también presenta una expresión empírica para su valor. Este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico.

$$Cs = 1 - 0.09 * \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2hs + 0.09} \quad (118)$$

Donde:

Cs: Factor de disminución de la capa superficial.

ρ : Resistividad del terreno en (Ω -m).

ρ_s : Resistividad de la capa superficial en (Ω -m).

hs: Espesor de la capa superficial en (m).

Factor de reflexión (k) entre las resistividades de ambas capas está dado por:

$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (119)$$

i. Medidas de resistividad.

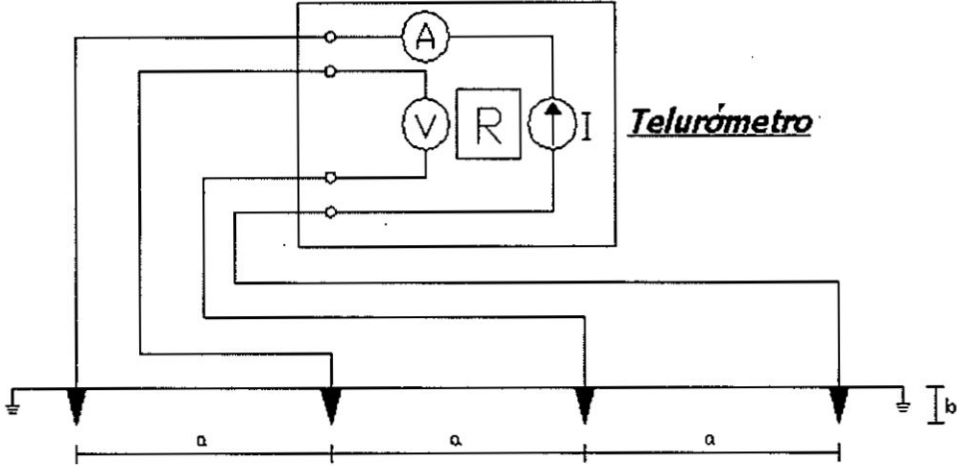
Los valores estimados basados en la clasificación del suelo ofrecen una aproximación de la resistividad; por tanto, las pruebas reales son imperativas.

Éstas deben hacerse en muchos lugares dentro del área de la subestación. Rara vez se encuentran sitios de la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda el área completa y a profundidades considerables. Típicamente existen varias capas y cada una tiene una resistividad diferente. Con frecuencia ocurren cambios laterales, en comparación con los verticales esos cambios son más grandes. Las pruebas de resistividad del suelo deben hacerse para determinar si existen variaciones importantes de la resistividad con la profundidad.

El número de medidas tomadas debe ser más grande donde las variaciones son mayores, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad. Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable usar un rango incrementado de espaciamientos de prueba para obtener un valor estimado de la resistividad de capas más profundas.

El método de Werner o de los 4 electrodos, mostrado en la figura N° 31, es la técnica más utilizada.

Figura N°31: Método de Wenner o de los cuatro electrodos.



Fuente: propia.

Los cuatro electrodos son clavados en la tierra en línea recta a una profundidad (b), separados a una distancia (a). La tensión entre los dos terminales interiores (o de potencial) es luego medido y dividido por la corriente entre los dos terminales exteriores (o de corriente) para dar el valor de la resistencia R, que aparece indicada en el telurómetro. Luego se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (120)$$

Donde:

ρ_a : Resistividad aparente del suelo en (Ω -m).

R: Resistencia medida en (Ω).

a : Distancia entre electrodos adyacentes en (m).

b: Profundidad de los electrodos en (m).

Si (b) es mucho menor que (a), como es el caso más común se cumple:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (121)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden usar para determinar la resistividad aparente (ρ_a) a una profundidad (a).

j. Sección del conductor (AMCM).

La elevación de temperatura de corto tiempo en un conductor de tierra, o el tamaño requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor, se encuentra mediante la ecuación:

$$A_{MCM} = I_f * \frac{197.4}{\sqrt{tc * \alpha_r * \rho_r * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (122)$$

Donde:

I_f : Corriente asimétrica de falla (RMS), se usa la más elevada en (kA).

A_{MCM} : Sección del conductor en (MCM).

T_m : Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión del material en (°C).

T_a : Temperatura ambiente de la subestación en (°C).

T_r : Temperatura de referencia para las constantes del material en (°C).

α_0 : Coeficiente térmico de resistividad del material a 0°C en (1/°C).

α_r : Coeficiente térmico de resistividad del material a la temperatura de referencia "Tr" en (1/°C).

ρ_r : Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia "Tr" en ($\mu\Omega$ -cm).

K_0 : Inversa de "1/ α_0 " en (°C).

tc : Duración de la corriente de falla en (s).

$TCAP$: Capacidad térmica del material por unidad de volumen en (J/(cm³ x °C)).

La Tabla N°3 proporciona los datos para las constantes: α_r , K_0 , T_m , ρ_r y $TCAP$

Tabla N°3: Constante de materiales.

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20 °C (1/°C)	K_o at 0 °C (0 °C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	ρ_r 20 °C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCAP thermal capacity [J/(cm ³ ·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

Fuente: IEEE - Guía para la Seguridad de puesta a tierra en Subestaciones de C.A.

La fórmula simplificada da una aproximación muy buena:

$$AMCM = IF * Kf * \sqrt{tc} \quad (122)$$

Donde:

Kf : Constante para el material dado en la Tabla N°4, utilizando una ($T_a = 40$ °C).

Tabla: N°4: Constante de materiales.

Material	Conductivity (%)	T_m^a (°C)	K_f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Fuente: IEEE - Guía para la Seguridad de puesta a tierra en Subestaciones de C.A.

El tamaño del conductor realmente seleccionado es usualmente más grande que el que se basa en la fusión, debido a factores como:

- a) El conductor debe resistir los esfuerzos mecánicos esperados y la corrosión durante la vida útil de la instalación.
- b) El conductor debe tener alta conductancia para prevenir alta resistencia a la descarga de corrientes de falla peligrosas.
- c) La necesidad de limitar la temperatura del conductor.

- d) Debe aplicarse un factor de seguridad a la instalación de la malla a tierra y a los demás componentes eléctricos.

Se acostumbra a usar como calibre mínimo el cable de 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, con la finalidad de mejorar la rigidez mecánica de la malla y la corrosión.

k. Criterio de tensiones de paso (E_p) y de toque (E_t) tolerables.

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbidas por el cuerpo humano, antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. La IEEE Std 80-2000 nos da el voltaje tolerable por un cuerpo humano de 70 kg de peso corporal, durante un circuito accidental no deben exceder los siguientes límites:

Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de 70 kg de peso corporal:

$$E_s - 70 = \left(1000 + 6C_s \rho_s\right) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (123)$$

Tensión de toque límite tolerable por un cuerpo de 70 kg de peso corporal:

$$E_t - 70 = \left(1000 + 1.5C_s \rho_s\right) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (124)$$

Donde:

R_B : Resistencia promedio del cuerpo humano. ($R_B = 1000 \Omega$).

$R_B = \rho/4b$: Resistencia a tierra de un disco metálico de radio b ($b = 0.08$ m) sobre la superficie de una malla homogénea de resistividad ρ .

$2R_{foot} = 6C_s \rho_s$: Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1m en serie sobre la capa superficial.

$R_{\text{foot}}/2 = 1.5C_s\rho_s$: Resistencia a tierra de los 2 pies juntos en serie sobre la capa superficial.

$\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} = I_B$: Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo en (A).

t_s : Duración del choque en (s).

C_s : Factor de disminución de la capa superficial calculada con la ecuación (118).

ρ_s : Resistividad de la capa de acabado de la superficie de la subestación; por lo general se emplea cascajo; valores típicos se encuentran en el rango entre (2000 $\Omega - m$ y 5 000 $\Omega - m$ (un valor normalmente utilizado es 3 000 $\Omega - m$))

Las tensiones de paso y de toque reales deben ser menores que los respectivos límites máximos permisibles (o tolerables) para obtener seguridad.

2.4. Glosario de términos.

Los términos y definiciones que utilizamos en esta tesis, son palabras cuyo significado están englobados al campo de la electricidad y a su vez se puede encontrar en normas o publicaciones de instituciones internacionales

Aislado eléctricamente: Separado de otras superficies conductoras por un dieléctrico (incluyendo el aire) que ofrece una alta resistencia al paso de la corriente.

Aterrado: Un sistema, circuito, o aparato provisto de una conexión a tierra a los efectos de establecer un circuito de retorno a tierra y para mantener su potencial en aproximadamente el potencial de la tierra.

Barras Principales de Tierra: Un conductor o sistema de conductores previstos para la conexión de todos los componentes metálicos, esto van enlazados con la malla de tierra.

Cable: Un conductor con aislamiento, o un conductor con varios hilos trenzados, con o sin aislamiento y otras cubiertas (cable monopolar o unipolar) o una combinación de conductores aislados entre sí (cable de múltiples conductores o multipolar).

Cable de guarda: Conductor de protección de conductores aéreos contra descargas atmosféricas.

Circuito: Un conductor o sistema de conductores concebido para que a través de los cuales pueda circular una corriente eléctrica.

Circuito de Retorno a Tierra: Un circuito en el que la tierra o un cuerpo conductor equivalente se utiliza para completar el circuito y permite la circulación de corriente desde o hacia su fuente de corriente.

Conductor: Un material, usualmente en forma de alambre, cable o barra capaz de conducir corriente eléctrica.

Conductor de puesta a tierra: Conductor utilizado para conectar el equipo o el sistema de cableado a uno o varios electrodos de puesta a tierra.

Conexión equipotencial: Conexión permanente de baja impedancia, de partes metálicas normalmente no energizadas, para formar una vía eléctricamente conductiva que asegure continuidad eléctrica y la capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente impuesta.

Corrientes Cerradas: Las corrientes que resultan de las tensiones inducidas en la caja metálica por la corriente (s) que fluye en el conductor adjunto (s).

Corriente de Tierra: Una corriente estática o estacionaria que fluye hacia la malla de tierra o su equivalente que actúa como una tierra

Electrodo a Tierra: Un conductor incrustado en la tierra y se usa para recoger la corriente a tierra o de disipación de la corriente de tierra en la tierra.

Malla de Tierra: Sistema de conductores desnudos muy próximos entre sí que están conectados entre uniones con soldaduras y mediante grapas, la malla siempre está bajo la superficie haciendo descarga de todo tipo de corriente, todo accesorio metálico desenergizado está conectado a la malla a tierra a fin de obtener una medida adicional de protección minimizando el peligro de la exposición a altas tensiones de paso o contacto en un área de operación crítica o vías de acceso donde caminan con frecuencia las personas.

Margen de Potencial de Tierra (GPR): El máximo potencial eléctrico que la malla de puesta a tierra de una subestación puede alcanzar en relación a un punto de conexión a tierra lejana que se supone que está al potencial de tierra remota. Esta tensión, GPR, es igual a la corriente máxima de la malla por la resistencia de la malla.

Puesta a tierra: Conectado a tierra o en contacto con ella o conectado a un cuerpo conductivo que actúe como la tierra.

Sistema de Tierra: Comprende todas las instalaciones interconectadas de puesta a tierra en un área específica.

Sistema no puesto a tierra. Sistema de conductores en el que ningún conductor o punto es intencionalmente puesto a tierra, ya sea sólidamente o a través de un dispositivo limitador de corriente sin interrupción.

Subestación: Conjunto de instalaciones, incluyendo las eventuales edificaciones requeridas para albergarlas, destinado a la transformación de la tensión eléctrica y al seccionamiento y protección de circuitos o sólo al seccionamiento y protección de circuitos y está bajo el control de personas calificadas.

Tensión: La diferencia de potencial eficaz entre dos conductores cualquiera o entre un conductor y la tierra. Las tensiones están expresadas en valores nominales a menos que se indique lo contrario. La tensión nominal de un sistema o circuito es el valor asignado al sistema o circuito para una clase dada de tensión con el fin de tener una designación adecuada. La tensión de operación del sistema puede variar por encima o por debajo de este valor.

Tensión a tierra de un circuito no puesto a tierra: La tensión nominal más alta entre cualquiera de dos conductores del circuito comprometido.

Tensión a tierra de un circuito puesto a tierra: La tensión nominal más alta entre cualquier conductor de circuito y el punto o conductor conectado a tierra.

Tensión a tierra de un conductor de un circuito no puesto a tierra: La tensión nominal más alta entre dicho conductor y cualquier otro conductor del circuito comprometido.

Tensión a tierra de un conductor de un circuito puesto a tierra: La tensión nominal entre dicho conductor y el punto o conductor de conexión a tierra.

Tensión de Malla: La máxima tensión de contacto dentro de una malla a tierra.

Tensión de Paso: La diferencia de potencial de superficie que experimenta una persona dando un paso de una distancia de 1 m con los pies sin tocar ningún objeto conectado a tierra.

Tensión de Toque: La diferencia de potencial entre el Margen de potencial a tierra (GPR) y la superficie potencial en el punto donde una persona está de pie y, al mismo tiempo tener una mano en contacto con una estructura con conexión a tierra.

Tensión de un circuito no puesto a tierra de manera efectiva: La tensión nominal más alta entre cualquiera de los conductores del circuito.

Tierra: Conexión conductora, intencional o accidental, por el cual un circuito eléctrico o equipo está conectado a la tierra o a algún cuerpo conductor con extensión relativamente grande que sirve en su lugar de la tierra.

Voltaje de transferencia: Un caso especial de la tensión de contacto en caso de transmisión de voltaje que entra o sale de la subestación a partir de o hacia un punto remoto externo al sitio de la subestación.

Telurómetro: Es un equipo profesional que nos permite realizar la medición de Sistemas de Puesta a Tierra; en parámetros de voltaje y resistencia, para comprobar su correcto funcionamiento siendo así el principal indicador del estado del mismo.

Telurómetro Analógico: La forma y procedimiento para medir la resistencia del SAPT, es la misma la única diferencia es que el valor obtenido lo marcará la aguja y este dependerá de la escala que se esté utilizando.

Telurómetro Digital: Actualmente estos instrumentos son mayormente utilizados debido a su precisión al arrojarlos un único valor de medida.

3.1. Variables de la investigación.

3.1.1. Corriente de diseño de malla a tierra (I_g).

Es la corriente que fluye hacia o fuera de la tierra o su equivalente que actúa como una tierra, su valor depende de la resistencia de malla a tierra y la impedancia del cable de guarda.

3.1.2. Tensión de retícula (E_m):

Es la tensión máxima permisible según IEEE Std 80-2000 que se presenta en la rejilla cuadrangular de la malla ante una descarga eléctrica, su valor depende de la geométrica de la malla, la corriente de diseño y la resistividad de terreno.

3.1.3. Tensión de malla (GPR):

Es la tensión de malla es el margen de potencial de tierra sin tener en consideración la disposición geométrica de la malla a tierra, su valor depende de la resistencia de la malla y la corriente de diseño.

3.1.4. Tensión de paso (Es):

Es la diferencia de potencial de superficie que experimenta una persona dando un paso de una distancia de 1 m con los pies sin tocar ningún objeto conectado a tierra.

3.1.5. Tensión de toque (Et):

Es la diferencia de potencial entre el margen de potencial a tierra y la superficie potencial en el punto donde una persona está de pie y al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura con conexión a tierra.

3.1.6. Impedancia equivalente de los cables de guarda (Zcg):

Es la suma inversa de las impedancias (circuito en paralelo) que componen el sistema de cables de guarda, estas impedancias son: resistencia de puesta a tierra, impedancia de torre (si es que lo hubiera) e impedancia de cable de guarda.

3.2 Operacionalización de las variables.

Tenemos variables que se enlazan hasta llegar al objetivo principal que es encontrar el diseño óptimo de malla a tierra en la SSEE Milpo 138/50/10 kV; las variables se pueden plasmar en un esquema ordenado, como se muestra en la tabla N°5 de la página 116:

Tabla N°5: Variables y objetivos de la investigación.

PROBLEMA GENERAL	PROBLEMA ESPECIFICO	INDICADORES
TENSIONES DE DISEÑO: - TENSION DE RETICULA Em (V) Variable principal (X)	Corriente de diseño (I_g).	Indicadores D_f, C_s y S_f .
	Factor de espaciamiento (K_m).	Indicadores h, D, K_{ii}, K_h, n .
	Resistividad aparente (ρ_a).	n: Número de conductores en paralelo de la malla.
	Factor de corrección (K_i).	
TENSIONES DE DISEÑO: -TENSION DE PASO Es (V). Variable (Y)	Longitud total de mallas y varillas (L_M).	Indicadores $L_C, L_P, L_X, L_Y, L_R, N_r, L_T$.
	Corriente de diseño (I_g).	Indicadores D_f, C_s y S_f .
	Resistividad aparente (ρ_a).	n: Número de conductores en paralelo de la malla.
	Factor de corrección (K_i).	
TENSIONES DE DISEÑO: TENSION DE MALLA GPR $I_g \times R_g$ (V). Variable (Z)	Longitud efectiva enterrada (L_S).	Longitud de conductor de la malla L_C (m). Longitud total de varillas L_R (m).
	Factor de corrección de paso (K_s).	Profundidad: h; N°conductores de malla: n (m) Distancia de una rejilla de la malla D (m)
	Corriente de diseño (I_g).	Indicadores D_f, C_s y S_f
	Resistencia de malla a tierra (R_g).	Resistencias R11, R12 y R22 (Ω)
CORRIENTE DE DISEÑO I_g (A). Variable (W)	Factor de decremento (D_f).	Relación X/R: Componente subtransitoria del sistema. T_a : constante subtransitoria equivalente del sistema t_f : Duración de la falla ; ω : frecuencia angular
	Factor de divisor de corriente (Sf)	Impedancia equivalente del cable de guarda al ocurrir la falla a tierra Z_{cg} .
	Capacidad de proyección (C_s).	Resistencia de la malla a tierra R_g . Factor de crecimiento a futuro de la subestación
IMPEDANCIA EQUIVALENTE DE LOS CABLES DE GUARDA Z_{cg} (Ω) Variable (A)	Impedancia del cable de guarda (Z_{cg}).	Resistencia e inductancia común y mutua por cada vano
	Impedancia de cada estructura de soporte (Z_t)	Impedancia las torres y/o estructura de soporte cuando ocurre una falla a tierra en líneas de transmisión y distribución.
	Resistencia de la puesta a tierra de torres metálicas (R_t)	Resistencia de puesta a tierra en baja frecuencia (60 Hz) al momento de ocurrir la falla a tierra.
RESISTENCIA DE MALLA A TIERRA R_g (Ω) Variable (B)	Resistencia R11(Ω)	Resistividad capa 1 y 2($\Omega - m$) Resistividad equivalente($\Omega - m$) Profundidad de la malla (m) Longitud del conductor de la malla (m) Diámetro del conductor de la malla (m)
	Resistencia R12(Ω)	Resistividad equivalente($\Omega - m$) Longitud promedio de las varillas (m) Longitud del conductor de la malla (m) Área total de la malla (m^2)
	Resistencia R22(Ω)	Diámetro del conductor de varillas (m) Longitud promedio de las varillas(m) Diámetro del conductor de varillas (m) Número de varillas verticales en el área
TENSIÓN MÁXIMA SEGÚN IEEE Std 80/81-2000	Duración de la corriente de falla (t_f)	Tiempo dado por la IEEE Std 80/81-2000 (s)
Tensión de toque (E_{t-70}) a 70 kg Variable (C)	Resistividad de la capa de acabado de la superficie de la subestación (ρ_s) Resistividad del terreno (ρ_a)	Material grava con un diámetro mayor a 1". Modelo de 2 capas por el método de Sunde.
Tensión de paso (E_{s-70}) a 70 kg Variable (D)	Duración de la corriente de falla (t_f) Resistividad de la capa de acabado de la superficie de la subestación (ρ_s) Resistividad del terreno (ρ_a)	Tiempo dado por la IEEE Std 80/81-2000 (s) Material grava con un diámetro mayor a 1". Modelo de 2 capas por el método de Sunde.

Fuente: Propia

La relación de las variables es de la siguiente manera:

La variable principal es: X

La variable X es función de F (W, Z) donde $X < C$.

La variable Y es función de F (W). Donde $Y < D$.

La variable Z función de F (W, B). Además, $Z < C$

La variable W función de F (A).

En conclusión: X es función de F (W, Z, B, A)

3.3. Hipótesis.

3.3.1. Hipótesis general.

Existe una red de secuencia cero que conecta; las mallas a tierra locales y remotas, los cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución, los neutros de los transformadores y las líneas de transmisión; donde las impedancias de los cables de guarda forman un circuito en paralelo con la resistencia de la malla a tierra; deduciéndose así una expresión analítica de la impedancia equivalente de los cables de guarda y la malla a tierra, que permita determinar el factor de divisor de corriente más óptimo para el diseño de la SSEE Milpo 138/50/10kV.

3.3.2. Hipótesis específicas.

a. Para el cálculo del factor de divisor de corriente, evaluando el método de Endrenyi, utilizado en la IEEE Std 80-2000, con la expresión analítica propuesta, se tiene que dicho valor es ligeramente mayor al método de Endrenyi, el cual comparado con otros resultados da con un porcentaje de error mínimo.

b. La optimización de las puestas a tierra de las torres de transmisión y distribución se logra adicionando contrapesos esto logra disminuir el factor divisor de corriente y con ello se disminuye la corriente de diseño de la SSEE Milpo 138/50/10kV.

c. Debido a la gran cantidad de conductores de cobre utilizado, se tiende a tener resistencias menores a lo proyectado incluso menores a 1Ω , por lo que el caso más desfavorable cuando la resistencia sea menor a la impedancia de los cables de guarda.

d. En la SSEE Milpo 138/50/10kV; la máxima corriente de falla se da en el lado de media tensión, debido a la relación de transformación del transformador de potencia. Mediante el software Digsilent "Power Factor System" Version 15.1; se puede determinar el tipo de falla que entrega la corriente máxima de cortocircuito.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA.

4.1. Tipo de investigación.

Será la investigación aplicada, ya que utilizamos los referentes teóricos y metodológicos ya existentes en relación al proyecto, por ende se resolvió el diseño optimizado de la malla a tierra para la SSEE de la Cía. Milpo.

4.2. Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación estuvo centrado en las siguientes etapas:

4.2.1. Toma de datos en campo.

En esta etapa se recolectó los datos de campo en el lugar donde irá la SSEE de la Cía Milpo. Con el telurómetro se midió la resistividad del terreno mediante el "método Wenner" de cuatro puntas; asimismo se realizó calicatas para ver las distintas capas que componen el terreno.

4.2.2. Análisis de datos mediante normas IEEE y software computacionales.

En esta etapa se realizó el diseño de la malla con el procedimiento dado por la IEEE Std-80 2000, entre los parámetros hallados se encuentra la

corriente máxima de cortocircuito, resistencia de malla a tierra, la corriente de diseño, las tensiones de malla, de paso y de toque.

4.2.3. Análisis de las hipótesis.

En esta etapa se evaluó el factor de divisor de corriente con el método de la IEEE Std 80-2000 y el método propuesto en este informe, y se optimizó el diseño con la reducción de las puestas a tierra de las torres y la instalación de cables cooperwell para anular impedancias de las torres. Todo ello implicó la resolución de cada hipótesis específica.

4.2.4. Análisis de los resultados.

En esta etapa se describen los resultados del tema a investigar se resolvió la hipótesis, Se analizará el costo por la construcción del proyecto en diferentes etapas: costo de la malla con diseño tradicional y el costo con el diseño optimizado (mejoramiento de las resistencias equivalentes de los cables de guarda). Ver anexo, sección presupuesto.

4.3. Población y muestra.

4.3.1. Población.

Son los valores de resistividades del terreno que se midieron en campo, 40 valores numéricos en total y será la base para el diseño de la malla a tierra según la IEEE 80-2000. (Ver tablas del 6 al 15, de la página 124 a la 125)

El área donde se realizó la toma de datos fue en la superficie donde se construyó la SSEE de la Cía. Milpo. El tipo de terreno es pedregoso húmedo y a 4 metros de profundidad se tiene filtración de agua.

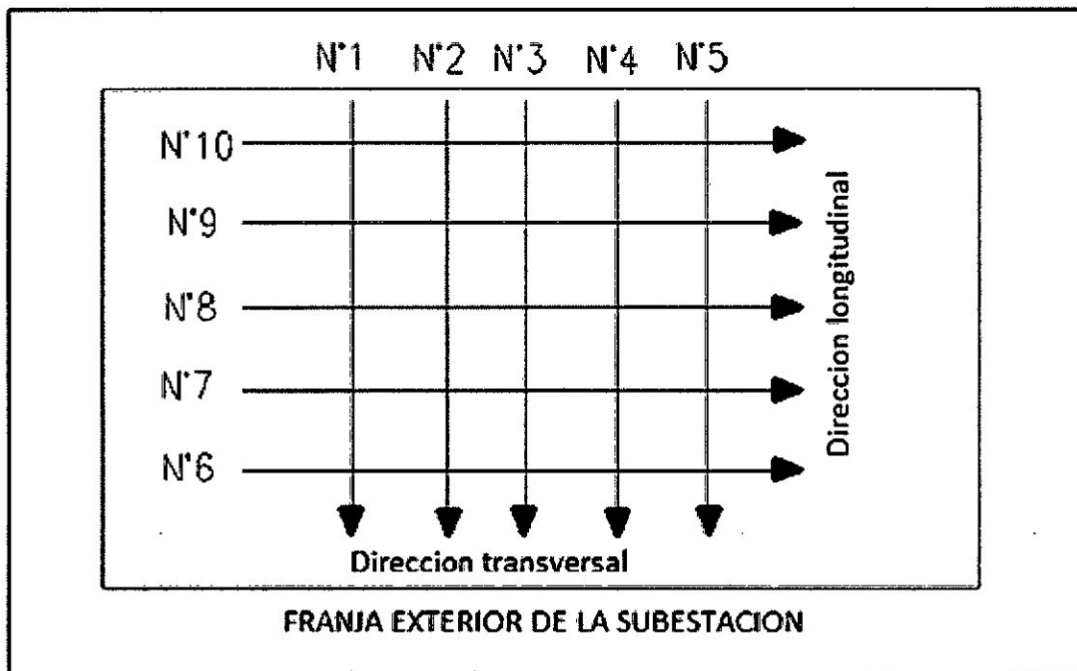
4.3.2. Muestra.

Serán los valores calculados mediante la operación estadística de los datos de campo para el diseño de la malla, estos son las resistividades, y se medirán según la tabla N°18 (Ver página 128).

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El criterio para realizar las mediciones es considerar el área de la subestación como un rectángulo y realizar divisiones utilizando líneas imaginarias en dirección transversal y ortogonal.

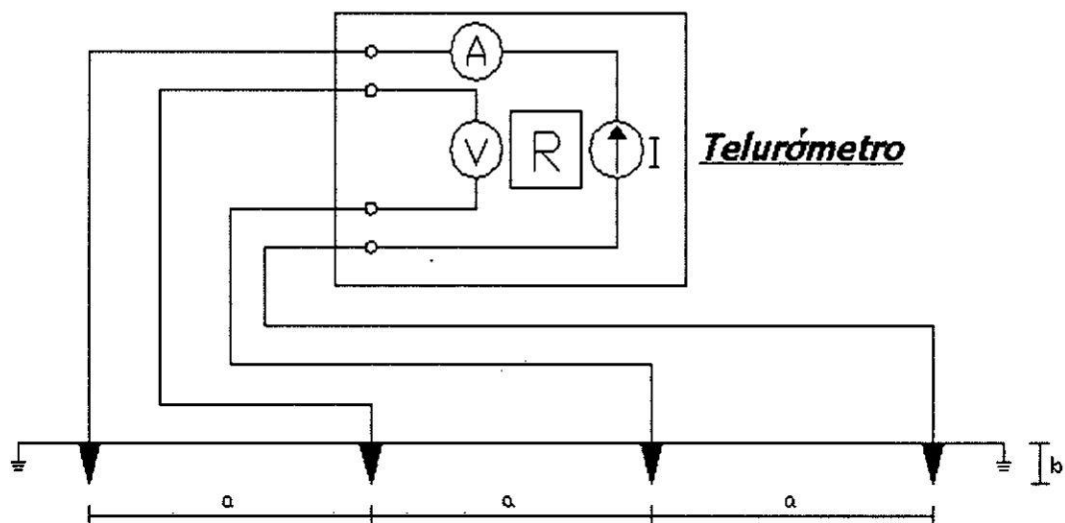
Figura N°32: Líneas de medición transversal y ortogonal de la SSEE Milpo.



Fuente: Propia

En la figura N°32 se muestra un total de diez rectas y en cada recta se realizó 5 mediciones por método Werner de la siguiente manera:

Figura N°33: Electrodo del telurómetro distribuido en 4 puntos equidistantes.



Fuente: Propia.

El esquema señalado en la figura N°33 muestra el modelo de medición de la resistividad del terreno, para esta tesis el equipo utilizado en campo fue el telurómetro digital con las siguientes características:

Marca: Megabras

Serie: 110917

Modelo: MTD20kWe

Fecha de calibración: 26/01/2017

El equipo cuenta con 4 electrodos de material cobre recocido, las distancias de separación (a) de electrodos varia de la siguiente forma:

a : 0.5, 1, 2, 4 y 8 m.

La profundidad de enterramiento de los electrodos (b) debe ser según lo recomendado:

b: 0.3 m

Antes de realizar la medición se recomienda verificar con el telurómetro si en el terreno se tiene tensiones remanentes o flotantes, si lo hubiese se recomienda eliminar dicha tensión, ya que, darían valores erróneos de resistencia. Luego de medir las resistencias según la figura N°32, para cada valor de (a) nos arrojó un valor de resistencia (R) mediante la siguiente ecuación hallamos la resistividad (ρ):

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (125)$$

4.5 Procedimientos de recolección de datos.

El terreno al ser pedregoso arrojó valores tan distantes como cercanos debido a ello se dice que es un suelo heterogéneo, las rocas, la geomorfología y los sucesos naturales hacen que el suelo no sea una capa con una densidad de material constante; por ello al recolectar todas las mediciones del terreno en gabinete se usó métodos probabilísticos que relaciona la función de distribución normal de una muestra con el logaritmo natural de la resistividad del terreno.

Por cada recta tendremos 5 valores de resistividad:

Para la recta N°1

Tabla N° 6: Muestra de resistividades N°1.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	20.5	7.2	9	2.1	13
ρ ($\Omega - m$)	90.50	51.49	117.39	53.29	404.69

Para la recta N°2

Tabla N° 7: Muestra de resistividades N°2.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	20	6	5.5	11	12
ρ ($\Omega - m$)	88.31	42.90	71.74	279.15	455.05

Para la recta N°3

Tabla N° 8: Muestra de resistividades N°3.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	20	10.74	5.96	3.88	2.4
ρ ($\Omega - m$)	88.31	76.80	77.74	98.46	120.93

Para la recta N°4

Tabla N° 9: Muestra de resistividades N°4.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	47.2	23	10.9	4.9	2.44
ρ ($\Omega - m$)	208.42	164.48	142.18	124.35	122.94

Para la recta N°5

Tabla N° 10: Muestra de resistividades N°5.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	39.6	22.5	11.3	4.42	2.9
ρ ($\Omega - m$)	174.86	160.90	147.40	112.17	146.12

Para la recta N°6

Tabla N° 11: Muestra de resistividades N°6.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	30.8	27	11.5	6.16	2.2
ρ ($\Omega - m$)	136.0	160.40	150.0	156.32	110.85

Para la recta N°7

Tabla N° 12: Muestra de resistividades N°7.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	35	22	10.2	5.39	2.17
ρ ($\Omega - m$)	154.55	157.33	133.05	136.78	109.34

Para la recta N°8

Tabla N° 13: Muestra de resistividades N°8.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	22.5	10	6.5	3.1	1.72
ρ ($\Omega - m$)	99.35	71.51	84.78	78.671	86.66

Para la recta N°9

Tabla N° 14: Muestra de resistividades N°9.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	25.6	12.6	5.4	2.6	1.3
ρ ($\Omega - m$)	113.04	90.109	70.439	65.982	65.50

Hasta llegar a la recta N°10

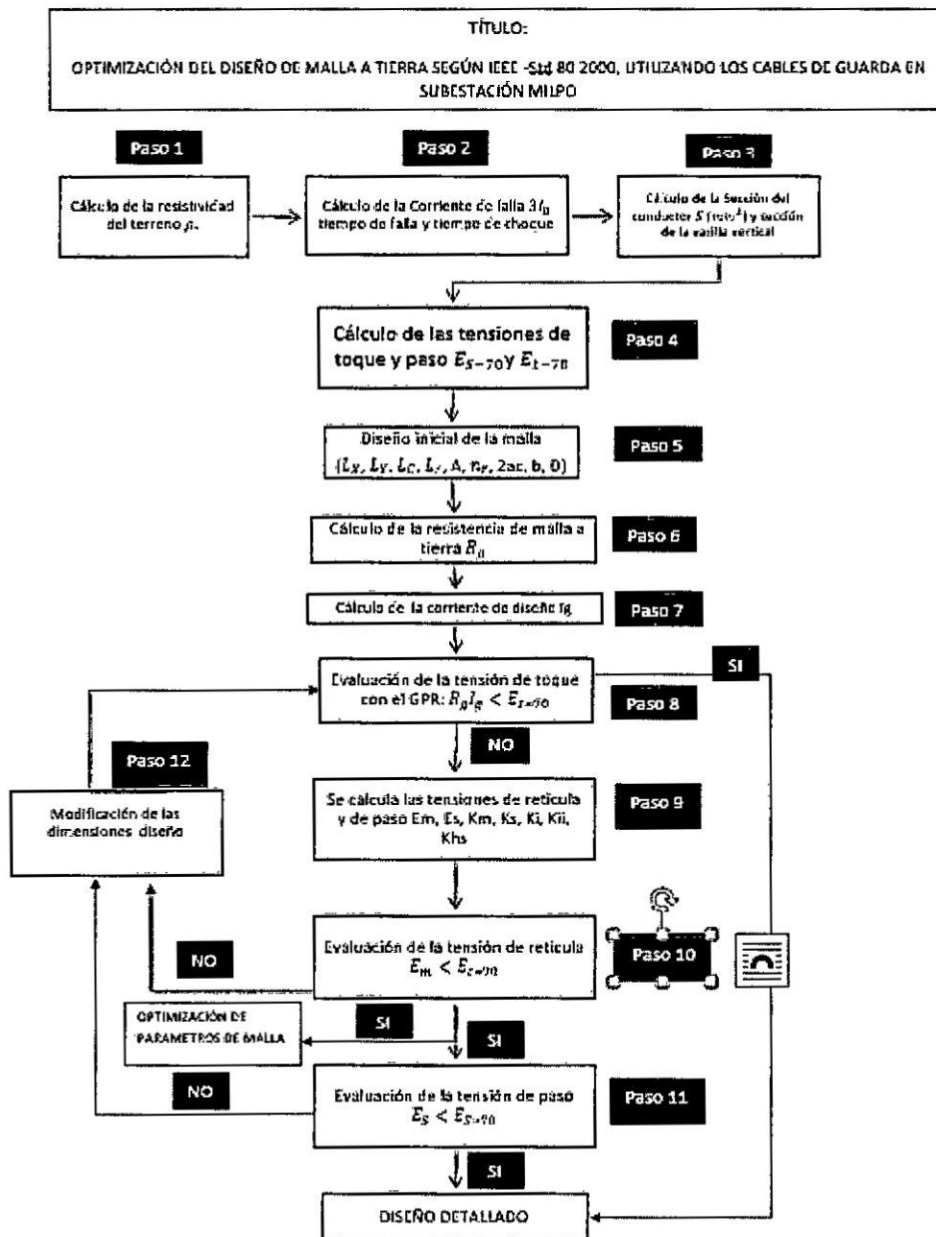
Tabla N° 15: Muestra de resistividades N°10.

a (m)	0.5	1	2	4	8
R (Ω)	28.6	14.3	7.1	4.1	1.8
ρ ($\Omega - m$)	126.29	102.26	92.61	104.04	90.7

4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.

El análisis de datos se representa mediante el diagrama de bloques elaborado por la IEEE Std 80-2000 el cual nos brinda la secuencia de pasos necesarios para diseñar una malla a tierra. En el paso N°8 se realizó una modificación con respecto al cálculo del factor de divisor de corriente.

Figura N°34: Diagrama de bloques para el cálculo de la malla a tierra.



Fuente: IEEE Std 80 - 2000.

PASO 1: Cálculo de la resistividad del terreno.

Como se explicó anteriormente los logaritmos naturales de la resistividad siguen una función de distribución normal independiente de algunos valores que están lejanos a esa función logarítmica.

Ordenando en forma ascendente los valores de resistividad y hallando los logaritmos naturales

$$X = \ln(\rho) \tag{126}$$

Tabla N°16: Datos de campo procesados para distancias de 1 y 2 m.

n	$\rho(\Omega - m)$	a (m)	$X = \ln(\rho)$	n	$\rho(\Omega - m)$	a (m)	$X = \ln(\rho)$
1	42.9091502	1	3.75908509	1	70.4394354	2	4.25475327
2	51.4909802	1	3.94140665	2	71.7438694	2	4.27310241
3	71.5152503	1	4.26991072	3	77.7442658	2	4.3534248
4	76.8073788	1	4.34130071	4	84.7882093	2	4.44015649
5	90.1092153	1	4.50102244	5	92.6148133	2	4.5284491
6	102.266808	1	4.62758516	6	117.399059	2	4.76557889
7	157.333551	1	5.05836808	7	133.052267	2	4.89074204
8	160.4343	1	5.0778845	8	142.183305	2	4.9571171
9	160.909313	1	5.08084093	9	147.401041	2	4.99315704
10	164.4850	1	5.102819845	10	150.009909	2	5.01070135

Fuente: Propia.

Tabla N°17: Datos de campo procesados para distancias de 4 y 8 m.

n	$\rho(\Omega - m)$	a (m)	$X = \ln(\rho)$	n	$\rho(\Omega - m)$	a (m)	$X = \ln(\rho)$
1	53.2937502	4	3.97581907	1	65.505583	8	4.18213538
2	65.9827383	4	4.18939317	2	86.6689252	8	4.4620954
3	78.6717265	4	4.36528383	3	90.700038	8	4.50755778
4	98.466548	4	4.58971688	4	109.343935	8	4.69449828
5	104.049703	4	4.6448687	5	110.855602	8	4.70822847
6	112.170655	4	4.72002142	6	120.933384	8	4.79523985
7	124.352084	4	4.82311693	7	122.94894	8	4.81176915
8	136.787292	4	4.91842711	8	146.127839	8	4.98448185
9	156.328334	4	5.0519585	9	404.66692	8	6.00306431
10	279.157739	4	5.631777	10	455.05583	8	6.12042011

Fuente: Propia.

Para hallar los valores representativos de resistividad para cada distancia utilizamos el método estadístico, ya que, nos brinda una buena aproximación. Por cuestiones de simplificación usaremos como ejemplo los valores que se obtuvieron para una separación de electrodos de "a=8m" y para distancias de a= 1; 2; 4 será el mismo cálculo.

Definiremos al valor promedio de "X" como " \bar{X} " y a la desviación estándar como "S". Luego hallaremos dichos valores con los datos de la tabla N° 18.

Tabla N°18: – Datos de campo procesados.

n	$\rho(\Omega - m)$	a (m)	$X=\ln(\rho)$
1	65.505583	8	4.18213538
2	86.6689252	8	4.4620954
3	90.700038	8	4.50755778
4	109.343935	8	4.69449828
5	110.855602	8	4.70822847
6	120.933384	8	4.79523985
7	122.94894	8	4.81176915
8	146.127839	8	4.98448185
9	404.66692	8	6.00306431
10	455.05583	8	6.12042011

Fuente: Propia.

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_{10}}{10} = \frac{49.26949}{10} = 4.92694 \quad (127)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}}{n-1}} = \sqrt{\frac{(x_1^2+x_2^2+x_3^2+\dots+x_{10}^2) - \frac{(x_1+x_2+x_3+\dots+x_{10})^2}{10}}{10-1}} \quad (128)$$

$$S = \sqrt{\frac{246.413 - \frac{2427.48270}{10}}{10-1}} \quad (129)$$

$$S = 0.63813 \quad (130)$$

Entonces decimos que al realizar la medición de la resistividad en el terreno, la probabilidad de encontrar un valor confiable está relacionada a la variable "z" de la siguiente manera:

$$\rho = F(z) \text{ ó de la misma forma } \rho = F\left[\frac{\ln(\rho) - \bar{X}}{S}\right] \quad (131)$$

Donde:

$$z = \frac{x - \bar{X}}{S} \quad (132)$$

z: Valor perteneciente a la tabla de distribución normal

La probabilidad de encontrar un valor confiable es: $P = F(z) \times 100\%$ en consecuencia $F(z)$ es una distribución normal acumulada de la función:

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \right) dz \quad (133)$$

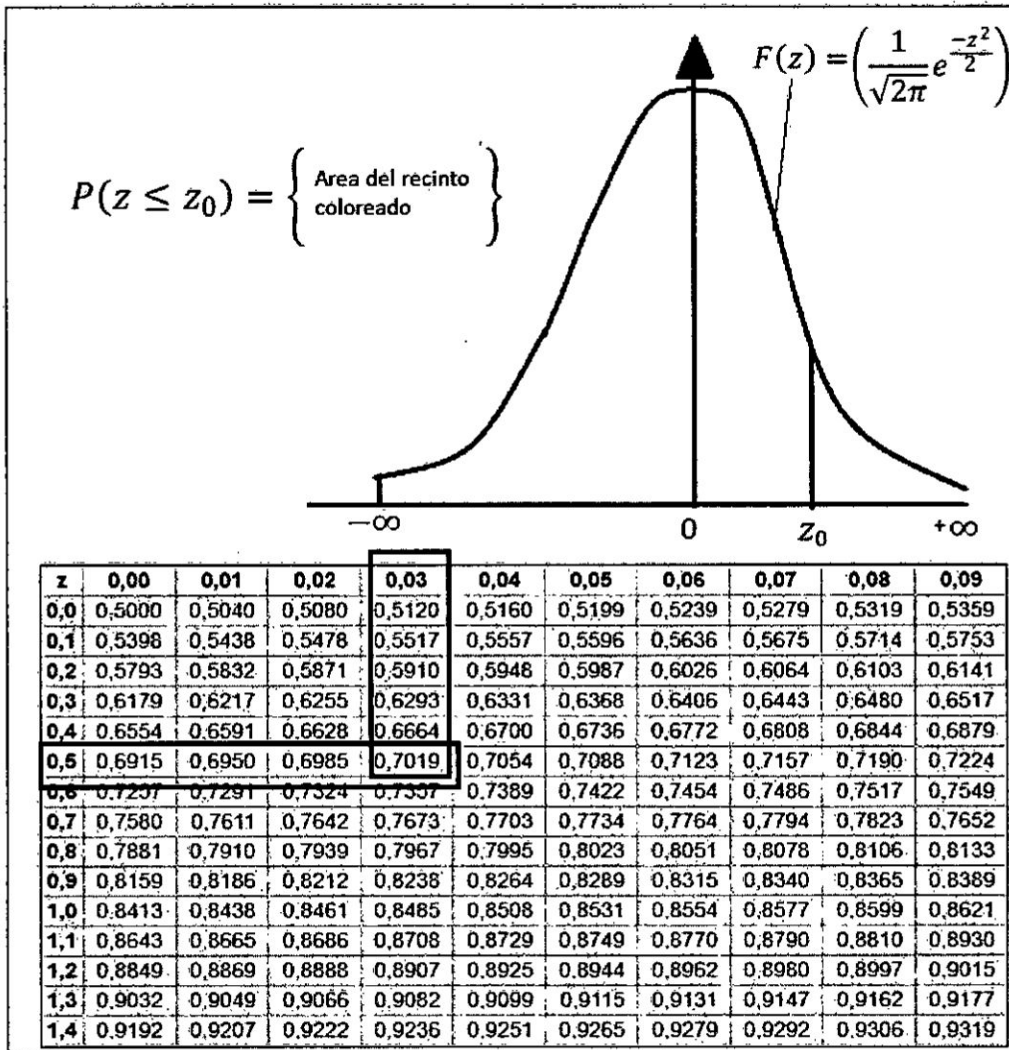
Entonces se dice que para cada valor de resistividad (ρ) existe una probabilidad (P) de encontrar un valor confiable de resistividad. Entonces utilizamos la probabilidad de por lo menos 70 %, con este valor podemos encontrar un valor representativo de la resistividad del terreno:

70% = $F(z) \times 100\%$ despejando obtenemos:

$$F(z) = 0.7 \quad (134)$$

En la tabla de distribución normal (véase tabla N°19) podemos encontrar el valor aproximado de "z".

Tabla N°19: Tabla de distribución normal.



Fuente: Propia

Según la tabla N°19 el valor más aproximado para "z" es 0.53 de aquí podemos encontrar el valor representativo de la resistividad "ρ" al reemplazarlo en la ecuación (132):

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad \rightarrow \quad z = \frac{\ln(\rho) - \bar{x}}{s} \quad \rightarrow \quad \ln(\rho) = Z(S) + \bar{X} \quad (134.1)$$

$$\ln(\rho) = 0.53(0.638132) + 4.926949 = 5.265 \quad (135)$$

Finalmente extraemos el logaritmo natural para encontrar la resistividad representativa

$$\rho = 192.799267 \, \Omega - m \quad (136)$$

El mismo calculo hacemos para los demás valores de la tabla N° 16, 17 y 18 con ello obtenemos los valores representativos para cada distancia de a= 1; 2; 4; 8 (m)

Tabla N°20: Tabla de distribución normal.

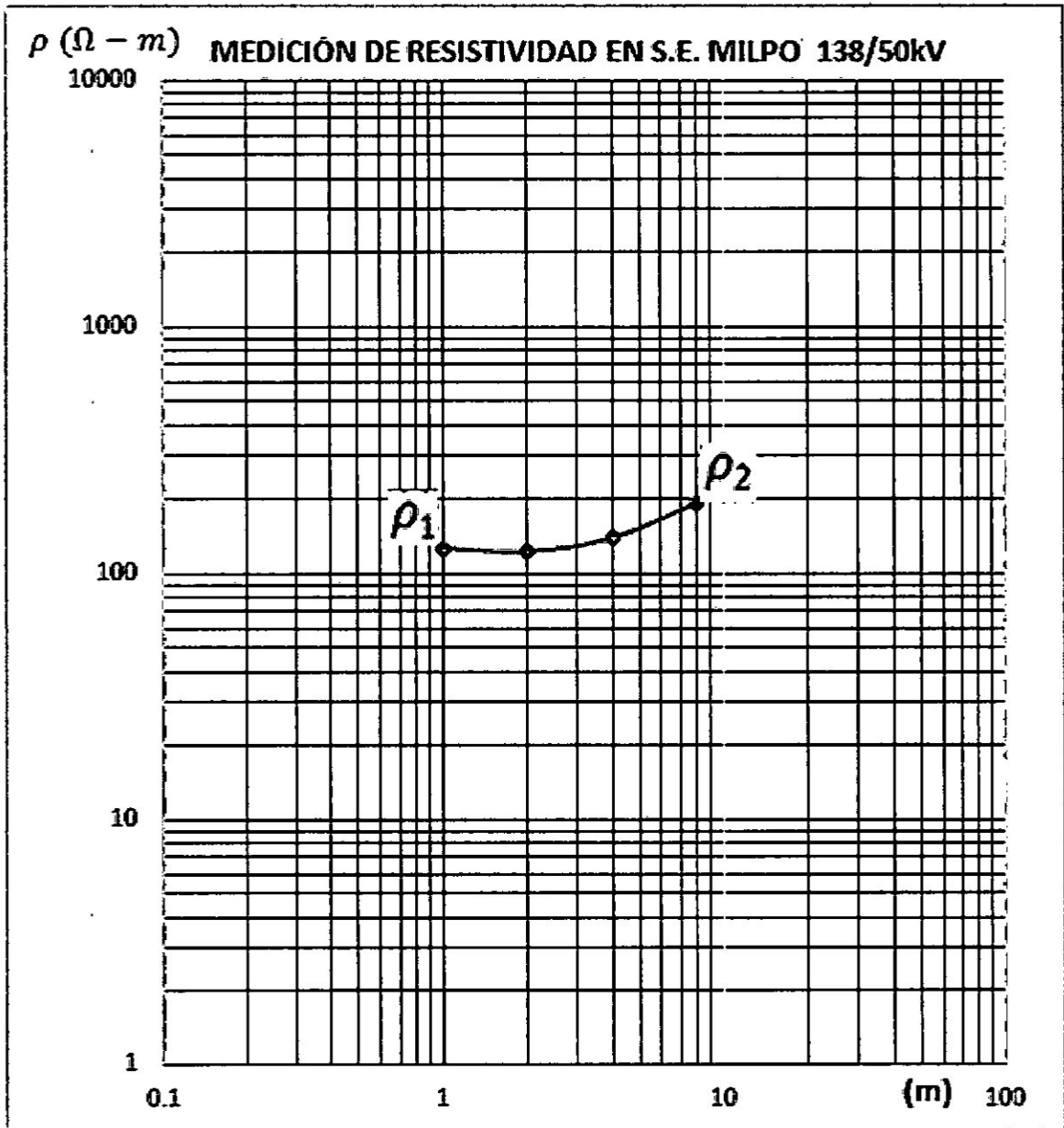
a (m)	1	2	4	8
$\rho (\Omega - m)$	126.207522	122.572633	139.245432	192.799267

Fuente: Propia.

La norma IEEE Std 80-2000 nos da varias alternativas para determinar la resistividad equivalente del terreno, a partir de este valor podremos diseñar la malla a tierra de la SSEE Milpo y hallar su resistencia. Para nuestro análisis usamos el método de 2 capas, con este método usamos la gráfica de Sunde y seguimos el procedimiento de cálculo para determinar la resistividad equivalente.

El primer paso es colocar en plano cartesiano a escala logarítmica las resistividades representativas de la medición en campo y luego denominar ρ_1 y ρ_2 al valor mínimo y máximo de resistividades

Gráfico N°7: Valores de resistividades según la distancia.



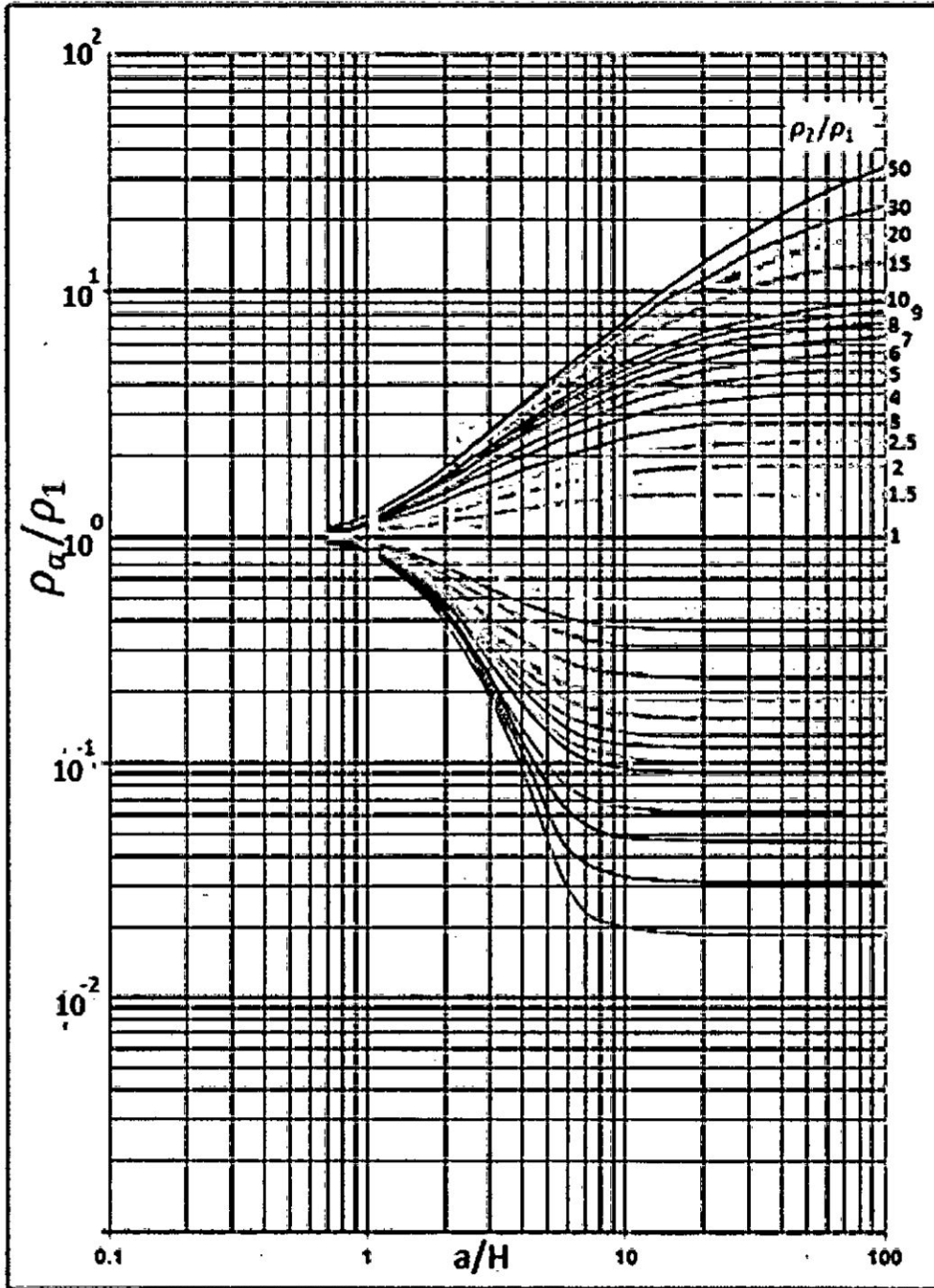
Fuente: Propia.

En la gráfica N°7, al dividir ρ_1 y ρ_2 determinamos a que familia de curva pertenece en la gráfica de sunde:

$$k = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{192.799267}{126.207522} = 1.52763690 \quad (137)$$

En el siguiente paso, elegimos a la curva 1.5 del gráfico de Sunde:

Gráfico N°8: Gráfico aplicado de Sunde.



Fuente: Propia.

Para hallar la resistividad aparente " ρ_a " y la profundidad "h" se superponen las gráficas N°7 y N°8 ambos planos deben estar a las mismas escalas logarítmicas,

se ubica la gráfica N° 8 en la curva $\rho_2/\rho_1 = 1.5$ usando el procedimiento dado por la norma IEEE Std-80 2000 se obtienen los siguientes valores:

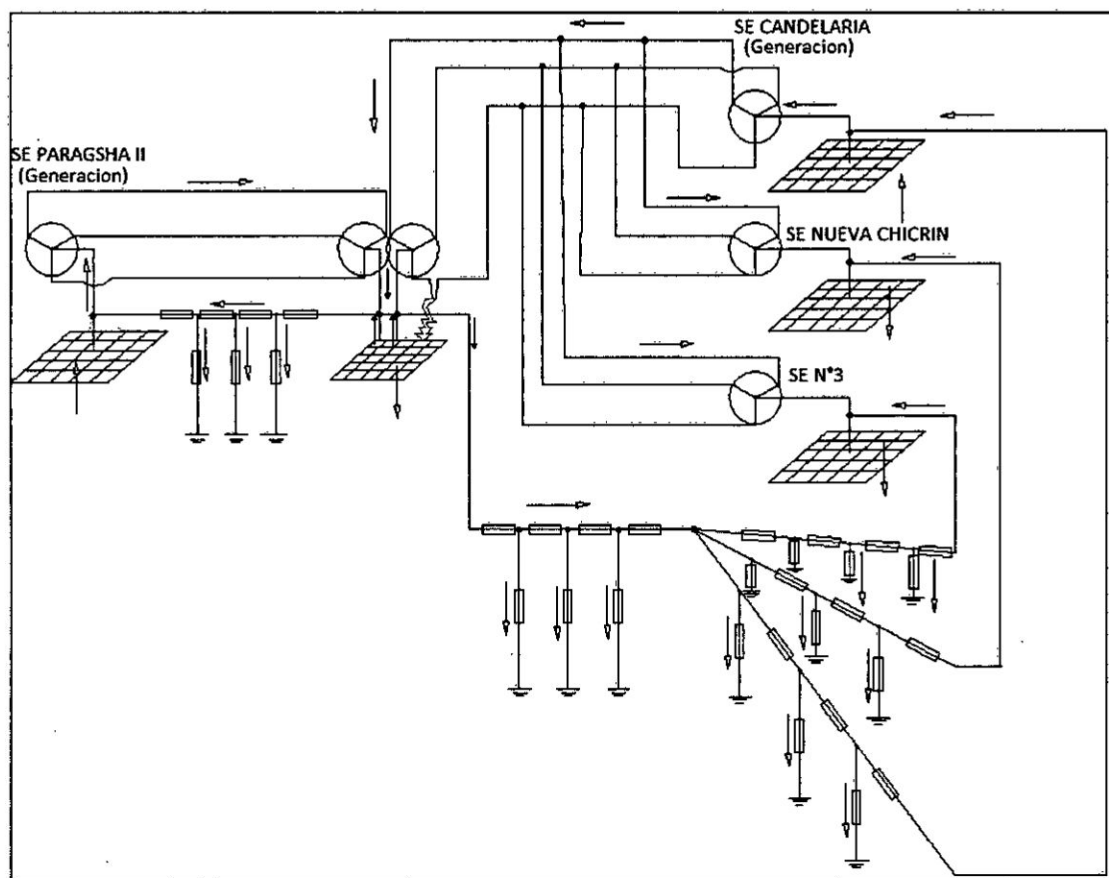
Resistividad aparente $\rho_a = 176.690530 \Omega - m$

Profundidad de la segunda capa $H = 1.1 m$

PASO 2: Cálculo de la corriente de falla 3lo.

La subestación Milpo 138/50/10kV y el sistema interconectado forman una red eléctrica de secuencia cero donde la corriente de secuencia cero se distribuye por todo el sistema, para nuestro caso se tiene un esquema general de red y una red equivalente. En la figura N° 35 se detalla los circuitos y el sentido de la corriente en un instante.

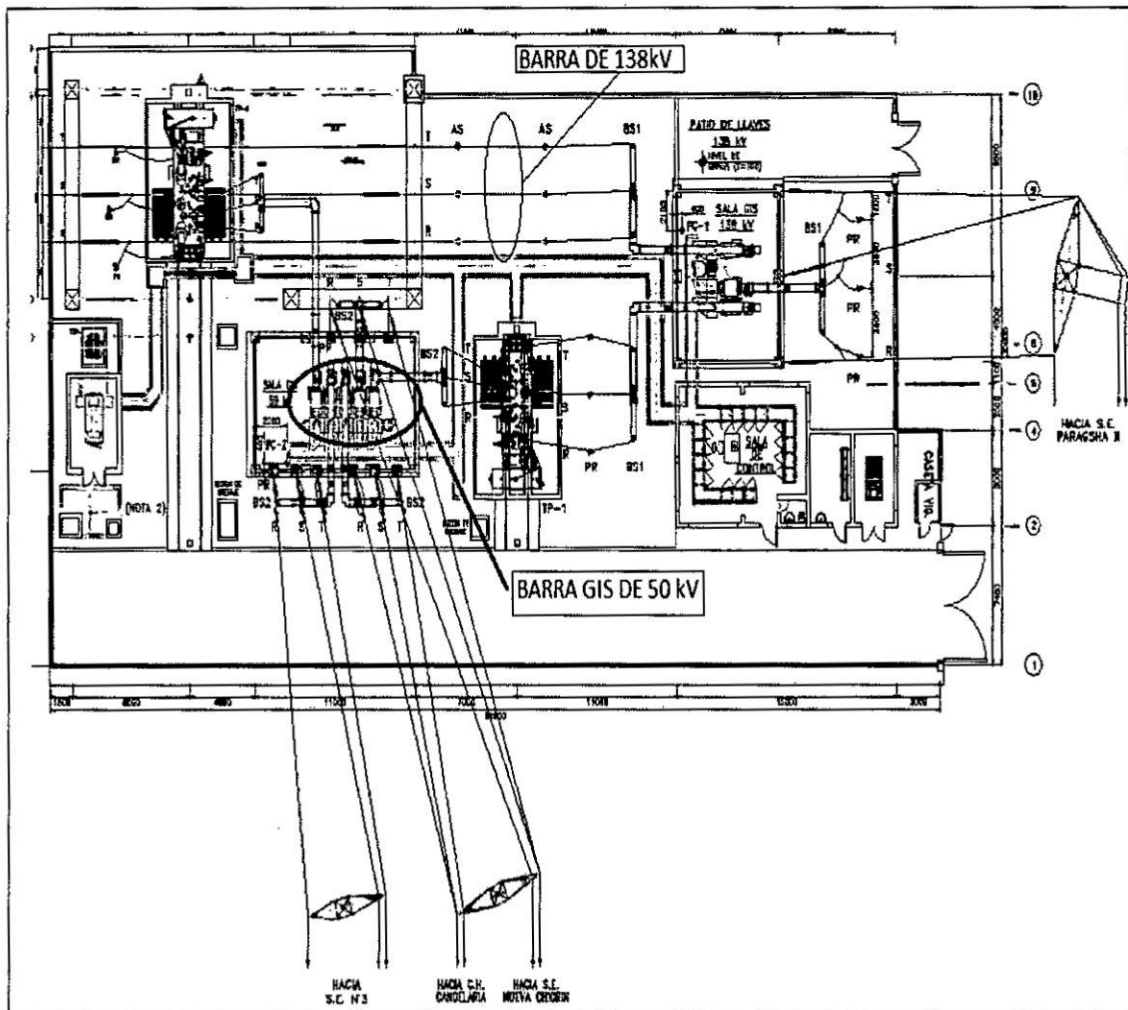
Figura N°35: Esquema del sistema de secuencia cero de la subestación Milpo.



Fuente: Propia.

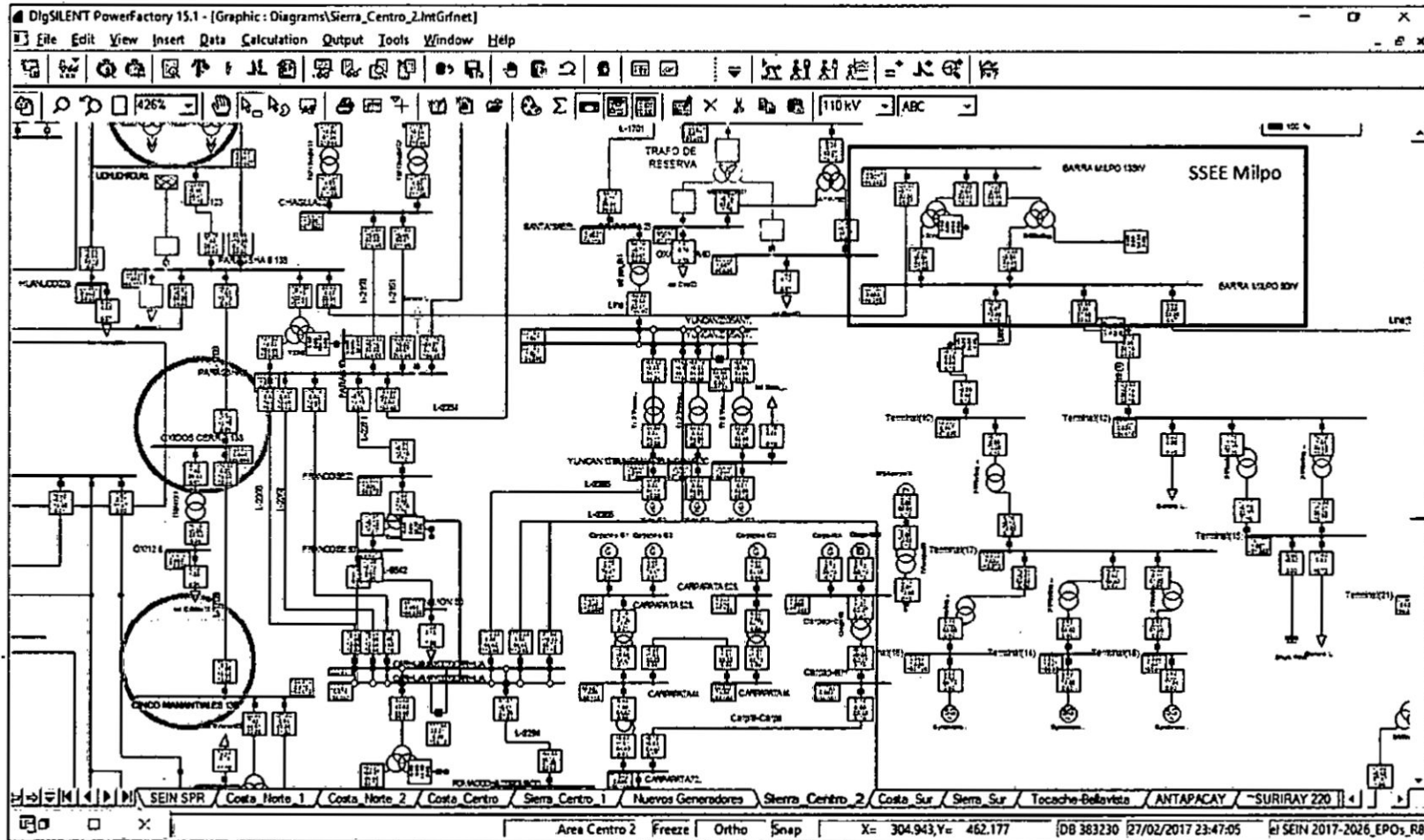
Según la IEEE Std 80-2000 la sección del conductor depende de la mayor corriente de cortocircuito en barra para una falla a tierra, dicha corriente RMS es $3I_0$. En la SSEE Milpo 138/50/10kV se tiene 2 niveles de tensión en barras 138 y 50 kV. En ambas barras se tiene aporte de potencia de cortocircuito debido a que tanto en el lado de alta como en el lado media tensión se tiene fuentes de generación de energía, estas líneas alimentadoras son: En la barra de 138kV se tiene a la línea de transmisión Paragsha II - Milpo y en la barra de 50 kV se tiene a la línea de distribución Candelaria – Milpo.

Figura N°36: Vista de planta de la SSEE Milpo 138/50/10kV.



Fuente propia

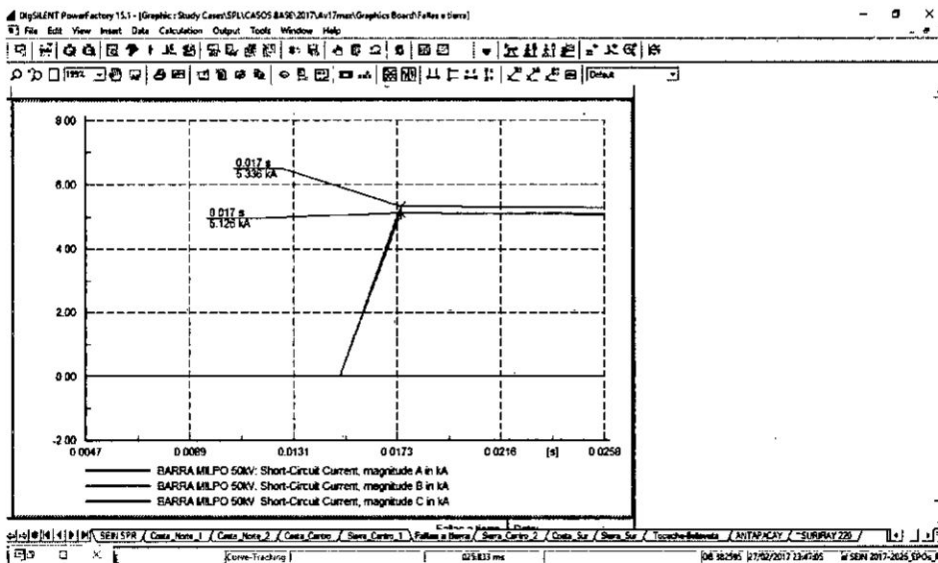
Figura N°37: Diagrama unifilar de la SSEE Milpo 138/50/10kV configurado en el Digsilent.



Fuente: Propia

Por medio del programa Digsilent Power versión 15.1 Factory se simuló un cortocircuito a tierra monofásica y bifásica tanto en la barra de 138 kV como en la barra de 50 kV y determinamos así la corriente eficaz máxima de cortocircuito. Para realizar la simulación se extrajo de la base de datos del SEIN la cual se encuentra en la página del COES cuyo nombre del archivo es "Base Datos del SEIN DigSILENT 2017-2026.pfd", con este archivo se empezó a crear la subestación Milpo 138/50/10kV y sus conexiones con el sistema interconectado. Con la subestación Milpo ya creada en el programa, simulamos una falla bifásica a tierra en las fases A y B en la barra de 50 kV en el instante de tiempo $t=15$ ms, los resultados que se obtiene son las corrientes de cortocircuito RMS en la fase A y B.

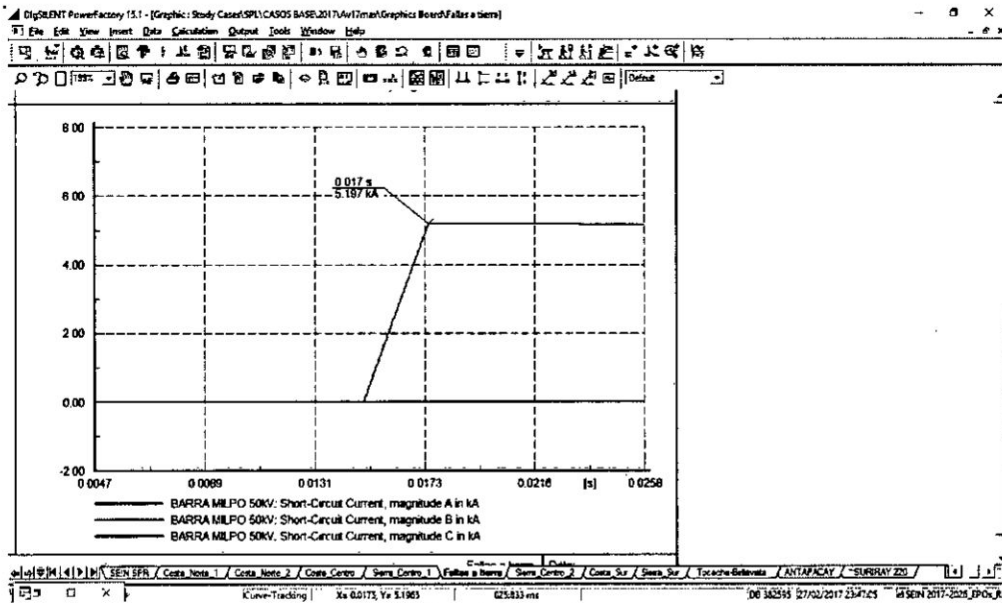
Gráfico N°9: Falla bifásica I_{RMS} fase A; I_{RMS} fase B Vs. Tiempo de falla.



Fuente: Propia.

Ahora el otro caso es la simulación de una falla monofásica a tierra en la fase A en la barra de 50 kV en el instante de tiempo $t=15$ ms, el resultado que se obtiene es una corriente de cortocircuito RMS en la fase A.

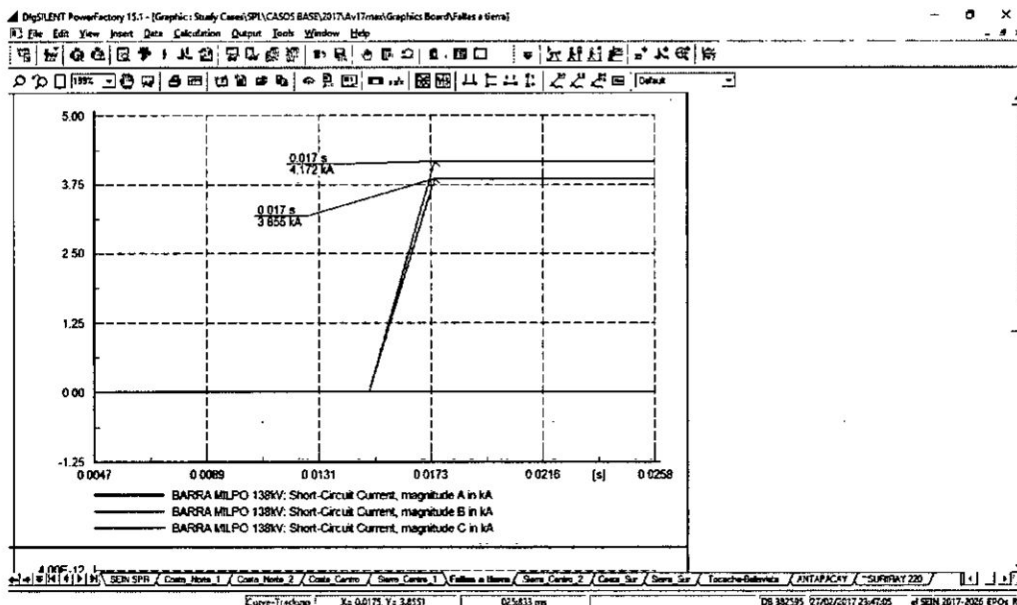
Gráfico N° 10: Falla monofásica I_{RMS} en fase A Vs. Tiempo de falla.



Fuente: Propia.

Ahora para el siguiente caso simulamos un cortocircuito bifásico a tierra en la fase A y B localizado en la barra 138kV en el instante de tiempo $t=15$ ms, los resultados que se obtiene son las corrientes de cortocircuito RMS en la fase A y en la fase B.

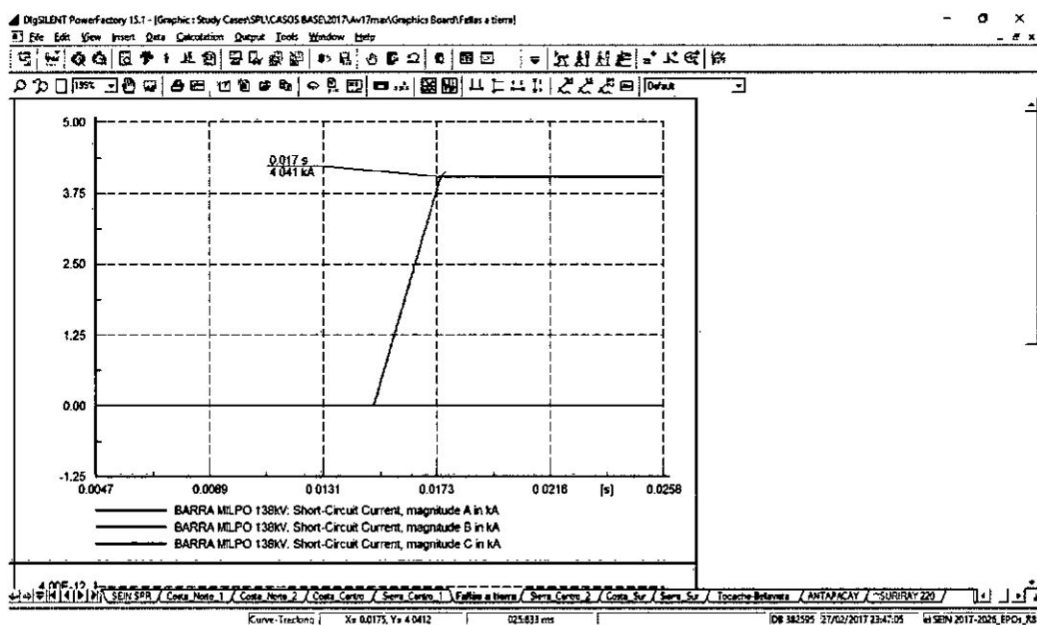
Gráfico N° 11: Falla bifásica I_{RMS} fase A; I_{RMS} fase B Vs. Tiempo de falla.



Fuente: Propia.

Ahora simulamos una falla monofásica a tierra en la fase A en la barra de 138 kV en el instante de tiempo $t=15$ ms, el resultado que se obtiene es una corriente de cortocircuito RMS en la fase A.

Gráfico N° 12: Falla monofásica I_{RMS} en fase A Vs. Tiempo de falla.



Fuente: Propia.

Luego de estas simulaciones concluimos que la mayor corriente de falla a tierra está en la barra de 50 kV para el caso de una falla bifásica en barra con un escenario de cargas balanceadas.

En consecuencia la corriente de cortocircuito que desciende por la estructura metálica y se distribuye por el sistema de secuencia cero del sistema interconectado es:

$$I_{2\phi \text{ en barra } 50kV} = I_{A \ 2\phi} + I_{B \ 2\phi} \quad (138)$$

El Digilent proporciona valores en p.u. de las corrientes de fase, el cual resolviendo y pasando a valores reales obtenemos lo siguiente:

$$I_{A2\phi} = -4378.3 - j 2576.1 \text{ Amp} \quad (139)$$

$$I_{B2\phi} = 3882.2 - j 3584.3 \text{ Amp} \quad (140)$$

Resolviendo obtenemos la corriente de falla que se distribuye por el sistema de secuencia cero (cables de guarda, mallas a tierra, torres de transmisión con puestas a tierra y neutros de transformador).

$$I_{2\phi \text{ en barra } 50kV} = -4378.3 - j 2576.1 + 3882.2 - j 3584.3 \quad (141)$$

$$I_{2\phi \text{ en barra } 50kV} = -496.11 - j 6160.4 \text{ Amp} \quad (142)$$

En modulo tenemos:

$$I_{2\phi \text{ en barra } 50kV} = 6.1803 \text{ kA} \quad (143)$$

PASO 3: Cálculo de la sección del conductor de la malla.

En la norma IEEE Std 80-2000 nos muestra un análisis detallado para calcular la sección de la malla mediante la siguiente ecuación:

$$A_{mm^2} = \frac{I_F}{\sqrt{\frac{TCAP}{tc \cdot \alpha r \cdot \rho r} \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (144)$$

Las variables descritas en la ecuación (144) se obtienen de la tabla N°3 (ver página 105) para ello el tipo de material elegido es Copper, comercial hard-drawn con una conductividad de 97%.

Según la tabla mencionada los valores son los siguientes:

$$T_m = 1084^\circ\text{C}$$

$$K_0 = 242^\circ\text{C}$$

$T_a = 15^\circ\text{C}$ (Temperatura ambiente)

$T_c = 15 \text{ ms}$ (Duración de la corriente)

$TCAP = 3.42 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

$\alpha_r = 0.00381 \text{ (1}/^\circ\text{C})$

$I_F = I_{2\phi \text{ en barra}} = 6.1803 \text{ kA}$

$\rho_r = 1.78 \mu\Omega - \text{cm}$

Reemplazamos y obtenemos la sección mínima del conductor de cobre para nuestra malla a tierra.

$$A_{mm^2} = \frac{6.1803}{\sqrt{\frac{3.42}{0.015 \cdot 0.00381 \cdot 1.78} \cdot \ln\left(\frac{242+1084}{242+15}\right)}} \quad (145)$$

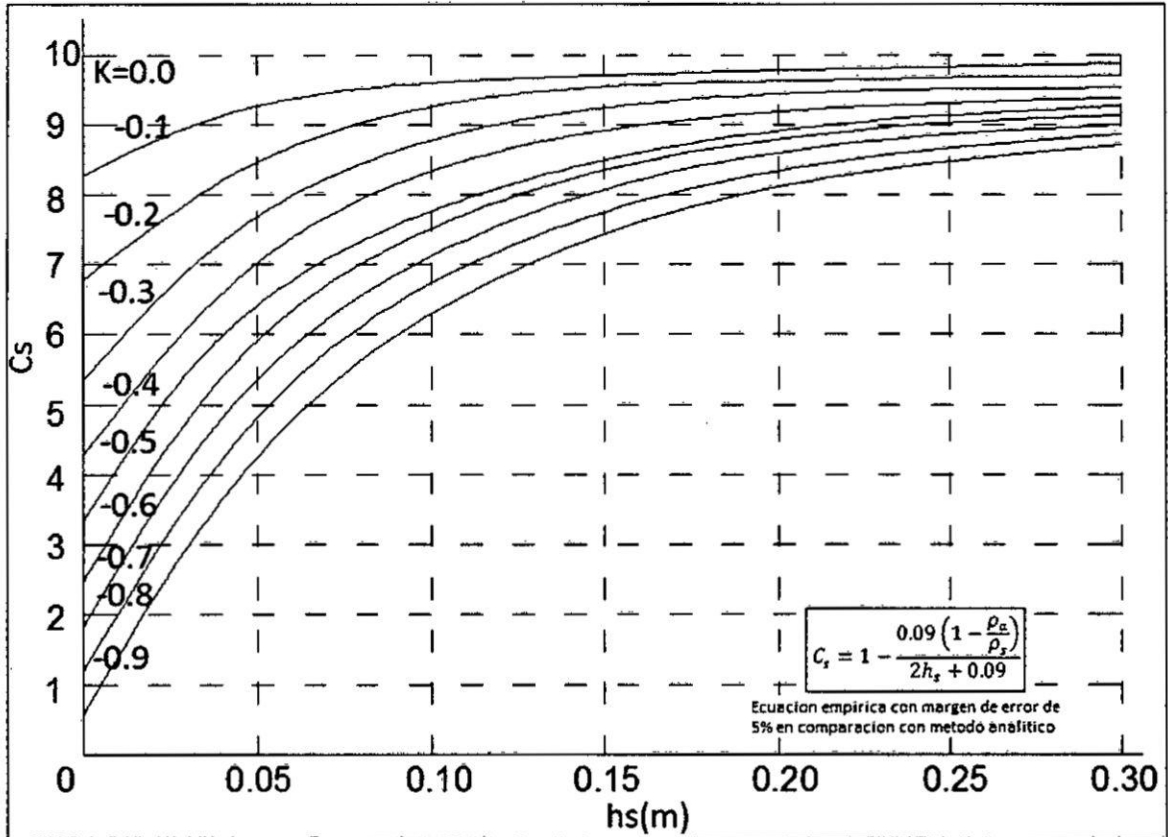
$$A_{mm^2} = 43.037 \text{ mm}^2 \quad (146)$$

La sección elegida tendrá como criterio la consideración de otros fenómenos como son los llamados transitorios electromagnéticos, como por ejemplo las descargas atmosféricas. La IEEE Std 80-2000 nos indica que la sección mínima a elegir en el diseño es la sección de 2/0 AWG (107 mm^2).

PASO 4: Cálculo de las tensiones de toque y paso.

Consiste en obtener los niveles de tensiones que se encuentran en la malla al momento de una falla a tierra hasta que esta sea despejada, la norma IEEE Std 80-2000 nos da un procedimiento de análisis gráfico y analítico para determinar este tipo de tensiones.

Gráfico N°13: Gráfica del factor de reducción (C_s).



Fuente: Propia

Se evalúa las tensiones de toque y paso para una persona de 70 kg respectivamente para un tiempo de despeje de $t=0.5$ s

Primero hallamos a que familia de curva corresponde nuestra subestación, en consecuencia determinamos primero el factor K para nuestro caso:

$$K = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s} \quad (147)$$

ρ_s : Resistividad de la capa de grava que se coloca en la superficie de la subestación eléctrica, que por lo general es grava de 1" de diámetro. El valor de esta variable es de: $\rho_s = 3000 \Omega - m$

ρ_a : Resistividad aparente del terreno

Reemplazando en ecuación (147):

$$K = \frac{176.690530 - 3000}{176.690530 + 3000} = -0.888758109 \quad (148)$$

Conocido el valor de K en la gráfica N°13 se elige la curva -0.8, por simple inspección se determina el valor de C_s . El otro método analítico para calcular dicho valor está dado por la siguiente ecuación y es el valor que vamos a utilizar para nuestros cálculos.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (149)$$

Donde:

h_s : Espesor de la capa de grava colocada en el suelo de la subestación $h_s = 0.1m$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{176.690530}{3000}\right)}{2(0.15) + 0.09} = 0.782822 \quad (150)$$

Calculamos los valores de tensión de toque y paso permisible para la SSEE Milpo Según IEEE Std-80 2000 se evalúan las tensiones de toque y paso para un peso de 70 kg con las expresiones:

$$E_{s-70} = (1000 + 6C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (151)$$

$$E_{t-70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (152)$$

Donde:

t_s : Duración de la corriente de choque para nuestro diseño $t_s = 0.5 s$ para una respuesta más rápida de los equipos de protección.

Reemplazando:

$$E_{s-70} = (1000 + 6(0.782822)(3000)) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 3350.633 V \quad (153)$$

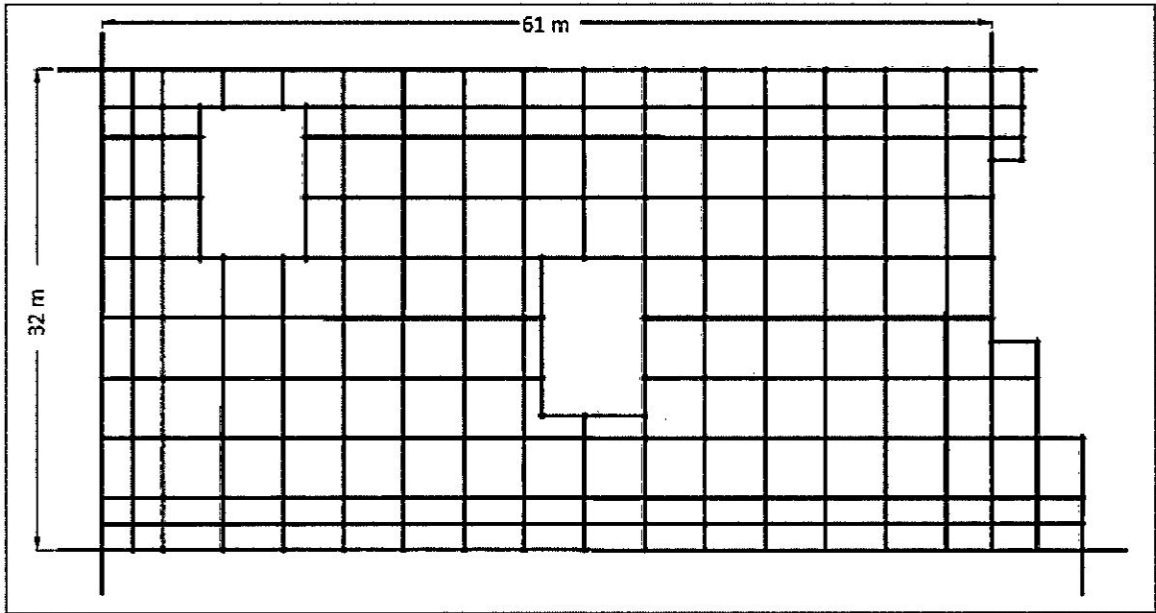
$$E_{t-70} = (1000 + 1.5(0.782822)(3000)) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 1004.181749 V \quad (154)$$

Los valores de las tensiones de toque y paso para personas de 50 y 70 kg son los valores máximos de diseño según la IEEE Std 80-1986 para nuestra malla a tierra, además no se debe superar dichos valores; Sin embargo, en este trabajo de investigación utilizamos la IEEE Std 80-2000 la cual solo considera las tensiones de toque y paso para una persona de 70 kg.

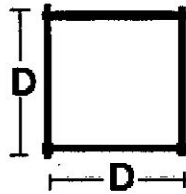
PASO 5: Diseño inicial de la malla.

Para hallar la resistencia equivalente de la malla hemos definido las dimensiones de las varillas verticales y los conductores horizontales de la malla, además el área de la subestación:

Figura N°38: Área total de la SSEE Milpo 138/50/10kV.



Área de un cuadrado de la malla.



Fuente: Propia

La siguiente lista de diseño fue la primera en validarse como ingeniería básica, sin embargo, llevando este diseño a nuestra investigación se puede obtener valores más aceptables económicamente. Esto se señala más adelante.

La cuadrícula es un cuadrado de lado $D=4\text{m}$

Las demás variables que se utilizan del diseño de la malla son los siguientes:

Lado mayor L_x : 61 m

Lado menor L_y : 32m

Área Total: 1952m^2

M: Número de filas longitudinal: 17

N: Número de filas transversal: 9

Lc: Longitud total del conductor horizontal de la malla: $Lx.M + Ly.N = 1069 \text{ m}$

Lr: Longitud promedio de las varillas: 2.5 m

n_v : Número de varillas verticales de la malla: 24

A: área ocupada de la malla de tierra: $(Lx)(Ly)$

2ac: Diámetro del conductor de la malla de sección 107 mm^2 (ver ecuación (146), página 141): 0.01167204 m

H: Profundidad de la malla: 1.1m

b: Diámetro del conductor de varillas (se propone un diámetro de $1/2''$): 0.01275 m

K1; K2: Constantes de la geometría de la malla:

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3xH}{\sqrt{Area} - 0.44 \frac{Lx}{Ly}} \quad (155)$$

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3x1.1}{\sqrt{1952} - 0.44 \frac{61}{32}} = 0.533986 \quad (156)$$

$$K_2 = 5.5 - \frac{8xH}{\sqrt{Area}} - \frac{Lx}{Ly} \left(0.15 - \frac{H}{\sqrt{Area}} \right) \quad (157)$$

$$K_2 = 5.5 - \frac{8x1.1}{\sqrt{1952}} - \frac{61}{32} \left(0.15 - \frac{1.1}{\sqrt{1952}} \right) = 5.062344 \quad (158)$$

PASO 6 Cálculo de la resistencia de malla a tierra.

Con estos datos la norma IEEE Std 80-2000 nos brinda dos alternativas para determinar la resistencia de malla a tierra R_g , la primera es la denominada ecuación expandida de SVERAK (esta no considera varillas verticales) y la segunda es la ecuación de SCHWARZ utilizamos ambas ecuaciones y consideramos un solo valor para nuestro diseño.

Mediante ecuación de SCHWARZ:

$$R_{11} = \frac{\rho_a}{\pi.L_c} \left[\ln \left(\frac{2.L_c}{\sqrt{2ac.H}} \right) - \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (159)$$

$$R_{11} = \frac{176.690530}{\pi 1069} \left[\ln \left(\frac{2x1069}{\sqrt{0.0116720x1.2}} \right) - \frac{0.533986x1069}{\sqrt{1952}} - 5.062344 \right] \quad (160)$$

$$R_{11} = 0.9313954 \Omega \quad (161)$$

$$R_{22} = \frac{\rho_a}{2.\pi.n_r.L_r} \left[\ln \left(\frac{8.L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (162)$$

$$R_{22} = \frac{176.690530}{2.\pi.24x2.5} \left[\ln \left(\frac{8x2.5}{0.01275} \right) - 1 + \frac{2x0.533986x2.5}{\sqrt{1952}} - (\sqrt{24} - 1)^2 \right] \quad (163)$$

$$R_{22} = 3.410456662 \Omega \quad (164)$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi.L_c} \left[\ln \left(\frac{2.L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (165)$$

$$R_m = \frac{176.690530}{\pi.1069} \left[\ln \left(\frac{2x1069}{2.5} \right) + \frac{0.533986x1069}{\sqrt{1952}} - 5.062344 + 1 \right] \quad (166)$$

$$R_m = 0.82123 \Omega \quad (167)$$

$$R_g = \frac{R_{11}R_{22} - R_m^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_m} = \frac{0.9313954 \times 3.41045 - 0.82123^2}{0.9313954 + 3.41045 - 2 \times 0.82123} \quad (168)$$

$$R_g = 0.92689946 \Omega \quad (169)$$

Mediante ecuación de SVERAK:

$$R_g = \rho_a \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20xA}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (170)$$

$$R_g = 176.690530 \left[\frac{1}{1069} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 1952}} \left(1 + \frac{1}{1 + 1.1 \sqrt{\frac{20}{1952}}} \right) \right] \quad (171)$$

$$R_g = 1.8641897 \, \Omega \quad (172)$$

Resolviendo ambas ecuaciones y comparándolas se obtiene mayor resistencia con Sverak debido a que no se considera el uso de varillas verticales, al tener la resistencia alta quiere decir mayor oposición a la corriente y por lo tanto la corriente por la malla es menor; en cambio por el método de Schwarz se tiene menor resistencia debido al uso de varillas verticales, esto implica mayor flujo de corriente. Para terrenos con suelos húmedos y suelos no rocosos las resistividades suelen ser menores a $200 \, \Omega - m$ como en la sierra o la selva. Otro punto que se debe detallar es que al construir una malla a tierra para una subestación de potencia es que al utilizarse grandes cantidades de conductor de cobre, la resistencia tiende a ser menor a $1 \, \Omega$ esto en el caso de suelos no rocosos, por ello el diseño más crítico sería tener una resistencia de malla menor a $1 \, \Omega$. En conclusión el caso más crítico es cuando se tiene menor resistencia en la malla debido al mayor flujo de corriente. Por ello para el diseño optimizado utilizamos:

$$R_g = 0.92689946 \, \Omega \quad (173)$$

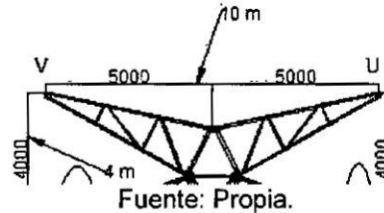
PASO 7: Cálculo de la corriente de diseño I_g según IEEE Std 80-2000.

Para hallar la corriente de diseño primero hallamos el factor de divisor S_f , el cual depende de la resistencia de la malla R_g y la impedancia total equivalente de los cables de guarda $Z_{eq_{total}}$, emplearemos la ecuación (108) deducida para hallar la impedancia equivalente.

$$Z_{eq_{total}} = \frac{Z_{cg} + \sqrt{Z_{cg}^2 + 4 \cdot Z_{cg} \cdot (Z_t + R_t)}}{2} \quad (174)$$

Como se puede apreciar se necesita calcular la impedancia equivalente de los cables de guarda para la línea de Transmisión Paragsha II – Milpo 138kV, en esta línea se cuenta con 2 cables de guarda instalados en la cima de la torre. En este caso los cables de guarda cuyo material empleado es OPGW son de 96 mm².

Figura N°39: Puntos U y V donde se anclan los cables de guarda.



La ecuación para hallar la impedancia del cable de guarda no lo especifica la IEEE Std 80-2000 por lo que en forma general se determina con la ecuación (109):

$$Z_{cg-T} = (R_{CD} + 0.000988f) + j 0.002938f \log \left(\frac{D_e}{GMR} \right) \frac{1}{n_{cg}} \quad (175)$$

Donde:

$$R_{CD} = 0.35872 \Omega / \text{km}$$

Z_{cg-T} : Impedancia de cables de guarda en la línea de transmisión en (Ω).

$GMR = 0.003989423 \text{ m}$ (El conductor es de OPGW 95 mm² fibra óptica con cubierta de cable de acero)

$$D_e = 658.4x\sqrt{\rho/f} = 658.4x\sqrt{176.690530/60} = 1129.9\text{m} \quad (176)$$

$n_{cg} = 2$ (Número de cables de guarda)

Reemplazando valores:

$$Z_{cg-T} = (0.35872 + 0.000988(60)) + j 0.002938(60) \ln \left(\frac{744.3635}{0.003989423} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (177)$$

$$Z_{cg-T} = 0.2090 + j 1.1065 \Omega/km \quad (177.1)$$

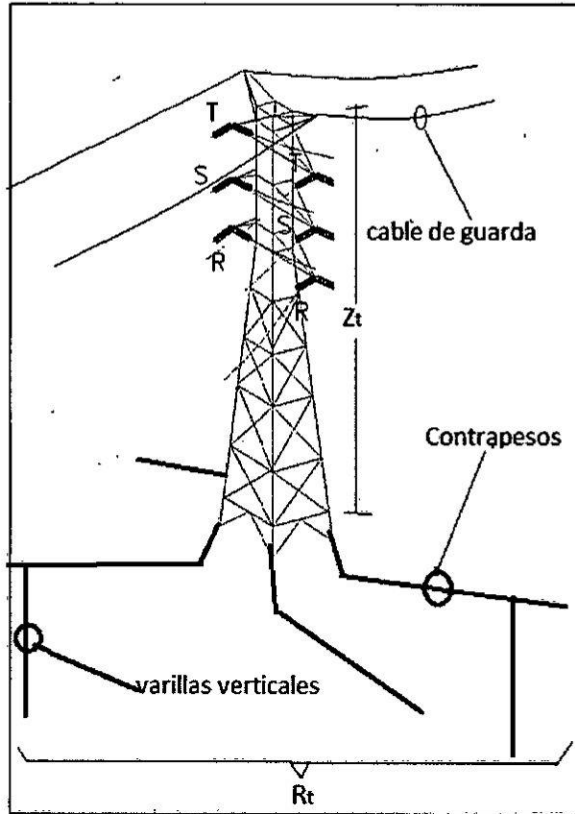
Evaluamos la impedancia para un vano de 500 m que es una distancia aproximada entre torre y torre

$$Z_{cg-T} = (0.2090 + j 1.1065) \times 0.5 \quad (178)$$

$$Z_{cg-T} = 0.1045 + j 0.5533 \Omega \quad (179)$$

Por último se tienen los datos de la resistencia de puesta a tierra (R_t) de las torres, los cuales han sido medidos en las bases de cada torre que soporta los cables de guarda y línea. Con el telurómetro de 4 electrodos los valores obtenidos tienen un promedio de 13 Ω hasta una distancia de 5 km de la subestación. Asimismo la impedancia transitoria de la torre (Z_t) se obtiene como dato de algunos estudios de maestría en sistemas de potencia para torres de 35 m, en el cual se tiene una impedancia transitoria de 70 Ω (véase referencia bibliográfica ítem N° 6, página 162) y en el estado estable ($Z_t = 0 \Omega$) para este cálculo se usó la impedancia en el estado estable.

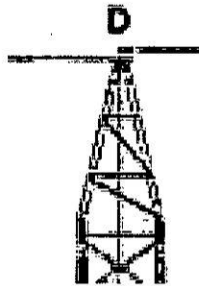
Figura N°40: Impedancias de las torres de transmisión.



Fuente: Propia.

Para la línea de distribución Milpo – Chicrin (Atacocha) / Candelaria - Milpo 50kV se tiene un solo cable de guarda.

Figura N° 41: Punto D donde se ancla el cable de guarda.



Fuente: Propia.

$$Z_{cg-D} = (R_{CD} + 0.000988f) + j 0.000988f \log \left(\frac{D_e}{GMR} \right) \frac{1}{n_{cg}} \Omega/km \quad (180)$$

Donde:

$$R_{CD} = 0.35872 \Omega/\text{km}$$

Z_{cg-D} : Impedancia de los cables de guarda en la línea de distribución en (Ω).

GMR = 0.003989423 m (El conductor es de OPGW 95 mm² fibra óptica con cubierta de cable de acero)

$$D_e = 658.4x\sqrt{\rho/f} = 658.4x\sqrt{176.690530/60} = 1129.9 \text{ m} \quad (181)$$

$$n_{cg} = 1 \text{ (Número de cables de guarda)}$$

Reemplazando valores:

$$Z_{cg-D} = (0.35872 + 0.000988(60)) + j 0.002938(60) \ln \left(\frac{744.3635}{0.35872} \right) \frac{1}{1} \quad (182)$$

$$Z_{cg-D} = 0.4180 + j 2.2130 \Omega/\text{km} \quad (183)$$

Evaluando la impedancia para un vano de 200 m que es una distancia aproximada entre torre y torre

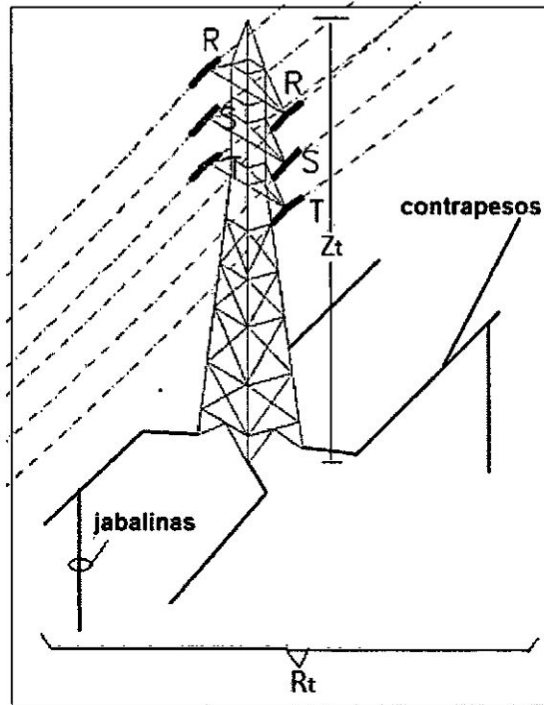
$$Z_{cg-D} = (0.6473 + j 0.4554) \times 0.2 \quad (184)$$

$$Z_{cg-D} = 0.0836 + j 0.4426 \Omega \quad (185)$$

La resistencia de puesta a tierra (R_t) de las torres la cual ha sido medida en la base de cada torre de dicha línea con el telurómetro de 4 electrodos y de los valores obtenidos se tiene un promedio de 13 Ω hasta una distancia de 5 km de la subestación. Asimismo la impedancia transitoria de la torre (Z_t) como dato de algunos estudios de maestría en sistemas de potencia para torres de 25 m, se

tiene una impedancia transitoria de 70Ω (véase referencia bibliográfica ítem N° 6, página 162) y en el estado estable ($Z_t = 0 \Omega$) para este cálculo se usó la impedancia en el estado estable.

Figura N°42: Impedancias de la torre de distribución.



Fuente: Propia.

Con los valores de impedancia de los cables de guarda procedemos a determinar la impedancia equivalente de los aportes de dichos cables, para cada línea de transmisión y distribución.

Para la línea de transmisión:

$$Z_{eq_{total\ T}} = \frac{(0.1045 + j 0.5533) + \sqrt{(0.1045 + j 0.5533)^2 + 4(0.1045 + j 0.5533) \cdot (0+13)}}{2} \quad (186)$$

$$Z_{eq_{total-T}} = 2.1282 + j 2.0159 \quad (187)$$

La impedancia compleja con la parte imaginaria negativa quiere decir que en la red de secuencia cero del cable de guarda, existen elementos como capacitancia, inductancia y obviamente resistencia.

Para la línea de distribución:

$$Z_{eq_{total-D}} = \frac{(0.0836 + j 0.4426) + \sqrt{(0.0836 + j 0.4426)^2 + 4(0.0836 + j 0.4426) \cdot (0 + 13)}}{2} \quad (188)$$

$$Z_{eq_{total-D}} = 1.8999 + j 1.7746 \quad (189)$$

La impedancia compleja con la parte imaginaria negativa quiere decir que en la red de secuencia cero del cable de guarda, existen elementos como capacitancia, inductancia y obviamente resistencia.

Teniendo las impedancias equivalentes y la resistencia de la malla a tierra reemplazamos en la ecuación:

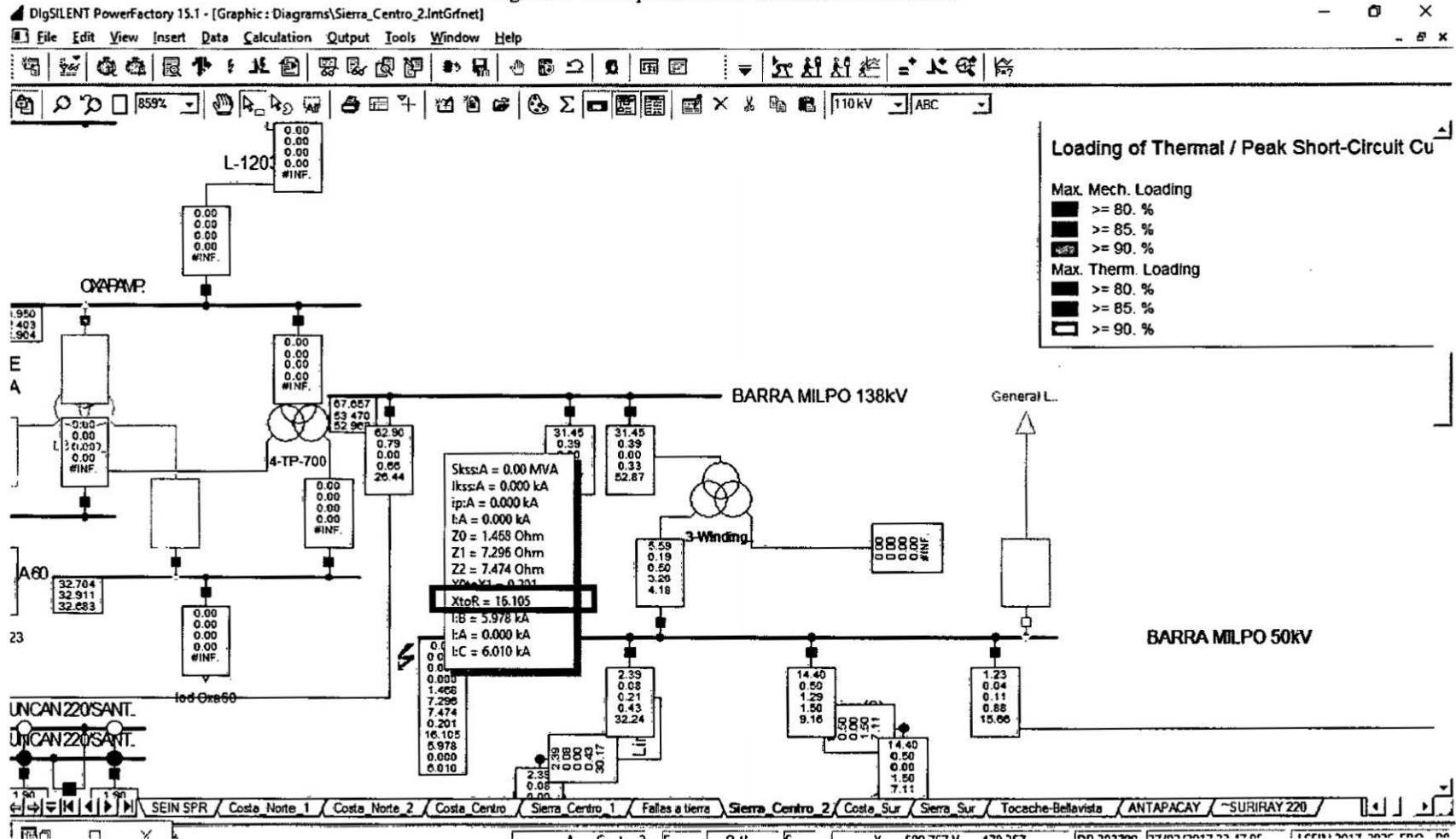
$$(S_f) = \left| \frac{1}{\left[\frac{1}{2.1282 + j 2.0159} + \frac{1}{1.8999 + j 1.7746} \right] \times \left[\frac{1}{2.1282 + j 2.0159} + \frac{1}{1.8999 + j 1.7746} + 0.91355677 \right]} \right| \quad (190)$$

Resolviendo y hallando el módulo.

$$(S_f) = 0.6447 \quad (191)$$

Por último calculamos el factor de decremento (D_f) del sistema, para ello nos apoyamos del programa Digsilent para hallar el componente de la impedancia subtransitoria de falla (X/R):

Figura N°43: Impedancias de la torre de distribución.



Fuente: Propia.

Como vemos en la figura N° 43 luego de realizar la simulación de una falla bifásica se obtiene el valor de los componentes de la impedancia subtransitoria de falla X/R, este valor es necesario para determinar T_a (constante de tiempo de la componente DC):

$$\frac{X}{R} = 16.105 \quad \rightarrow \quad T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{16.105}{2.\pi.60} = 0.0424413 \quad (192)$$

Determinamos el factor de decremento para un tiempo de falla $t_f = 0.5$ s.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.0424413}{0.5} (1 - e^{-\frac{2 \times 0.5}{0.0424413}})} = 1.041576994 \quad (193)$$

Dónde:

t_f : Duración de la falla en s.

T_a : Constante de tiempo de la componente DC

X, R → Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación X/R.

Finalmente obtenemos la corriente de diseño I_g para ello multiplicamos las ecuaciones (193); (191) y (143).

$$I_g = I_F \times D_f \times S_f \times C_p \quad (194)$$

Donde:

C_p : Factor de proyección (en caso de haber ampliación a futuro), para la subestación Milpo no se tiene ampliación; al no haber ampliación ($C_p = 1$).

Reemplazando obtenemos:

$$I_g = 6.1803 \times 1.04157 \times 0.64 \times 1 = 4119.845 \text{ A} \quad (195)$$

PASO 8: Evaluación con la tensión de toque (E_{t-70}).

Con la corriente de diseño I_g calculamos el valor de la tensión de la malla o el GPR:

$$GPR = R_g I_g = 0.92689 \times 4119.845 = 3818.6823 \text{ V} \quad (196)$$

Comparando el GPR con la tensión de toque E_{t-70} y verificamos que el GPR sea menor.

$$E_{t-70} = 1004.182124 \text{ V} \quad (197)$$

$$GPR = 3818.6823 \text{ V} \quad (198)$$

Al no cumplirse la relación $GPR < E_{t-70}$ se calcula la tensión de retícula E_m y se debe cumplir la relación $E_m < E_{t-70}$

La expresión de E_m es la siguiente:

$$E_m = \frac{\rho I_g K_m K_i}{L_M} \quad (199)$$

PASO 9: Cálculo de los parámetros K_m , K_i , K_h para hallar tensiones E_m y E_S

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+h+2)^2}{8 \cdot D \cdot h} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (200)$$

Donde

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} = \frac{1}{(2 \times 11.79237)^{\frac{2}{11.79237}}} = 0.5850597 \quad (201)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{1.1}{1}} = 1.44913 \quad (202)$$

$$n_a = \frac{2.L_C}{L_P} = \frac{2 \times 1069}{186} = 11.494623 \quad (203)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_C}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{1069}{4\sqrt{1952}}} = 1.0259035 \quad (204)$$

$n_c = 1$: Para una rejilla cuadrada

$n_d = 1$: Para una rejilla cuadrada

$$n = 11.49462 \times 1.025903 \times 1 \times 1 = 11.7923749$$

Hallando K_m :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{4^2}{16 \times 1.1 \times 0.0116720} + \frac{(4+1.1+2)^2}{8 \times 4 \times 1.1} - \frac{1.1}{4 \times 0.0116720} \right] + \frac{0.5850597}{1.44913} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times 11.7923749 - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.6647302 \quad (205)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148.n = 0.644 + 0.148 \times 11.79237 = 2.3892714 \quad (206)$$

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R = 1164.656 \text{ m} \quad (207)$$

Reemplazando en (199)

$$E_m = \frac{176.690530 \times 4119.845 \times 0.6647302 \times 2.3892714}{1164.656} = 992.6753V \quad (208)$$

PASO 10: Evaluación de $E_m < E_{t-70}$

Ahora comparamos E_m vs. E_{t-70} tal que se cumpla $E_m < E_{t-70}$

$$E_m = 992.6753V$$

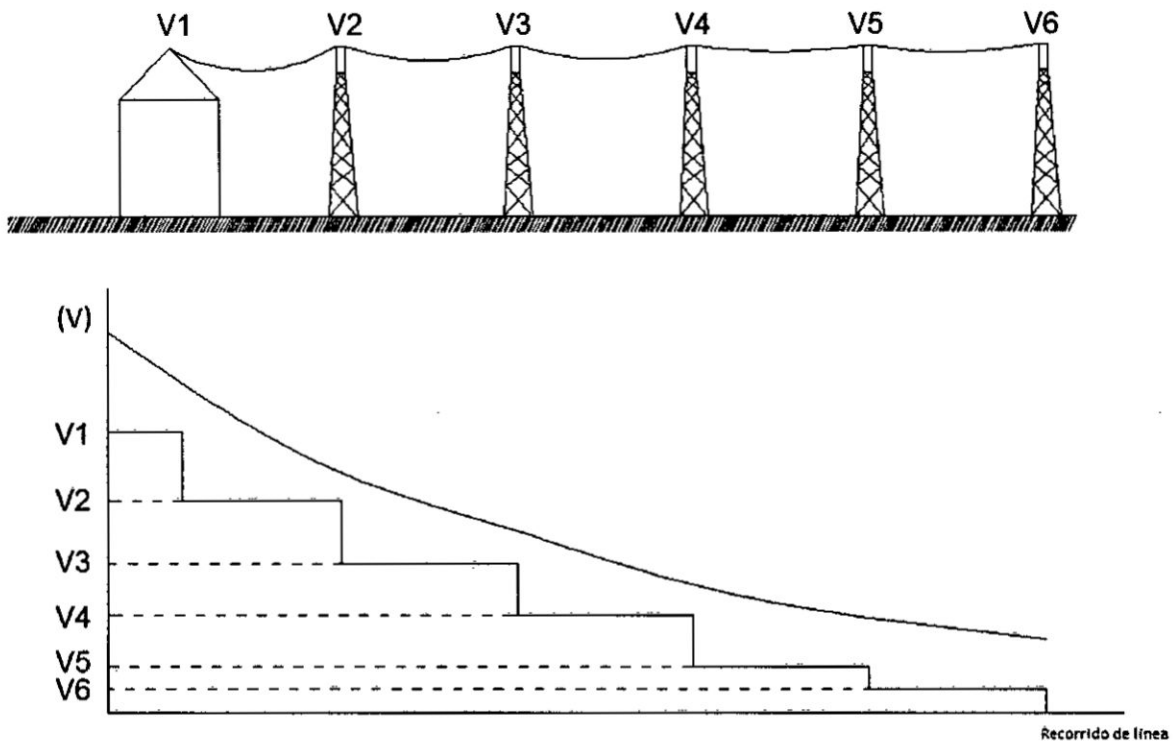
$$E_{t-70} = 1004.182124V$$

Vemos que se cumple la condición de diseño según IEEE Std 80-2000, sin embargo a partir del paso 7 sobre la corriente de diseño (I_g), lo que se observa

es que el factor (S_f) es muy alto debido a la resistencia de puesta a tierra de las torres. Para reducir dicho factor, una posibilidad es reducir la resistencia de puesta a tierra de las torres de transmisión y distribución.

Otro escenario en el cual el factor divisor (S_f) puede aumentar en la etapa de operación, puede darse en los esfuerzos mecánicos que sufre los perfiles de celosía ante un cortocircuito, esto hace que los pernos se fundan o sufran deformaciones, por ello las torres metálicas de celosía están diseñadas para el soporte de las líneas aéreas mas no para que cumpla la función de un sistema de aterramiento. En el estado transitorio se manifiesta el cortocircuito y en el subtransitorio las descargas atmosféricas (un tercio de la velocidad de la luz). Una alternativa para anular estas impedancias transitorias en la torre sería prolongar en una pata el cable cooperwell hasta la cima de la torre esto en la cercanía de la subestación (hasta 5 km) debido a que la corriente disminuye a medida que se aleja de la fuente del cortocircuito, en la siguiente figura se puede apreciar esta observación

Figura N°44: Trayecto y disminución del potencial respecto a la distancia de línea a partir de la subestación



Fuente: Diseño de subestaciones eléctricas..
 Autor: José Raúl Martín.

En cuanto a la resistencia de puesta a tierra de las torres, la disminución de la resistencia se consigue realizando tratamiento con cemento conductor o aditivos como sales higroscópicas o bentonita, la otra manera de reducir la resistencia es aumentar contrapesos con cable cooperwell ya que se comportan como un circuito equivalente en paralelo.

En la línea de transmisión la resistencia de puesta a tierra promedio es de 13Ω , dependiendo de la resistividad del terreno existen torres con 2 y 4 contrapesos, en consecuencia al querer reducir la resistencia de puesta a tierra se tendrán entre 4 a 5 contrapesos por torre los valores de resistencia disminuyen tal como indica la siguiente tabla.

Tabla N°21: Instalación de contrapesos para reducción de resistencias de puestas a tierra en torres de transmisión.

N° de contrapesos	Impedancia equivalente (Ω)
1 cable	26
2 cables	$\frac{26 \times 26}{26 + 26} = 13$
3 cables	$\frac{26 \times 13}{26 + 13} = 8.66$
4 cables	$\frac{26 \times 8.66}{26 + 8.66} = 6.5$
5 cables	$\frac{23 \times 6.5}{23 + 6.5} = 5.2$

Fuente: Propia

En la tabla N°21 se muestra, como para una torre que tiene 2 contrapesos con una resistencia de 26 Ω al instalarle 2 contrapesos llega a disminuir a 13 Ω , bajo esa analogía si se tuviera 4 contrapesos con 13 Ω se tendría que aumentar 2 para llegar a los 6.5 Ω , y al agregar a esos contrapesos aditivos como Thor-gel la resistencia disminuye aún más.

En la línea de distribución también se realizó la misma operación para disminuir la resistencia de puesta a tierra aumentando contrapesos o bien realizando tratamiento de los contrapesos existentes con sales higroscópicas, cemento conductor o bentonita.

Tabla N°22: impedancia equivalente final con 5 contrapesos para torres de distribución.

N° de contrapesos	Impedancia Inicial (Ω)
1 cable	24
2 cables	$\frac{24 \times 24}{24 + 24} = 12$
3 cables	$\frac{24 \times 12}{24 + 12} = 8$
4 cables	$\frac{24 \times 8}{24 + 8} = 6$
5 cables	$\frac{24 \times 6}{24 + 6} = 4.8$

Fuente: Propia

Figura N°45: Medición final de resistencias de puesta a tierra en las torres de transmisión.



Fuente: Propia

Figura N°46: Instalación de contrapesos en las torres de transmisión (Cía. Milpo).



Fuente: Propia

Figura N°47: Relleno y compactado de contrapeso con tierra cernida. (Cía. Milpo).



Fuente: Propia

Al hacer estas correcciones, sin considerar la impedancia transitoria de las torres ($Z_t \cong 0$) y al agregar contrapesos, las torres cercanas a la subestación (ver tablas N° 21 y 22) y la resistencia de puesta a tierra R_t de las torres tendría en promedio 5Ω .

Existen 2 métodos dados por la IEEE Std 80-2000 para determinar el factor (S_f) un método es mediante gráficos de Garrett and Patel, el otro método es el de Endrenyi; para nuestra tesis hemos deducido una expresión para determinar nuestro factor (S_f).

Procedemos a determinar la nueva impedancia equivalente mediante el método de Edrenyi recomendado en la IEEE Std 80-2000, luego evaluamos con la ecuación (108) deducida en esta tesis.

$$Z_{eq-T} = 0.5(Z_{cg}) + \sqrt{R_t(Z_{cg})} \quad (209)$$

Para la línea de transmisión:

$$Z_{eq-T} = 0.5(0.1045 + j 0.5533) + \sqrt{5(0.1045 + j 0.5533)} \quad (210)$$

$$Z_{eq-T} = 1.3441 + j 1.3473 \Omega \quad (211)$$

Para la línea de distribución:

$$Z_{eq-D} = 0.5(0.0836 + j 0.4426) + \sqrt{5(0.0836 + j 0.4426)} \quad (212)$$

$$Z_{eq-D} = 1.1973 + j 1.1789 \Omega \quad (213)$$

Hallamos la impedancia total equivalente:

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{eq-T}} + \frac{1}{Z_{eq-D}}} = \frac{1}{\frac{1}{1.3441 + j 1.3473} + \frac{1}{1.1973 + j 1.1789}} \quad (214)$$

$$Z_{eq} = 0.6332 + j 0.6288 \Omega \quad (215)$$

Finalmente hallamos el factor de divisor de corriente S_{f1} en módulo:

$$(S_{f1}) = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| = \left| \frac{0.6332 + j 0.6288}{0.6332 + j 0.6288 + 0.91355677} \right| \quad (216)$$

$$(S_{f1}) = 0.5345 \quad (217)$$

Ahora procedemos a determinar el S_f mediante la ecuación (108):

Para la línea de transmisión 138kV calculamos la nueva impedancia equivalente.

$$Z_{eq_{total} 138kV} = \frac{(0.1045 + j 0.5533) + \sqrt{(0.1045 + j 0.5533)^2 + 4(0.1045 + j 0.5533)(0+5)}}{2} \quad (218)$$

$$Z_{eq_{total}} = 1.3328 + j 1.3680 \Omega \quad (219)$$

Para la línea de distribución de 50kV calculamos la nueva impedancia equivalente.

$$Z_{eq_{total} 50kV} = \frac{(0.0836 + j 0.4426) + \sqrt{(0.0836 + j 0.4426)^2 + 4(0.0836 + j 0.4426)(0+5)}}{2} \quad (220)$$

$$Z_{eq_{total}} = 1.1892 + j 1.1938 \Omega \quad (221)$$

Ahora hallamos el nuevo factor de divisor de corriente:

$$(S_{f2}) = \left| \frac{1}{\left[\frac{1}{1.3328 + j 1.3680} + \frac{1}{1.1892 + j 1.1938} \right] \times \left[\frac{1}{1.3328 + j 1.3680} + \frac{1}{1.1892 + j 1.1938} + 0.91355677 \right]} \right| \quad (222)$$

$$(S_{f2}) = 0.5365 \quad (223)$$

Finalmente comparamos ambos factores obteniendo:

$$S_{f1} < S_{f2} \quad (224)$$

Observamos que el mayor factor de divisor de corriente se da con la expresión deducida, elegimos el mayor valor para realizar cálculos de aquí en adelante aunque sea indiferente, ya que solo se diferencian en decimales.

Volviendo al **PASO 5**, al disminuir el factor divisor se vuelve a rediseñar las dimensiones de la malla a tierra, los nuevos parámetros serán los siguientes:

La cuadrícula es un cuadrado de lado $D=5\text{m}$

Las demás variables que se utilizan el diseño de la malla son los siguientes:

Lado mayor L_x : 61 m

Lado menor L_y : 32m

Área Total: 1952m^2

M: Número de filas longitudinal: 14

N: Número de filas transversal: 8

L_c : Longitud total del conductor horizontal de la malla: $L_x \cdot M + L_y \cdot N = 873.8 \text{ m}$

L_r : Longitud promedio de las varillas: 2.5 m

n_r : Número de varillas verticales de la malla: 20

A: área ocupada de la malla de tierra: $(L_x)(L_y)$

$2ac$: Diámetro del conductor de la malla de sección 107 mm^2 (véase página (104)) en metros: 0.01167204 m

H: Profundidad de la malla: 1.1m

$$K_1 = 0.533986 \quad (225)$$

$$K_2 = 5.0623443 \quad (226)$$

Podemos resaltar que el factor de divisor nos permite reducir u optimizar la malla a tierra. Entre las variaciones se tiene la resistencia de malla a tierra:

$$R_g = 0.96909471 \Omega \quad (227)$$

Con el nuevo factor de divisor vamos al **PASO 7** para calcular la corriente de diseño I_g :

$$I_g = 6.1803 \times 1.04157 \times 0.5365 \times 1 = 3455.097A \quad (228)$$

Pasamos al paso 8 con el nuevo diseño.

PASO 8: Evaluación con la tensión de toque E_{t-70} .

Calculamos el nuevo valor de la tensión de la malla o el GPR:

$$GPR = R_g I_g = 0.969094 \times 3455.097 = 3348.3170 \text{ V} \quad (229)$$

Comparando el GPR (Margen de potencial de tierra) con la tensión de toque E_{t-70} y verificamos que el GPR sea menor.

$$E_{t-70} = 1004.182124 \text{ V} \quad (230)$$

$$GPR = 3348.3170 \text{ V} \quad (231)$$

Al no cumplirse la relación $R_g I_g < E_{t-70}$ seguimos con el paso 9.

PASO 9: Cálculo de los parámetros K_m, K_i, K_h para hallar tensiones E_m y E_S

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (232)$$

Con el cambio de los parámetros de la malla a tierra los valores de las constantes K_m, K_i y L_M toman nuevos valores haciendo una hoja de cálculo en Excel se determina en forma instantánea estos valores y son:

$$K_m = 0.7332$$

$$K_i = 2.0705$$

$$L_M = 953.51 \text{ m}$$

La resistividad no varía ya que es una variable independiente la corriente de diseño es la determinada en la ecuación (226)

$$E_m = \frac{176.6905 \times 3455.097 \times 0.73323 \times 2.0705}{953.51} = 972.0359 \text{ V} \quad (233)$$

PASO 10: Evaluación de $E_m < E_{t-70}$

Ahora comparamos E_m vs. E_{t-70} tal que se cumpla $E_m < E_{t-70}$

$$E_m = 972.0359 \text{ V}$$

$$E_{t-70} = 1004.182124 \text{ V}$$

Debido a que es válida la relación $E_m < E_{t-70}$ continuamos con el **PASO 11** que es el cálculo de la nueva tensión de paso E_S y luego que se valide la relación $E_S < E_{S-70}$ se dará por concluido el diseño.

PASO 11: Evaluación de $E_S < E_{S-70}$

El valor de la tensión de paso en la malla se define como:

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_t \cdot I_g}{L_S} \quad (234)$$

Donde:

E_S : Tensión de paso de la malla en (V)

E_{S-70} : Máxima tensión de paso según IEEE Std 80-2000 en (V)

Definimos los valores de K_S y L_S como:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (235)$$

Reemplazando obtenemos:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 1.1} + \frac{1}{5+1.1} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{9.6390-2}) \right] \quad (236)$$

$$K_S = 0.260210 \quad (237)$$

$$L_S = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R = 0.75 \times 873.8 + 0.85 \times 50 \quad (238)$$

$$L_S = 697.85 \text{ m} \quad (239)$$

$$E_S = \frac{176.6905 \times 0.260210 \times 2.0705 \times 3455.097}{697.85} = 471.33514 \text{ V} \quad (240)$$

Evaluando ($E_S < E_{S-70}$) verificamos que es válido la relación de tensiones de paso, es entonces que el diseño de la malla finaliza con los parámetros de diseño dados en las ecuaciones (225) y (226). En resumen podemos mencionar que la dificultad de proseguir con el diseño se dio cuando la corriente de diseño (I_g) era

muy elevada, teniendo en cuenta que la resistencia de malla ($R_g > 1 \Omega$) estas condiciones nos brinda un factor de divisor elevado y a su vez un mayor flujo de corriente por la malla; lo ideal es tener un factor de divisor debajo del 50%, sin embargo teniendo la resistencia de la malla menor a 1Ω , la impedancia de los cables de guarda difícilmente podría llegar a 1Ω cuando se tiene solo dos líneas de cable de guarda, entonces con estas condiciones una alternativa es, como se dijo anteriormente en el **Paso 10**, mejorar las resistencias de las puestas a tierra de las torres de transmisión y distribución, en zonas donde hay presencia de descargas atmosféricas como en la sierra y selva esto sería un beneficio, ya que la onda impulso encontraría menor oposición al viajar de la cima de la torre hasta los contrapesos (revísese el tema del flameo inverso en torres).

En el **Paso 5** se determinó las dimensiones iniciales de la malla, sin embargo, mediante un programa como MATLAB u otro programa se puede optimizar más el diseño de la malla siempre cumpliendo con la validación de los pasos del 1 al 11.

Luego de cumplir con las condiciones del **Paso 11** ya el diseño básico de ingeniería de la malla a tierra pasa al proceso de la ingeniería de detalle.

CAPITULO V

RESULTADOS.

Luego de realizar en el diseño con los valores aceptables para construir la malla se obtienen los siguientes resultados para construir la malla a tierra:

La cuadrícula será un cuadrado de lado $D = 5\text{m}$

Las demás variables que se utilizan en el diseño de la malla son los siguientes:

Lado mayor $L_x: 61\text{m}$

Lado menor $L_y: 32\text{m}$

Área Total: 1952m^2

M: Número de filas longitudinal: 14

N: Número de filas transversal: 8

L_c : Longitud total del conductor horizontal de la malla: $L_x \cdot M + L_y \cdot N = 873.8\text{ m}$

L_r : Longitud promedio de las varillas: 2.5 m

n_v : Número de varillas verticales de la malla: 20

$2ac$: Diámetro del conductor de la malla de sección 107 mm^2 (véase página N°100) en metros: 0.01167204 m

H: Profundidad de la malla: 1.1m

b: Diámetro del conductor de varillas (se propone un diámetro de 1/2"): 0.01275
m

$$K_1 = 0.533986$$

$$K_2 = 5.0623443$$

Estos valores cumplen con el diseño de la IEEE Std 80-2000, sin embargo en la etapa de la ingeniería de detalle se puede realizar una segunda optimización de diseño, para saber ello existen programas computacionales que permiten optimizar el diseño en cuanto a la utilización de materiales como varillas de cooperwell, cable de cobre, soldaduras exotérmicas, tipos de soldaduras, tratamiento de la tierra cernida, etc. Para este trabajo de investigación se elaboró una hoja de cálculo el cual contiene la optimización para el diseño definitivo.

CAPITULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 Contrastación de hipótesis con los resultados.

Efectivamente se logró esquematizar el sistema de secuencia cero de la red de tierra, determinando la red equivalente entre la resistencia de malla a tierra y los cables de guarda.

Se determinó con el factor de divisor, que la corriente que ingresó a la malla disminuyó al final de la optimización del (S_f).

5.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares.

En la IEEE Std 80-2000 se tiene ejemplos de cómo hallar el factor de divisor de corriente empleando un método de cálculo similar y obviando algunas variables, en todo caso si queremos comparar ambos métodos realizamos un ejemplo de comparación de ambos métodos para analizar qué tan cercano serán los resultados finales.

Tenemos los siguientes parámetros de línea y malla a tierra:

R_T : Resistencia de puesta a tierra de las líneas de transmisión en (Ω).

R_D : Resistencia de puesta a tierra de las líneas de distribución en (Ω).

Z_{cg-T} : Impedancia de cable de guarda en línea de transmisión en (Ω/km).

Z_{cg-D} : Impedancia de cable de guarda en línea de distribución en (Ω/km).

Z_T : Impedancia de cable de torre en (Ω).

R_g : Resistencia de malla a tierra en (Ω).

Los valores de los parámetros están en la IEEE Std 80-2000 los cuales son:

$$R_T = 10 + j 0.0 \Omega$$

$$R_D = 25 + j 0.0 \Omega$$

$$Z_{cg-T} = 1.24 + j 0.55 \Omega / vano$$

$$Z_{cg-D} = 0.11 + j 0.11 \Omega / vano$$

$$Z_T = 0 \Omega$$

$$R_g = 2.5 \Omega$$

Resolvemos mediante método de IEEE Std-80 2000 el factor divisor S_f

Hallamos la impedancia equivalente en la línea de transmisión.

$$Z_{eq-T} = 0.5(1.24 + j 0.55) + \sqrt{10(1.24 + j 0.55)} = 4.22 + j1.03 \Omega \quad (241)$$

Luego en la línea de distribución.

$$Z_{eq-D} = 0.5(0.11 + j 0.11) + \sqrt{25(0.11 + j 0.11)} = 1.87 + j0.80 \Omega \quad (242)$$

Luego hallando la impedancia total equivalente:

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{eq-T}} + \frac{1}{Z_{eq-D}}} = \frac{1}{\frac{1}{4.22+j1.04} + \frac{1}{1.88+j0.89}} = 1.30 + j 0.48 \Omega \quad (243)$$

Finalmente hallamos el factor de divisor de corriente en modulo:

$$S_{f1} = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| = \left| \frac{1.31+j0.52}{1.31+j0.52+2.5} \right| = 0.3633 \quad (244)$$

Ahora resolvemos el factor divisor S_f mediante la deducción elaborada en la ecuación (108)

$$Z_{eq-T} = \frac{(1.24+j0.55) + \sqrt{(1.24+j0.55)^2 + 4 \cdot (1.24+j0.55) \cdot (0+10)}}{2} \quad (245)$$

$$Z_{eq-T} = 4.27 + j 1.074 \Omega \quad (246)$$

Luego:

$$Z_{eq-D} = \frac{(0.11+j0.11) + \sqrt{(0.11+j0.11)^2 + 4 \cdot (0.11+j0.11) \cdot (0+25)}}{2} \quad (247)$$

$$Z_{eq-D} = 1.8775 + j 0.8111 \Omega \quad (248)$$

Donde:

Z_{eq-T} : Impedancia equivalente en la línea de transmisión en (Ω).

Z_{eq-D} : Impedancia equivalente en la línea de distribución en (Ω).

Finalmente hallamos el factor de divisor de corriente en modulo:

$$S_{f2} = \left| \frac{1}{\left[\frac{1}{0.1062 - j 3.8273} + \frac{1}{0.6983 - j 1.8764} \right] \times \left[\frac{1}{\frac{1}{0.1062 - j 3.8273} + \frac{1}{0.6983 - j 1.8764}} + R_g \right]} \right| \quad (249)$$

$$S_{f2} = 0.3644 \quad (250)$$

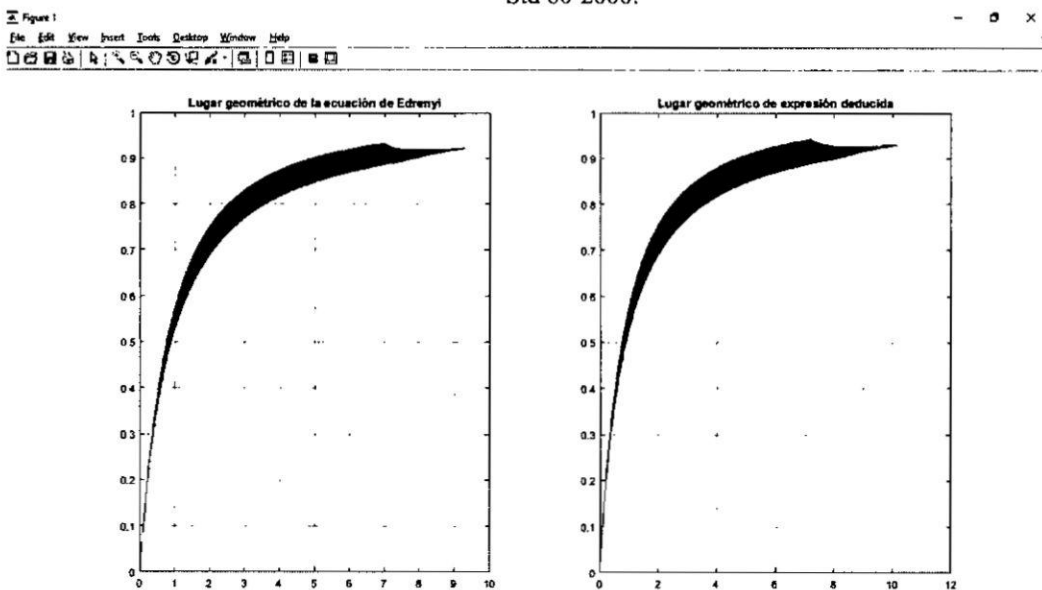
Ahora si comparamos ambos valores S_{f2} y S_{f1} , estos valores están muy cercanos y difieren en un 0.0011, también podemos mencionar que el valor más conservador es (S_{f2}) debido a que se inyectan más corriente de falla en la malla con ello aseguramos el diseño.

Para comprobar el universo de valores que puede tomar la expresión (108) y verificar la proximidad del factor divisor (S_f) con la expresión (209) propuesta por la IEEE Std 80-2000, se calculó el lugar geométrico de ambas expresiones por medio del programa MatLab; con las siguientes condiciones se evaluó diferentes casos de estudio (posibles escenarios):

Caso 1: Para una malla con baja resistencia de puesta a tierra y baja resistencia de puesta a tierra en las torres

$$R_g: 0.9 \Omega \text{ y } R_T: 5 \Omega$$

Gráfico N°14: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.



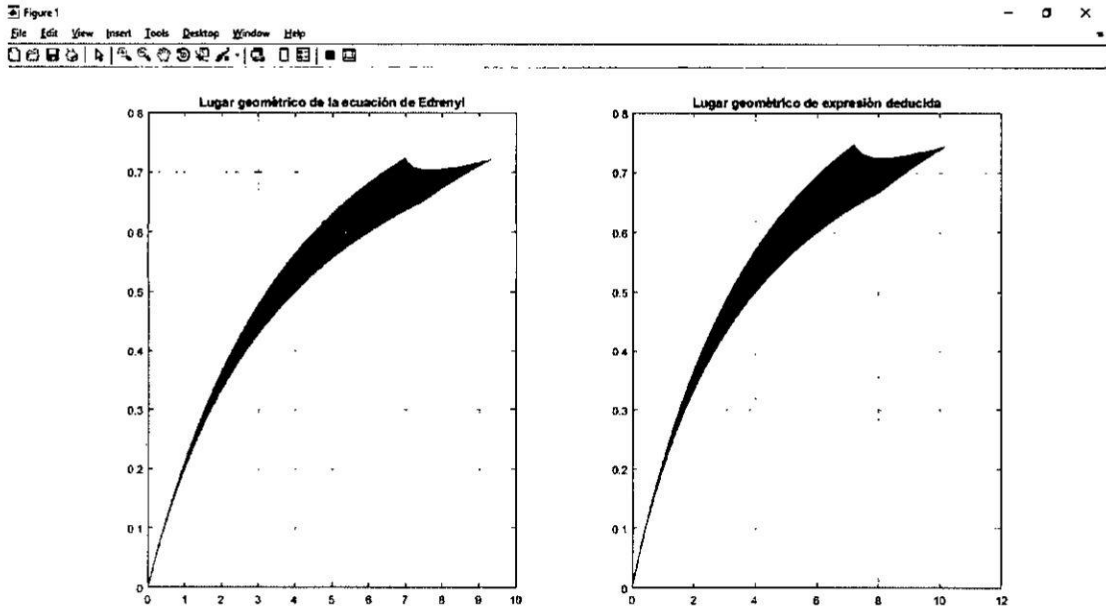
Fuente: Propia

La gráfica de color rojo señala el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente (eje Y) utilizando la ecuación (108) (véase página N° 80) de igual manera el gráfico de color verde representa el universo de valores que puede tomar el factor de divisor de corriente hallado con el método de Edrenyi recomendado por la IEEE Std 80-2000. El eje X representa a todos los valores posibles de impedancia equivalente de los cables guarda en módulo.

Caso 2: Para una malla con alta resistencia de puesta a tierra y baja resistencia de puesta a tierra en las torres.

$$R_g: 4 \Omega \text{ y } R_T: 5 \Omega$$

Gráfico N°15: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.



Fuente: Propia

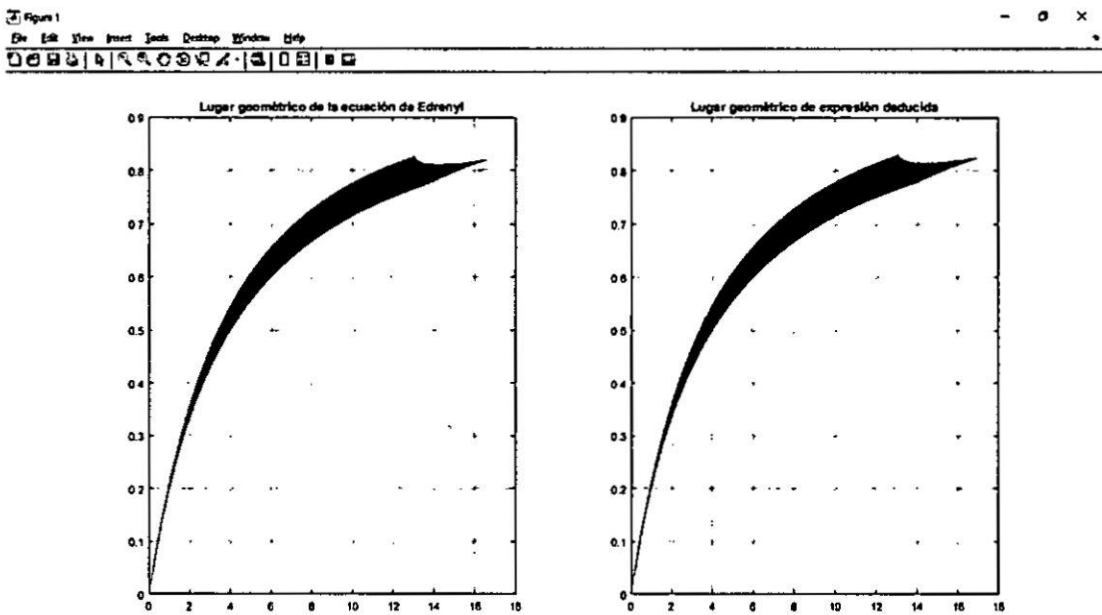
La gráfica de color rojo señala el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente (eje Y) de igual manera el gráfico de color verde representa el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente hallado con el método de Edrenyi recomendado por la IEEE Std 80-2000. El eje X representa

a todos los valores posibles de impedancia equivalente de los cables guarda en módulo.

Caso 3: Para una malla con alta resistencia de puesta a tierra y alta resistencia de puesta a tierra en las torres.

$$R_g: 4 \Omega \text{ y } R_T: 25 \Omega$$

Gráfico N°16: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.



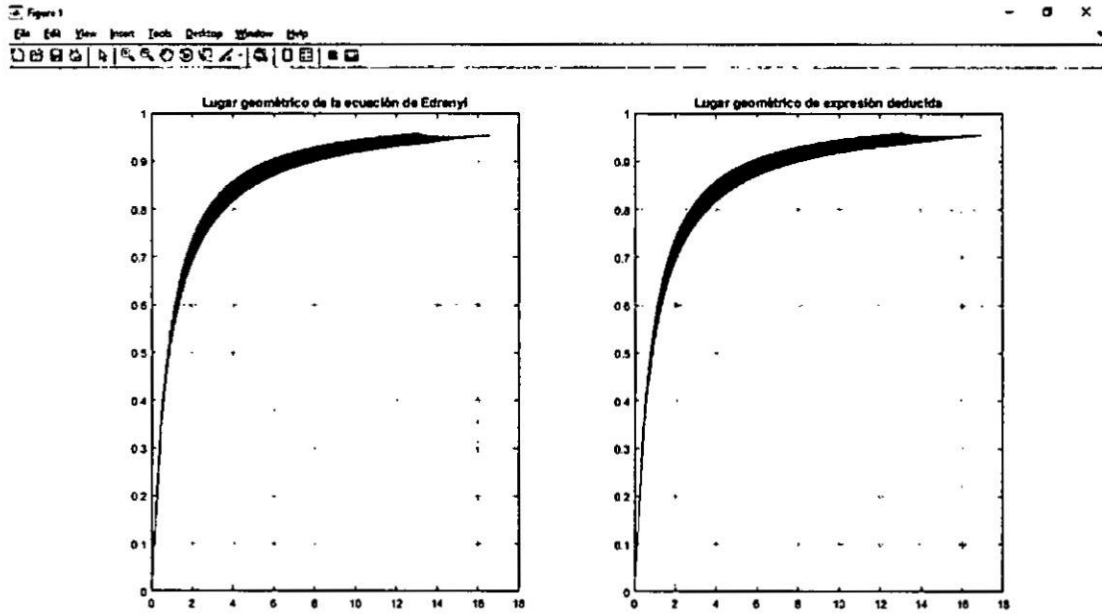
Fuente: Propia.

La gráfica de color rojo señala el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente (eje Y) utilizando la expresión (108), de igual manera el gráfico de color verde representa el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente hallado con el método de Edrenyi recomendado por la IEEE Std 80-2000. El eje X representa todos los valores posibles de impedancia equivalente de los cables guarda en módulo.

Caso 4: Para una malla con alta resistencia de puesta a tierra y alta resistencia de puesta a tierra en las torres.

$R_T: 25 \Omega$ y $R_g: 0.9 \Omega$

Gráfico N°17: Lugar geométrico de todos los valores de S_f , el propuesto y el recomendado por la IEEE Std 80-2000.



Fuente: Propia.

La gráfica de color rojo señala el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente (eje Y) utilizando la expresión (108) de igual manera el gráfico de color verde representa el universo de valores que puede tomar el factor divisor de corriente hallado con el método de Edrenyi recomendado por la IEEE Std 80-2000. El eje X representa todos los valores posibles de impedancia equivalente de los cables guarda en módulo.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES.

Se concluye que:

- Existe un sistema en secuencia cero en la red de cable de guarda de transmisión y distribución con mallas locales y remotas con una o varias fuentes generadoras con inductancias, capacitancias y resistencias.
- La expresión general para la impedancia equivalente total del sistema de cable de guarda en una línea de transmisión o distribución deducida en esta investigación es una aproximación confiable para determinar el circuito equivalente del cable de guarda y con ello el factor de divisor de corriente.
- Es posible disminuir la resistencia de puesta a tierra de las torres de alta tensión aumentando contrapesos y este método no es costoso debido a que se usa cables de tipo cooperwell a una profundidad de enterramiento de 0.5m envuelto en tierra natural cernida.

- Para mallas a tierra en subestaciones de potencia con resistividades menores a $200 \Omega - m$, los valores de resistencias de malla obtenidas antes de la puesta en servicio resultaron ser menores a lo proyectado (véase protocolos de malla en anexos), ello se debe tener consideración en la etapa de ingeniería, ya que no siempre el escenario más crítico de diseño es cuando la resistencia es mayor a 2Ω . Esto trae como consecuencia que la corriente de falla en la etapa de operación sea mayor a la corriente en la etapa de ingeniería.
- Ante una falla a tierra en cualquier punto de la subestación, la corriente que se distribuye por los cables de guarda va disminuyendo su valor conforme se va alejando de la subestación.
- La optimización realizada es aplicable para todo tipo de sistema de cables de guarda, esto se comprueba con el lugar geométrico hallado mediante el programa MatLab, respecto a la expresión general (Método de Edrenyi) dado por la IEEE Std 80-2000.
- El costo con diseño optimizado es menor que el costo con diseño tradicional.
- El factor de divisor de corriente ($S_f = 0.5365$) del diseño optimizado resulta ser menor al factor de divisor de corriente ($S_f = 0.644$) del diseño tradicional.

CAPITULO VIII

RECOMENDACIONES.

Se recomienda:

- Utilizar tierra de cultivo cernida y apisonada con el fin de disminuir la resistencia de puesta a tierra, asimismo el aumento de contrapesos también cumple el mismo objetivo de disminución.
- Utilizar aditivos tales como: sal higroscópica y bentonita para disminuir las resistencias de puesta a tierra de las estructuras de soporte de las líneas de transmisión y distribución.
- Utilizar bajadas de cable de aterramiento en estructuras metálicas que soportan líneas aéreas energizadas para evitar esfuerzos mecánicos debido a corrientes de cortocircuitos.

- Extender los contrapesos hacia áreas cercanas donde existan terrenos sueltos (arenosos, pedregosos, arcillosos, etc.) en caso que las estructuras de torres estén instaladas en suelos rocosos
- Considerar técnicas o estudios desarrollados en Perú, ya que al utilizar las normas internacionales IEEE Std 80-2000 estas dictaminan estudios desarrollados en forma general, debido a que cada país tiene una geografía diferente.

CAPITULO IX

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. IEEE Std. 80-2000 **Guide for Safety in AC Substation Grounding.**
2. IEEE Std. 81-2000 **Guide for Measuring Earth Resistivity. Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground Systems.**
3. IEEE - Guía para la Seguridad de puesta a tierra en Subestaciones de C.A.
4. Código Nacional de Electricidad (CNE) - Suministro 2011 **MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS 2011 www.minem.gob.pe**
5. YANQUE JUSTO. **Sistemas de puesta a tierra.** Perú.2011.
6. ECHEVERRIA PECHE, ERASMO AMADOR **TESIS DE MAESTRIA: Modelado y análisis de la respuesta transitoria de puestas a tierra no extensas**
7. MEJÍA VILLEGAS S.A **Subestaciones de Alta y extra- Alta tensión** (Segunda edición).
8. JOSE LUIS TORA GALVAN **Transporte de la energía eléctrica: Líneas aéreas a M.A.T. y C.A.**
9. B. M. WEEDY **Sistemas Eléctricos de gran Potencia - Alta tensión**
10. MARTIN JOSE RAULL **Diseño de subestaciones eléctricas.**
11. ORTIZ, LEON JAIME **Puestas a tierra de líneas de transmisión, boletín N°5.**
12. RAMÍREZ CASTAÑO, SAMUEL **Protección de Sistemas Eléctricos.**

- 13. CARDONA, LEONARDO .C. Modelación de redes de transmisión de energía eléctrica.**
- 14. Dr. MUKHEDKAR DINKAR, La ciencia de puestas a tierra de sistemas de energía. Edición 1978.**
- 15. Directiva N° 011 para la presentación del proyecto de tesis e informe de tesis para la titulación profesional de los estudiantes de pregrado en la Universidad Nacional del Callao.**
 - a. (Aprobado con resolución n° 759-2013-r del 21 de agosto del 2013)

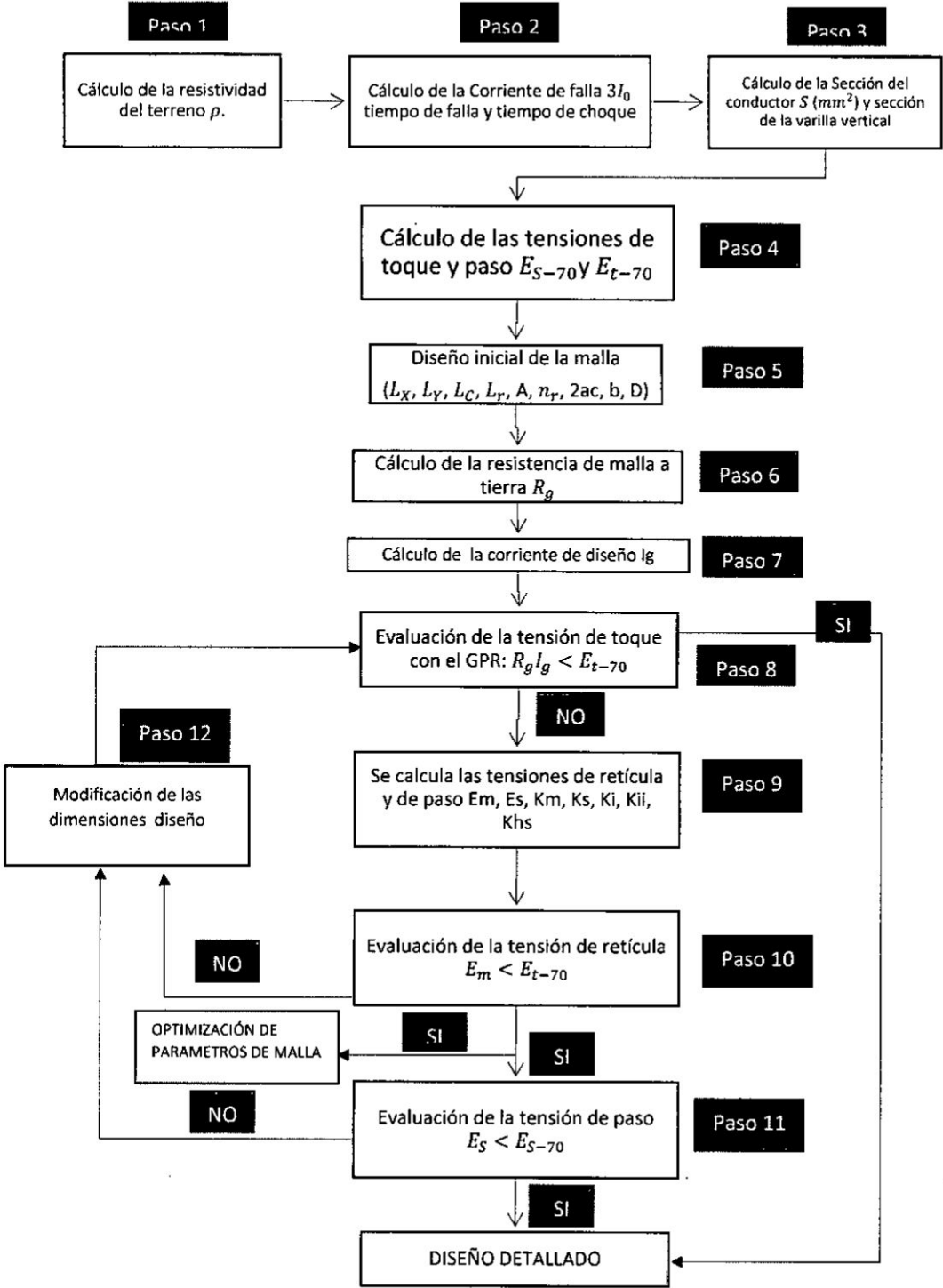
ANEXOS

ANEXO N° 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MALLA A TIERRA SEGÚN IEEE- Std 80-2000, UTILIZANDO LOS CABLES DE GUARDA EN SUBESTACIÓN MILPO.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	METODOLOGÍA TIPO	POBLACIÓN												
<p>¿Cómo obtener una expresión analítica que permita optimizar el diseño de la malla a tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV; según el procedimiento de la IEEE Std-80/81-2000?</p>	<p>Encontrar una expresión analítica que permita disminuir el efecto de las impedancias de los cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución, impedancias y resistencias de puestas a tierra de las torres de transmisión y distribución; tal que el factor divisor de corriente sea el más óptimo para el diseño de la malla a tierra de la SSEE Milpo 138/50/10kV.</p>	<p>Existe una red de secuencia cero que conecta; las mallas a tierra locales y remotas, los cables de guarda de las líneas de transmisión y distribución, los neutros de los transformadores y las líneas de transmisión; donde las impedancias de los cables de guarda forman un circuito en paralelo con la resistencia de la malla a tierra; deduciéndose así una expresión analítica de la impedancia equivalente de los cables de guarda y la malla a tierra, que permita determinar el factor de divisor de corriente más óptimo para el diseño de la SSEE Milpo 138/50/10kV.</p>	<p>El tipo de investigación es aplicada. Debido a que utilizaremos teorías de cálculo y normas de diseño. Agregando un método opcional para realizar la optimización de un diseño ya establecido.</p>	<p>Nuestra población son los valores de resistencias del terreno que se midieron en campo, son 40 valores numéricos en total y serán la base donde partirá el diseño de la malla a tierra según la IEEE Std-80/81-2000.</p>												
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	MÉTODO	MUESTRA												
<p>a. ¿Cómo se determinaría la impedancia equivalente de los cables guarda, en el cálculo del factor divisor de corriente, teniendo en consideración las diferentes impedancias que componen la línea de transmisión y distribución; cuando ocurre una falla a tierra en la SSEE Milpo 138/50/10kV? b. ¿Cómo interviene el factor divisor de corriente en la distribución de la corriente de falla a tierra por la malla a tierra y los cables de guarda; cuando descarga una falla a tierra en la barra de alta o media tensión de la SSEE Milpo 138/50/10kV? c. ¿Cuál sería el caso más desfavorable de la resistencia de la malla a tierra cuando la malla entra en la etapa de operación? d. ¿Qué tipos de falla existen en una subestación de potencia de alta tensión con conexiones de neutros a tierra?</p>	<p>a. Determinar una expresión analítica para el cálculo de la impedancia equivalente de todos los elementos que involucran el cable de guarda a través del trayecto de la línea y relacionarla con el factor de divisor de corriente para obtener la corriente de diseño de la malla. b. Determinar qué impedancias pueden reducir el factor divisor de corriente optimizando las impedancias en las torres y las puestas a tierra de las torres con métodos reconocidos en libros y experiencias personales en obra. c. Determinar el valor de resistencia de malla a tierra más desfavorable para un diseño que vaya de acuerdo a la etapa de operación. d. Determinar qué tipo de falla produce la corriente máxima de cortocircuito y donde se ubican en el diagrama unifilar de la SSEE Milpo 138/50/10kV.</p>	<p>a. Para el cálculo del factor de divisor de corriente, evaluando el método de Endrenyi, utilizado en la IEEE Std 80-2000, con la expresión analítica propuesta, se tiene que dicho valor es ligeramente mayor al método de Endrenyi, el cual comparado con otros resultados nos da un porcentaje de error mínimo. b. La optimización de las puestas a tierra de las torres de transmisión y distribución se logra adicionando contrapesos esto logra disminuir el factor divisor de corriente y con ello se disminuye la corriente de diseño de la SSEE Milpo 138/50/10kV. c. Debido a la gran cantidad de conductores de cobre utilizado, se tiende a tener resistencias menores, a lo proyectado incluso menores a 1Ω, por lo que el caso más desfavorable cuando la resistencia sea menor a la impedancia de los cables de guarda. d. En la SSEE Milpo 138/50/10kV; la máxima corriente de falla se da en el lado de media tensión, debido a la relación de transformación del transformador de potencia. Mediante el software Digsilent "Power Factor System" Version 15.1; se puede determinar el tipo de falla que entrega la corriente máxima de cortocircuito.</p>	<p>El tipo de método de la investigación es descriptivo. Diseño de la investigación: El diseño de la investigación es secuencial y correlativo. las etapas son: 1 Recolección de datos de campo. 2 Análisis de datos mediante normas IEEE y software computacionales 3 Análisis de la hipótesis. 4 Análisis de los resultados.</p>	<p>Los datos de campo para el diseño de la malla son las resistencias, y se medirán según recuadro</p> <table border="1" data-bbox="1805 750 2087 1136"> <thead> <tr> <th data-bbox="1805 750 1944 810">Distancia (m)</th> <th data-bbox="1944 750 2087 810">Resistividad (Ω-m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="1805 810 1944 869">0.5</td> <td data-bbox="1944 810 2087 869">90.5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1805 869 1944 928">1</td> <td data-bbox="1944 869 2087 928">51.49</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1805 928 1944 988">2</td> <td data-bbox="1944 928 2087 988">117.39</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1805 988 1944 1047">4</td> <td data-bbox="1944 988 2087 1047">53.29</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1805 1047 1944 1107">8</td> <td data-bbox="1944 1047 2087 1107">404.699</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia (m)	Resistividad (Ω-m)	0.5	90.5	1	51.49	2	117.39	4	53.29	8	404.699
Distancia (m)	Resistividad (Ω-m)															
0.5	90.5															
1	51.49															
2	117.39															
4	53.29															
8	404.699															

TÍTULO:
OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MALLA A TIERRA SEGÚN IEEE -Std 80 2000, UTILIZANDO LOS CABLES DE GUARDA EN SUBESTACIÓN MILPO



**ANEXO N° 3: PROTOCOLOS DE PRUEBA DE MALLA A TIERRA
DE LA SUBESTACIÓN MILPO**

MALLA DE PUESTA A TIERRA

UBICACIÓN : S.E. MILPO
PROPIETARIO : MAPERU SAC

FECHA: 12-6-16

1. CARACTERÍSTICAS

1.1. MALLA DE PUESTA A TIERRA

Resistividad del Terreno (Ω-m)	: 147 / 597.96 / 189.78 Ωm-m	Aplicación del SPT	: Malla de Puesta a Tierra
Composición del Terreno	: Q3 Capes	Configuración	: Cuadrículas con soldadura exotérmica y varillas en las esquinas
Tipo de conductor	: Cobre	Fecha de la última Mto	: N.A
Sección del conductor	: 120mm ²		

2. MEDICIÓN

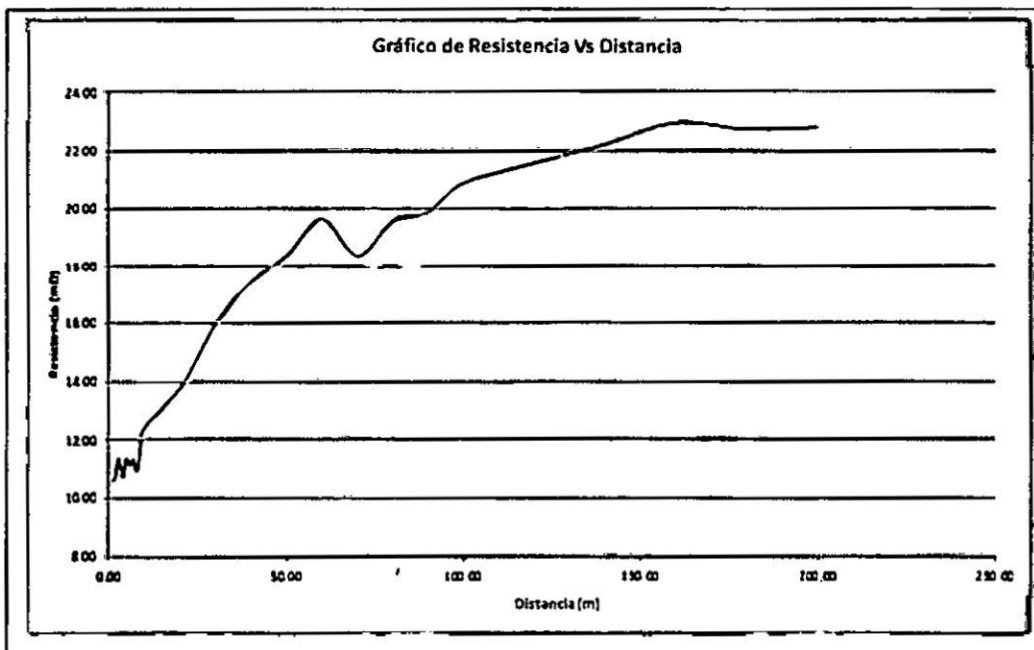
2.1. RESISTENCIA

a) Resultado de las pruebas

Temperatura: 12°C Humedad: 45% Fecha y Hora: 12/06/2016

Distancia (m)	Resistencia (mΩ)
1.00	10.58
2.00	10.74
3.00	11.40
4.00	10.71
5.00	11.37
6.00	11.13
7.00	11.35
8.00	10.83
9.00	11.75
10.00	12.42
20.00	13.78
30.00	15.95
40.00	17.42
50.00	18.39
60.00	18.89
70.00	18.38
80.00	19.62
90.00	19.89
100.00	20.80
120.00	21.87
140.00	22.20
160.00	22.85
180.00	22.73
200.00	22.79

2.2.- CURVA DE RESISTENCIA



RESULTADO: ACEPTABLE

b) Equipos de prueba utilizados

Equipo de pruebas primarias

Marca : OMICRON
Modelo : CPC-100
Serie : CH78SX

* Equipo de medición de parámetros eléctricos

Marca : OMICRON
Modelo : CP-CU1
Serie : EL252J

MALLA DE PUESTA A TIERRA

UBICACIÓN : S. E. MILPO
 PROPIETARIO : MAPERU SAC
 FECHA: 12-6-16

2.3.- COMENTARIOS

Del Gráfico Anexo se concluye que la resistencia de Puesta a Tierra tiene el valor de 22.73mΩ, dado que es la zona donde los valores de resistencia no varían con la distancia





2.4.- NORMA REFERIDA

IEEE-80-2000-Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE-1100
 IEEE-1100-2005 - IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment

3. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Se concluye que el valor de Resistencia de Puesta a Tierra es de 22.73mΩ

Cabe anotar que la medición se realizó con las colas de puesta a tierra conectadas a los equipos, dado que esa fue la condición en que se encontró la subestación

EJECUTADOR POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
 Nombre : Merca Moreno Oscanos Fecha : 08 de Julio de 2016 Firma : 	 Nombre : Juan Alegre Ojiva Fecha : 08 de Julio de 2016 Firma : 	 Nombre : Fecha : Firma :

TOQUE Y PASO

UBICACIÓN : S.E. MILPO
 PROPIETARIO : MAPERU SAC

FECHA: 12-6-16

1.- CARACTERISTICAS

1.1.MALLA A TIERRA

Corriente de Falla (kA) : 5.6	Resistividad Grava ($\Omega\cdot m$) : 3000
Tiempo de Duracion de Falla(s) : 0.5seg	Espesor de Grava(m) : 0.15
Largo de la Malla(m) : 62	Resistencia del Pozo a : 5
Ancho de la Malla (m) : 32	Tipo de la Malla :
Peso de una Persona(Kg) : 70	Tipo de conductor : Cobre

2.- MEDICION

2.1 TOQUE Y PASO

a) Resultado de las pruebas

Temperatura: 12°C Humedad: 40% Fecha y Hor: 12/06/2016

Corriente de Prueba (A)	40
Tensión de Toque Máximo (V)	136.01
Tensión de Paso Máximo (V)	88.94

LUGARES MEDIDOS

N°	Lugar	VP (V)	VT (V)	Observaciones
1	Transformador de Potencia	21.01	6.30	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
2	Pararrayos del lado de la L.T. de 138kV	136.01	88.94	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
3	Cerco Perimétrico 1 (Aledaño a la salida de la L.T. de 138kV)	14.01	9.05	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
4	Puerta Peatonal de Ingreso a la Subestación	4.06	2.10	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
5	Cerco Perimétrico 1 (Aledaño a la salida de la L.T. de 50kV)	28.32	5.43	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
6	Primera Torre de la L.T. de 50kV Doble Torno	7.98	4.88	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
7	Salida de la L.T. 50kV	8.68	1.26	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
8	Transformador de Servicios Auxiliares	9.10	3.07	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
9	Puerta de Ingreso a la GIS	15.79	5.99	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
10	Pararrayos a la salida de la Barra	35.17	6.04	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido
11	Cerco Perimétrico de lado del almacén de Delcrosa	37.79	5.67	Cumple, Valores Menores a lo maximos Permitido

RESULTADO: ACEPTABLE

b) Equipos de prueba utilizados

Equipo de pruebas primarias	* Equipo de medición de parametros eléctricos
Marca : OMICRON	Marca : OMICRON
Modelo : CPC-100	Modelo : CP-CU1
Serie : QH789X	Serie : EL252J

TOQUE Y PASO

UBICACIÓN : S.E. MILPO
PROPIETARIO : MAPERU SAC

FECHA: 12-6-16

2.3 COMENTARIOS

Los valores medidos estan por debajo de las tensiones máximas permitidas

2.4 NORMA REFERIDA

IEEE-80-2000-Guide For Safety in AC Substation Grounding
IEEE-1100-Recommended Practice for Power and Grounding Electronic Equipment
IEC-61024-1 TABLA 5.4-Protection of Structures Against Lightning

3. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Los datos de corriente y tiempo de falla se extrajeron del estudio realizado.

De acuerdo a la norma IEEE-80-2000 y considerando los siguiente parámetros:

Peso máximo de una persona = 70Kg

Tiempo máxima de falla = 0.5s

Capa de cascajo = 3000Ohm - m y 1.5m de altura

Las tensión de paso máxima sería: 3049.1V

La tensión de toque máximo sería: 928V

EJECUTADOR POR:

REVISADO POR:

APROBADO POR:

T&D ELECTRIC
Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica

T&D ELECTRIC
Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica

DEL ROSA III
ENERGÍA PARA EL PERÚ

Nombre : Marco Moreno O.

Nombre : Juan Alegre O

Nombre :

Fecha : 8-Jul.-16

Fecha : 08-07-16

Fecha :

Firma :

Firma :

Firma :

**ANEXO N° 4 VALORIZACIÓN DE MALLA A TIERRA TRADICIONAL
Y OPTIMIZADO**

SSEE MILPO 138/50/10kV

Malla con diseño tradicional, factor de divisor de corriente (Sf = 0.6447) y lado de una rejilla cuadrada (D= 4m)

EQUIPOS Y MATERIALES MENORES

Tipo de Cambio:

ITEM	DESCRIPCION	METRADO		COSTOS		COSTO TOTAL (US \$)
		UND	CANT	UNITARIO (US \$)	PARCIAL (US \$)	
1.0.0	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA					50,053.09
	MATERIALES					
1.0.1	Cable de Cu desnudo 120 mm2, red de tierra profunda	m	1,069	15.00	16,035.00	
1.0.2	Cable de Cu desnudo 70 mm2, red de tierra superficial por canaleta	m	300	6.49	1,947.00	
1.0.3	Cable de Cu desnudo 70 mm2, red de tierra superficial	m	500	6.49	3,245.00	
1.0.4	Varilla Coperweld 5/8" Ø, 2.5 m	Und.	24	10.41	249.84	
1.0.5	Cable de Cu desnudo 70 mm2, red de tierra superficial en estructura soporte, incluye pintado de conductor.	m	200.00	2.13	426.00	
1.0.6						
1.0.7	Conexión en "X" con soldadura exotérmica para dos cables de Cu de 120 mm2, 200g	Und.	153	7.81	1,194.93	
1.0.8	Conexión en "T" con soldadura exotérmica para cable de Cu de 120 mm2 pasante y cable de Cu 120 mm2, 150g	Und.	52	16.50	858.00	
1.0.9	Conexión en "T" con soldadura exotérmica para cable de Cu de 120 mm2 pasante y cable de Cu 70 mm2, 90g	Und.	150	16.50	2,475.00	
1.0.10	Conexión tipo "X" con soldadura exotérmica, para cable de cobre de 70 mm2 pasante a varilla de copperweld de Ø16 mm, 200g	Und.	24	16.50	396.00	
1.0.11	Conector tipo uña para sujetar conductor de cobre desnudo de 70 mm2 a estructura soporte	Und.	100.00	16.50	1,650.00	
1.0.12	Conector tipo paralelo para sujetar conductor de cobre desnudo de 70 mm2 a estructura de soporte.	Und.	60.00	16.50	990.00	
1.0.13	Terminal a compresión tipo ojo con agujero de Ø12 mm para conductor de cobre desnudo de 70 mm2	Und.	6.00	3.32	19.92	
1.0.14	Grapa de conexión de conductor de Cu de 70mm2 a varilla de coperweld 5/8"Ø, 2.5 m	Und.	16.00	4.40	70.40	
1.0.15	Instalación de Pozo de tierra tipo PT1, incluye instalación de de varilla Coperweld 5/8" Ø, 2.5 m, soldadura exotérmica, excavación, relleno, compactación y eliminación de desmonte	Und.	24.00	313.60	7,526.40	
1.0.16	Instalación de Pozo de tierra tipo PT2, incluye instalación de de varilla Coperweld 5/8" Ø, 2.5 m, soldadura exotérmica, suministro de caja de registro, excavación, relleno, compactación y eliminación de desmonte	Und.	19.00	358.40	6,809.60	
1.0.17	Conexiones diversas con soldadura exotérmica; incluye suministro de moldes en diversos tamaños	Und.	250.00	24.64	6,160.00	
2.0.0	MANO DE OBRA					35,819.00
2.0.1	Excavacion de Zanja h= 1.1 m e= 0.5m	ml	1,069.00	16.16	17,280.00	
2.0.2	Operario para soldadura de exotermica	glb	379.00	10.00	3,790.00	
2.0.3	Tierra de cultivo para relleno de malla horizontal	m3	106.90	10.00	1,069.00	
2.0.4	Tierra de cultivo para pozos con registro y sin registro	m3	1,368.00	10.00	13,680.00	
	TOTAL COSTO DIRECTO					85,872.09

SSEE MILPO 138/50/10kV

Malla con diseño optimizado, factor de divisor de corriente ($Sf = 0.5365$) y lado de una rejilla cuadrada ($D= 5m$)

EQUIPOS Y MATERIALES MENORES

Tipo de Cambio:

ITEM	DESCRIPCIÓN	METRADO		COSTOS		COSTO TOTAL (US \$)
		UND	CANT	UNITARIO (US \$)	PARCIAL (US \$)	
1.0.0	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA					46,412.76
	MATERIALES					
1.0.1	Cable de Cu desnudo 120 mm2, red de tierra profunda	m	870	15.00	13,050.00	
1.0.2	Cable de Cu desnudo 70 mm2, red de tierra superficial por canaleta	m	300	6.49	1,947.00	
1.0.3	Cable de Cu desnudo 70 mm2, red de tierra superficial	m	500	6.49	3,245.00	
1.0.4	Varilla Coperweld 5/8" Ø, 2.5 m	Und.	20	10.41	208.20	
1.0.5	Cable de Cu desnudo 70 mm2, red de tierra superficial en estructura soporte, incluye pintado de conductor.	m	200.00	2.13	426.00	
1.0.6	Conexión en "X" con soldadura exotérmica para dos cables de Cu de 120 mm2, 200g	Und.	104	7.81	812.24	
1.0.7	Conexión en "T" con soldadura exotérmica para cable de Cu de 120 mm2 pasante y cable de Cu 120 mm2, 150g	Und.	42	16.50	693.00	
1.0.8	Conexión en "T" con soldadura exotérmica para cable de Cu de 120 mm2 pasante y cable de Cu 70 mm2, 90g	Und.	150	16.50	2,475.00	
1.0.9	Conexión tipo "X" con soldadura exotermica, para cable de cobre de 70 mm2 pasante a varilla de copperweld de Ø16 mm, 200g	Und.	20	16.50	330.00	
1.0.10	Conector tipo uña para sujetar conductor de cobre desnudo de 70 mm2 a estructura soporte	Und.	100.00	16.50	1,650.00	
1.0.11	Conector tipo paralelo para sujetar conductor de cobre desnudo de 70 mm2 a estructura de soporte.	Und.	60.00	16.50	990.00	
1.0.12	Terminal a compresión tipo ojo con agujero de Ø12 mm para conductor de cobre desnudo de 70 mm2	Und.	6.00	3.32	19.92	
1.0.13	Grapa de conexión de conductor de Cu de 70mm2 a varilla de copperweld 5/8"Ø, 2.5 m	Und.	16.00	4.40	70.40	
1.0.14	Instalación de Pozo de tierra tipo PT1, incluye instalación de de varilla Coperweld 5/8" Ø, 2.5 m, soldadura exotérmica, excavación, rrelleno, compactación y eliminación de desmonte	Und.	24.00	313.60	7,526.40	
1.0.15	Instalación de Pozo de tierra tipo PT2, incluye instalación de de varilla Coperweld 5/8" Ø, 2.5 m, soldadura exotérmica, suministro de caja de registro, excavación, relleno, compactación y eliminación de desmonte	Und.	19.00	358.40	6,809.60	
1.0.16	Conexiones diversas con soldadura exotérmica; incluye suministro de moldes en diversos tamaños	Und.	250.00	24.64	6,160.00	
2.0.1	MANO DE OBRA					34,022.00
2.0.2	Excavacion de Zanja h= 1.1 m; espesor= 0.5m	m	870.00	15.89	13,824.00	
2.0.3	Operario para soldadura de exotermica	glb	316.00	10.00	3,160.00	
2.0.4	Tierra de cultivo para relleno de malla horizontal	m3	87.00	10.00	870.00	
2.0.5	Tierra de cultivo para pozos con registro y sin registro	m3	1,368.00	10.00	13,680.00	
3.0.1	CONTRAPESOS EN LINEA DE TRANSMISION					
3.0.2	Cable copperwell de 7 x10 AWG para 10 torres de transmision.	m	200.00	2.00	400.00	
3.0.3	Personal ayudante para excavacion e instalacion de contrapesos.	dias	10.00	80.00	800.00	
3.0.4	Grapasde doble via para fijar cable copperwel.	Und	10.00	4.40	44.00	
4.0.1	CONTRAPESOS EN LINEA DE DISTRIBUCION					
4.0.2	Cable copperwell de 7 x10 AWG para 10 torres de distribucion.	m	200.00	2.00	400.00	
4.0.3	Personal ayudante para excavacion e instalacion de contrapesos.	dias	10.00	80.00	800.00	
4.0.4	Grapasde doble via para fijar cable copperwel	Und	10.00	4.40	44.00	
	TOTAL COSTO DIRECTO					80,434.76

**ANEXO N° 5 LUGAR GEOMÉTRICO DEL FACTOR DE DIVISOR DE
CORRIENTE CORRIENTE MEDIANTE "MATLAB"**

LENGUAJE COMPUTACIONAL QUE DETERMINA EL LUGAR GEOMÉTRICO DEL FACTOR DE DIVISOR DE CORRIENTE.

```
d=[0:0.01:5];
a=length(d);
RT=25;
Rg=0.9;
e= repmat(d,a,1);
f=e'.*((-1).^0.5);
h=f+e;
i=h.^2;
j=h.*(4*(RT));
k=i+(j);
l=k.^0.5;
x=l.*(1);
m=h;
n=(m+x).*0.5;
r=real(n).^2;
s=imag(n).^2;
t2=(r+s).^0.5;
o=repmat(Rg,a,a);
u=n./(o+n);
```

```

r2=real(u).^2;
s2=imag(u).^2;
u2=(r2+s2).^0.5;
'operando con el metodo usado por IEEE';
j1=h.*(RT);
l1=j1.^0.5;
m1=h.*(0.5);
n1=(m1+(l1));
r1=real(n1).^2;
s1=imag(n1).^2;
t1=(r1+s1).^0.5;
o1=repmat(Rg,a,a);
u1=n1./(o1+n1);
r3=real(u1).^2;
s3=imag(u1).^2;
u3=(r3+s3).^0.5;
subplot(1,2,1),plot(t1,u3,'g'),title('Lugar geométrico de la
ecuación de Edrenyi');
grid
subplot(1,2,2),plot(t2,u2,'r'),title('Lugar geométrico de expresión
deducida');

```