ANEXOS 2

ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE INSTALACIONES COMUNES 2019: ESTADO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA

Gerencia de Planificación de la Transmisión

Departamento de Integridad del Sistema

Noviembre de 2019

Código 1911-DIS-EDIC-AnxITE-02-V1

CONTROL DEL DOCUMENTO

APROBADO POR

Versión	Aprobado por	Cargo
1	Juan Carlos Araneda T.	Gerente de Planificación de la Transmisión

REVISADO POR

Versión	Revisado por	Cargo
1	Erick Zbinden A.	Jefe Departamento de Integridad del Sistema

REALIZADO POR

Versión	Realizado por	Cargo
1 A	Miguel Monasterio A.	Líder de Proyecto. Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Carla Hernández O'.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Felipe Neira M.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Nicolás Cáceres G.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Patricio Lagos R.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema

REGISTRO DE CAMBIOS

Fecha	Autor	Versión	Descripción del Cambio
28-11-2019	Departamento de Integridad del Sistema	A	Aprobado para publicación
18-11-2019	Departamento de Integridad del Sistema	A	Confección del documento

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

CONTENIDO

1	**INDICE DE ILUSTRACIONES**	**4**
2	**ÍNDICE DE TABLAS**	**5**
3	**ABREVIATURAS**	**6**
4	**METODOLOGÍA DE TRABAJO**	**7**
4.1	ETAPA 1. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO	7
4.2	ETAPA 2. INFORMACIÓN TÉCNICA.	7
4.3	ETAPA 3. DEFINICIÓN DE CRITERIOS.	7
4.4	ETAPA 4. DIAGNÓSTICO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.	8
4.5	ETAPA 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	8
5	**DESARROLLO DEL ESTUDIO**	**9**
5.1	DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO	9
5.2	DEFINICIÓN DE CRITERIOS	9
6	**MEMORIA DE CÁLCULO**	**14**
6.1	CÁLCULO DE RESISTENCIA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA	14
6.2	CÁLCULO DEL FACTOR DE DIVISIÓN DE CORRIENTE A TIERRA (Sf)	16
6.3	CÁLCULO DE TENSIONES DE PASO (Tp) Y DE CONTACTO (Tc)	21
6.4	CÁLCULO DE SECCIÓN ADMISIBLE	22
7	**REFERENCIAS**	**24**

1 INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Reticulado genérico con información para modelación de las MPT 14
Ilustración 2: Estratificación genérica con información para modelación del tipo de suelo 15
Ilustración 3: Esquema simplificado con información para modelación de las MPT 22

2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información técnica para modelación de las MPT 15
Tabla 2: Información técnica para modelación de tipos de suelo 16
Tabla 3: Valores máximos de cortocircuitos en cada subestación bajo análisis 18
Tabla 4: Información técnica para modelación de líneas de transmisión con cables de guardia 20

3 ABREVIATURAS

AWG : Calibre de alambre estadounidense (del inglés: *American Wire Gauge).*

BD : Base de Datos.

EDIC : Estudio de Instalaciones Comunes.

FIT : Formulario de Información Técnica.

GPR : Aumento de Potencial de Tierra (del inglés: *Ground Potential Rise*)

IEEE : Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos (del inglés: *Institute of Electrical and Electronic Engineers*).

MEF : Método de Elementos Finitos

MPT : Malla de Puesta a Tierra

N/A : No Aplica

S/E, SS/EE : Subestación, Subestaciones

SEN : Sistema Eléctrico Nacional.

S_f : Factor de división de corriente a tierra.

T_p : Tensión de Paso, diferencia de potencial que experimenta una persona con una separación de un (1) metro entre sus pies, sin tocar ningún objeto conectado a tierra

T_c : Tensión de Contacto, diferencia de potencial que experimenta una persona a través de su cuerpo, si se encuentra tocando una estructura metálica al ocurrir una falla

UTM : Sistema de coordenadas geográficas UTM (del inglés: *Universal Transverse Mercator*)

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 ETAPA 1. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO

En esta etapa se definen dos (2) escenarios de estudio correspondientes a la condición actual (año 2019) y futura (año 2024) de la instalación, los que buscan determinar el impacto que tendrá el aumento de los niveles de cortocircuito sobre las MPT de interés.

4.2 ETAPA 2. INFORMACIÓN TÉCNICA.

Para recabar la información técnica necesaria para desarrollar los estudios se genera un Formulario de Información Técnica (FIT) por cada subestación bajo análisis. La información de los FIT se completa utilizando los siguientes antecedentes:

- Planos *As Built* de las MPT obtenidos desde el sistema de información que nuestra organización tiene disponible en la página web, en adelante, Infotécnica [2]. En los casos en que la información no resulte suficiente para el desarrollo del análisis, se solicita a las empresas coordinadas la entrega de los planos actualizados de las MPT correspondientes.
- Memorias de cálculo de diseño de las MPT y reportes con mediciones en las subestaciones, solicitadas a los propietarios de las instalaciones.
- Parámetros eléctricos y de diseño de las líneas de transmisión que se conectan a las subestaciones bajo análisis, según la información disponible en Infotécnica [2].

4.3 ETAPA 3. DEFINICIÓN DE CRITERIOS.

Posterior a la recopilación de antecedentes, se establecieron los siguientes criterios orientados a la modelación y diagnóstico de las instalaciones:

- Criterios para modelar las instalaciones en softwares de simulación, a partir de parámetros de diseño de las instalaciones.
- Criterios para discriminar entre una condición normal o de incumplimiento de las tensiones de paso (T_p) y de contacto (T_c).
- Criterios para clasificar las instalaciones, según las magnitudes de T_p y T_c obtenidas mediante simulación.

- Criterios para información técnica faltante, con el propósito de estimar parámetros técnicos requeridos para la modelación de las instalaciones.

4.4 ETAPA 4. DIAGNÓSTICO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.

En esta etapa se llevan a cabo los análisis que permitan determinar el estado de las MPT frente a los escenarios de expansión previstos en el SEN.

Los máximos valores de corriente residual en cada subestación son obtenidos empleando la Base de Datos (BD) Digsilent del SEN[1], cuya modelación considera adicionalmente la inclusión de los proyectos de generación y transmisión previstos a conectarse al año 2024.

La modelación de las MPT y los cálculos asociados al cumplimiento de las T_p y T_c se realizan utilizando el software CDEGS®. Estas simulaciones, basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF), permiten obtener para cada subestación:

- Resistencia de malla de puesta a tierra.
- Corriente de falla a tierra en la subestación.
- Tensiones de paso (T_p) y de contacto (T_c) en el área de la MPT.

4.5 ETAPA 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Por último, se desarrollan análisis con el objetivo de determinar:

- Cumplimiento de las instalaciones respecto de los límites tolerables para seguridad de las personas y equipos de la subestación.
- Capacidad de la malla de tierra de la subestación para recibir obras de ampliación.

[1] BD disponible en el sitio web del Coordinador al mes de febrero de 2019.

5 DESARROLLO DEL ESTUDIO

5.1 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO

De modo de evaluar el estado de la MPT frente a la evolución de los niveles de cortocircuito del SEN, se consideran dos (2) escenarios:

- Escenario 2019: correspondiente a la condición de la subestación para el año de publicación de la Propuesta Anual del Coordinador.
- Escenario 2024: correspondiente a la condición de la subestación para el año estimado de puesta en servicio de las obras de ampliación contenidas en la Propuesta Anual del Coordinador.

5.2 DEFINICIÓN DE CRITERIOS

5.2.1 Criterios para modelación de instalaciones

a) Modelación de los tipos de suelo

Para efectos de la modelación se considera una disposición horizontal de las capas de suelo con la siguiente clasificación:

- Modelo de una capa: correspondiente a un tipo de suelo homogéneo, con un único valor de resistividad equivalente.
- Modelo de dos o más capas: correspondiente a un tipo de suelo con distintos valores de resistividad para cada una de las capas que lo conforman.

Adicionalmente, en la modelación se incorporan las siguientes condiciones de diseño dado el efecto que tienen sobre la resistividad del terreno:

- Capa superficial o gravilla en el área de la MPT, para todas las subestaciones analizadas.
- Tratamiento químico de suelo con mejoradores de conductividad del terreno, tales como bentonita, en caso de que se haya sido considerado su uso durante la construcción de la subestación.

b) Modelación de las mallas de puesta a tierra

La geometría de las MPT se importa desde los planos *as built* vigentes de la subestación en formato *.dwg*, lo que permite representar reticulados simétricos o asimétricos, así como espaciamiento no uniforme entre conductores.

c) Modelación de las líneas de transmisión

Las líneas de transmisión que se conectan a la subestación son modeladas utilizando la siguiente información declarada por el propietario de la instalación en Infotécnica:

- Tipo de torre más representativa de los tramos de línea.
- Listado de distribución de estructuras
- Coordenadas en UTM de cada estructura del tramo.
- Valor promedio de resistividad del terreno a lo largo de la línea.

d) Modelación de los cables de guardia

Los cables de guardia se modelan según sus parámetros eléctricos, los que son obtenidos de las hojas de datos y de la información disponible en Infotécnica:

- Material del cable de guardia
- Sección del cable guardia [mm^2]

e) Modelación de las subestaciones

Para efectos del tratamiento de las subestaciones en software CDEGS® se adopta la siguiente clasificación:

- Subestación bajo análisis: correspondiente a la subestación con obras de ampliación y objeto de estudio en el EDIC 2019. Para este caso se desarrolla una modelación detallada del tipo de suelo y reticulado de MPT, según los criterios indicados en los ítems a) y b) de la presente sección.
- Subestación remota: correspondiente a la subestación asociada al extremo remoto de las líneas de transmisión. Se modelan según los supuestos del ítem b) indicados en la sección 5.2.4.

Adicionalmente, se aplican los siguientes criterios de modelación:

- Si la subestación bajo análisis corresponde a una subestación seccionadora o *tap off*, se modelará el tramo de línea que presente la mayor distancia entre la subestación bajo análisis y la subestación remota.
- Para todos los casos analizados, no se considerará el efecto de las subestaciones seccionadoras o *tap off* entre la subestación bajo análisis y la subestación remota.

f) Máximos valores de corriente de cortocircuito

El cálculo de las corrientes de cortocircuito se realiza según lo establecido en el Anexo Técnico: Cálculo de Nivel Máximo de Cortocircuito [3], esto es, considerando el máximo enmallamiento del sistema y conectadas todas las unidades de generación.

Las corrientes de cortocircuito se evalúan para fallas monofásicas y bifásicas a tierra en barras de la subestación. Con estos resultados, se determina el máximo valor de corriente residual ($3I0$) para los años 2019 y 2024.

Para los casos en que la subestación disponga de patios con distintos niveles de tensión, se considerará como escenario de mayor exigencia la máxima corriente residual obtenida en cualquiera de los niveles de tensión de la subestación.

5.2.2 Criterio de tensiones tolerables

El estándar IEEE Std. 80 – 2013 [4] provee una metodología para calcular las tensiones $\mathrm{T_p}$ y $\mathrm{T_c}$ tolerables en una instalación, antes de que la falla sea despejada y el sistema eléctrico sea desenergizado.

El diseño de la MPT de la subestación deberá asegurar que no se sobrepasen los límites tolerables de $\mathrm{T_p}$ y $\mathrm{T_c}$, por lo que dichos valores constituyen una referencia para discriminar entre una condición de normalidad o de incumplimiento de las instalaciones. Las siguientes expresiones simplificadas permiten determinar los umbrales tolerables para las respectivas tensiones:

$$T_p = (1000 + 6C_s * \rho_s)\frac{0{,}116}{\sqrt{t_s}} \qquad \textit{Ecuación 1}$$

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

$$T_c = (1000 + 1{,}5C_s * \rho_s) * \frac{0{,}116}{\sqrt{t_s}}$$ *Ecuación 2*

Donde,

T_p : Tensión de paso [V].

T_c : Tensión de contacto [V].

ρ_s : Resistividad de la superficie del terreno (gravilla) [Ω·m]

ρ : Resistividad del terreno [Ω·m]

t_s : Duración de la corriente de falla a tierra [s]. Para los análisis de este Informe se consideran 0,5 segundos.

C_s : Factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie en presencia de material resistivo en la superficie del terreno (gravilla). Calculado mediante la siguiente fórmula:

$$C_s = 1 - \frac{0{,}09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0{,}09}$$ *Ecuación 3*

h_s : Espesor del material resistivo en la superficie [m]. Para este Informe se consideran 0,15 [m]

Adicionalmente debe tenerse presente que para efectos de los cálculos se consideran los siguientes valores:

- Peso de una persona: 50 kg
- Frecuencia: 50 Hz
- Relación X/R en cada subestación, según se indica en sección 6.2 del Informe.

5.2.3 Efecto de las obras de ampliación futuras

El análisis del comportamiento futuro de las instalaciones se realiza bajo los siguientes supuestos:

- El diseño de las MPT corresponde a su situación actual, por lo que no se modifican las dimensiones y reticulado de la malla.
- Se considera que la MPT no experimenta cambios significativos en sus propiedades y características constructivas, por lo que no cambia el valor teórico de la resistencia de la malla de puesta a tierra.
- Cuando la obra de ampliación contemple la conexión de nuevas líneas de transmisión a la subestación, se considerará que el diseño de la línea presenta cable de guardia.

5.2.4 Definición de supuestos de información técnica

a) Resistencia puesta a tierra de pie de torre

Para las líneas de transmisión que no posean información, se utiliza como resistencia de puesta a tierra de pie de torre un valor de 25 [Ω]. Dicho valor corresponde al máximo permitido por el Reglamento de Instalaciones de Corrientes Fuertes [5].

b) Resistencia de MPT de subestaciones remotas

Para las subestaciones asociadas al extremo remoto de las líneas de transmisión modeladas, se considera un valor máximo de 5 [Ω], correspondiente al valor referencial recomendado en el estándar IEEE Std. 80 – 2010 [6].

c) Resistividad del terreno

En caso de no poseer informes con mediciones en terreno, se utilizan valores referenciales de resistividad entregados por el estándar IEEE Std. 80 – 2013 [4]. Para la selección de la resistividad y tipo de suelo se aplicarán los siguientes supuestos:

- Los valores corresponderán a un promedio de valores característicos de suelos húmedos y secos.
- La modelación corresponderá a un tipo de suelo homogéneo con una sola capa.

6 MEMORIA DE CÁLCULO

6.1 CÁLCULO DE RESISTENCIA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA

Para la obtención del valor teórico de la resistencia de la MPT se construye en el software CDEGS® una representación detallada de la geometría de la malla y estratificación del terreno, conforme los criterios de modelación indicados en la sección 5.2 del Informe.

En la *Ilustración 1*, se muestra un reticulado genérico con arreglo rectangular y espaciamiento uniforme entre conductores con el propósito de identificar la información relevante para la modelación de las MPT:

- Profundidad de enterramiento de conductores [m]
- Material constructivo y sección de los conductores [mm^2] que componen la MPT.
- Longitud y profundidad de enterramiento de varillas de cobre existentes en la subestación.

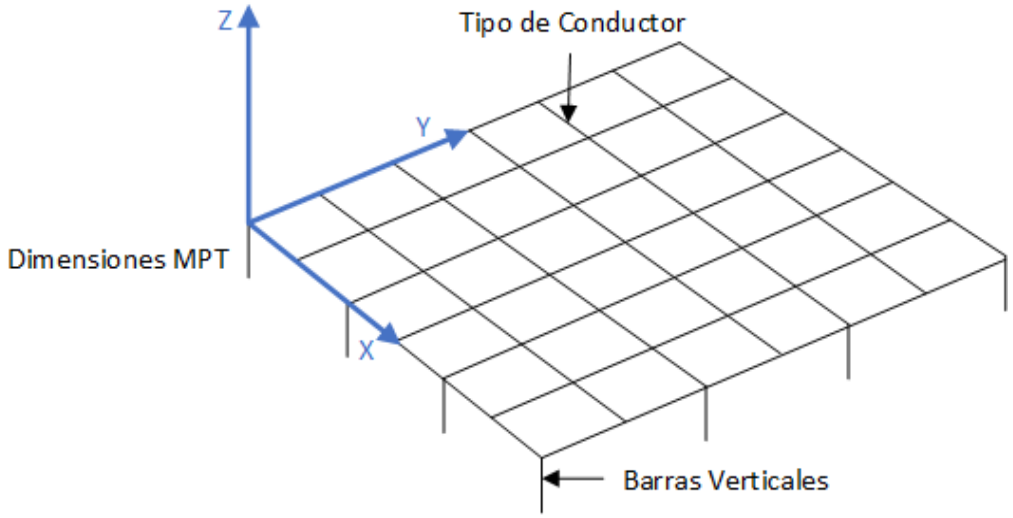

Ilustración 1: Reticulado genérico con información para modelación de las MPT

En la *Tabla 1,* se detallan los parámetros utilizados para la modelación de cada una de las subestaciones bajo análisis.

Tabla 1: Información técnica para modelación de las MPT

Nombre de la S/E	Dimensiones		Tipo de Conductor	Profundidad Enterramiento [m]	Barras Verticales
	X [m]	Y [m]			
S/E Batuco	90	30	Cu 120 mm^2	0,6	29 barras de 5/8” x 1,5 m
S/E Los Almendros	109,5	110	Cu 120 mm^2	0,6	N/A
S/E Pajaritos	38,3	36,8	Cu 120 mm^2	0,6	N/A
S/E Lo Aguirre	50	50	Cu 4 AWG	0,6	19 barras de 5/8” x 1,5 m
S/E Santa Raquel	95	84	Cu 120 mm^2	0,6	N/A
S/E Quinquimo	75	69	Cu 2/0 AWG	0,6	N/A
S/E Cabildo	25	52,2	Cu 2 AWG	0,6	N/A
S/E Costanera	54,5	42,2	Cu 4/0 AWG	0,7	N/A
S/E Alto Bonito	45	34,5	Cu 4/0 AWG	0,6	8 barras 5/8” x 3m
S/E Castro	47	40	Cu 120 mm^2	0,6	N/A

El modelo de suelo para la zona en la que se ubica cada subestación se construye utilizando los informes de medición entregados por los propietarios de las instalaciones. En la *Ilustración 2*, se muestra gráficamente un modelo de suelo genérico con los parámetros relevantes considerados para su representación en el software CDEGS®:

- Valor de resistividad del terreno [Ω-m].
- Espesor asociado a cada capa [m].

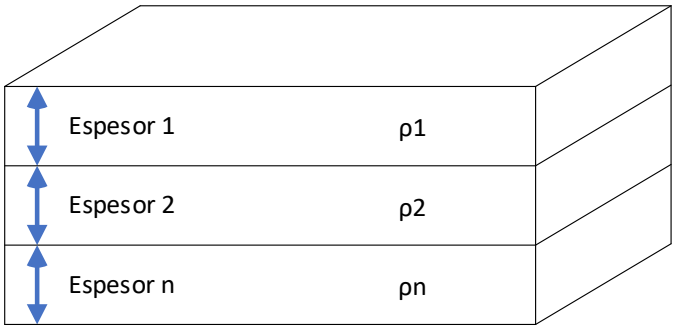

Ilustración 2: Estratificación genérica con información para modelación del tipo de suelo

En la *Tabla 2*, se entrega el detalle de la información utilizada para modelación:

Tabla 2: Información técnica para modelación de tipos de suelo

Nombre de la S/E	Modelo de suelo	Capa	Resistividad [Ω-m]	Espesor [m]
S/E Batuco	Tres Capas	1	30,8	0,18
		2	20,02	10,8
		3	∞	∞
S/E Los Almendros	Una Capa	1	67,50	∞
S/E Pajaritos	Una Capa	1	550	∞
S/E Lo Aguirre	Una Capa	1	44	∞
S/E Santa Raquel	Tres Capas	1	115	0,21
		2	575	7,35
		3	172	∞
S/E Quinquimo	Una Capa	1	500	∞
S/E Cabildo	Una Capa	1	500	∞
S/E Costanera	Cinco Capas	1	17,5	0,25
		2	530	0,08
		3	28,6	7,45
		4	193	641
		5	0,823	∞
S/E Alto Bonito	Dos Capas	1	60	0,8
		2	1000	∞
S/E Castro	Cuatro Capas	1	782	1,06
		2	245,69	0,35
		3	979,27	5,26
		4	5,26	∞

El resultado de las simulaciones de esta etapa corresponderá al valor de resistencia de la malla de puesta a tierra de cada subestación bajo análisis.

6.2 CÁLCULO DEL FACTOR DE DIVISIÓN DE CORRIENTE A TIERRA (S_f)

Para los casos en que las líneas de transmisión que se conectan a la subestación posean cable de guardia, resulta necesario determinar la corriente de falla que no contribuye al aumento del potencial a tierra (GPR) en la subestación y que retorna a las subestaciones remotas mediante los cables de guardia de las líneas de transmisión.

De acuerdo con la definición del estándar IEEE Std. 80 – 2013 [4], el factor S_f representa la relación inversa entre la corriente simétrica de falla a tierra en la subestación y la porción de la corriente de falla que fluye a la MPT de la subestación:

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \qquad \textit{Ecuación 4}$$

Donde,

I_g : Corriente de fuga a tierra [A], fracción de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye entre la MPT de la subestación y la tierra de instalaciones adyacentes.

$3I_0$: Corriente simétrica de falla a tierra [A] en la subestación.

En el cálculo del factor S_f, adicional a la resistencia de la MPT de la subestación bajo análisis, inciden la localización y magnitud de la falla y las condiciones topológicas en la zona en la que se ubique la subestación. Ambos aspectos son incorporados en la modelación de acuerdo con lo siguiente:

6.2.1 Corrientes de cortocircuito

Las corrientes simétricas de falla a tierra $(3I_0)$ y la relación X/R en cada subestación son obtenidas para los años 2019 y 2024 aplicando los criterios de la sección 5.2. Para efectos del cálculo del factor S_f, se considera lo siguiente:

- El punto de aplicación de la falla corresponde a la barra de la subestación bajo análisis.
- Los aportes a la corriente de falla de cada línea de transmisión se obtienen para el tipo de falla con el máximo valor de corriente residual $3I_0$.

En la *Tabla 3,* se resumen los valores máximos calculados para cada subestación.

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

Tabla 3: Valores máximos de cortocircuitos en cada subestación bajo análisis

	Año 2019		Año 2024	
Nombre de la S/E	$3I_0$ [kA]	**Relación X/R**	$3I_0$ [kA]	**Relación X/R**
S/E Batuco	11,71	5,136	11,91	5,072
S/E Los Almendros	28,27	7,964	29,96	7,965
S/E Pajaritos	16,70	4,488	16,94	4,359
S/E Lo Aguirre	10,61	1,807	10,61	1,794
S/E Santa Raquel	18,16	3,572	18,23	3,392
S/E Quinquimo	6,19	1,748	6,19	1,742
S/E Cabildo	5,72	1,565	5,72	1,561
S/E Costanera	14,16	2,109	14,24	2,046
S/E Alto Bonito	10,96	8,445	11,07	8,666
S/E Castro	6,19	5,561	7,04	6,435

6.2.2 Líneas aéreas con cables de guardia

La modelación de las líneas de transmisión consiste en una representación de la geometría de las torres y de los parámetros eléctricos asociados al conductor del cable de guardia. Para la modelación se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La ubicación de los conductores de fase y de neutro es expresada en coordenadas cartesianas.
- La resistencia de puesta a tierra de las torres presenta un mismo valor a lo largo de la línea de transmisión, de acuerdo con el supuesto de información técnica definido en la sección 5.2.
- Se considera un único valor promedio para la resistividad del suelo entre la subestación bajo análisis y la subestación remota.

De los planos de diseño de las torres de las líneas y del listado de distribución con las coordenadas de ubicación de cada estructura, se obtienen los siguientes parámetros:

- Altura del cable de guardia [m].
- Altura conductores de fases [m].
- Distancia fases – eje estructura [m].
- Vano promedio [m].

- Longitud total de la línea de transmisión [km].

De las hojas de datos de los cables de guardia se obtiene la siguiente información:

- Material constructivo y radio del conductor [cm]
- Resistencia del tipo de conductor [Ω/km]
- Longitud del conductor [km]

En la *Tabla 4* se resumen los parámetros empleados para la modelación de las líneas con cable de guardia asociadas a las subestaciones bajo análisis.

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

Tabla 4: Información técnica para modelación de líneas de transmisión con cables de guardia

	Dato de Línea	Datos Cable de Guardia			Datos Torres		
Nombre de la S/E	**Nombre**	**Tipo**	**Sección [mm2]**	**Longitud [km]**	**Altura Cable Guardia [m]**	**Altura Fase [m]**	**Dist. Fase – Eje [m]**
S/E Batuco	Cerro Navia – Las Vegas	OPWG	112,74	56,1	25,61	17,9	2,75
S/E Los Almendros	Alfalfal – Los Almendros	EHS	3/8''	44,2	42,36	26,36	4
	Alto Jahuel – Los Almendros	EHS	2x3/8''	40,7	40	25,5	3,8
	El Salto – Los Almendros	EHS	3/8''	17,5	26,5	16	2,6
	Florida – Los Almendros	EHS	3/8''	18,1	26,35	15	2,6
S/E Pajaritos	Cerro Navia – Chena	OPWG	126,68	9,05	27,33	14,7	2,4
S/E Sta. Raquel	Alto Jahuel – La Florida	EHS	5/16''	21,4	33,9	17,5	2,35
S/E Costanera	Puente Alto - Costanera	Acero	3/8''	3,6	13,17	11,54	1,26

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

6.3 CÁLCULO DE TENSIONES DE PASO (T_p) Y DE CONTACTO (T_c)

El estándar IEEE Std. 80 – 2013 [4] entrega una metodología de cálculo tradicional para determinar las tensiones T_p y T_c existentes en el área de la subestación. Dicho enfoque, sin embargo, presenta las siguientes restricciones para el análisis:

- Se asume espaciamiento rectangular en el reticulado de la malla.
- Se considera un tipo de suelo uniforme y con un valor único de resistividad.
- Se calcula el valor de la tensión en un punto específico del reticulado y no en toda el área de la subestación.

Adicional al cálculo tradicional, el estándar valida la utilización de softwares computacionales, tales como el CDEGS®, dadas las prestaciones adicionales ofrecidas por los algoritmos de cálculos basados en MEF. Lo anterior, posibilita la obtención de las T_p y T_c en cualquier punto del área de la MPT.

Para generar el perfil de tensiones, se definen los puntos de observación en los cuales se calculan las T_p y T_c. En la *Ilustración 3*, se muestra gráficamente un reticulado rectangular de una MPT genérica, en la que se identifican los siguientes ajustes para los puntos de observación de las T_p y T_c:

- Distancia respecto al borde de la malla: 1 [m]
- Distancia entre puntos del eje X: 1 [m]
- Distancia entre puntos del eje Y: 1 [m]

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

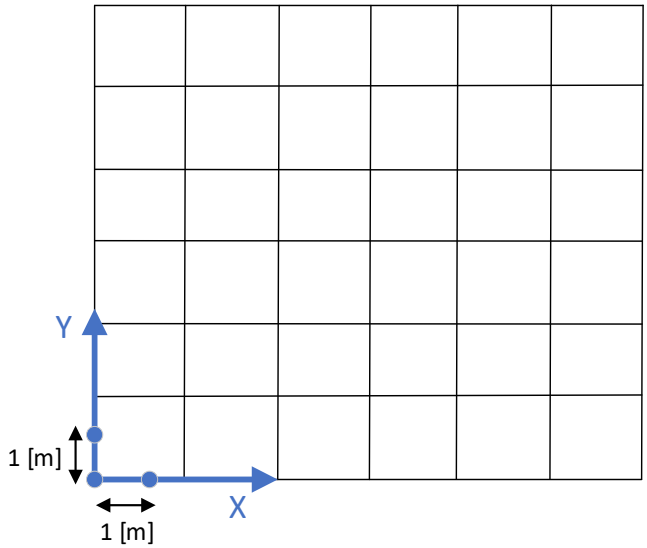

Ilustración 3: Esquema simplificado con información para modelación de las MPT

Como resultado de esta etapa se obtiene el perfil de tensiones T_p y T_c en toda el área de la MPT de la subestación. El cumplimiento de las tensiones tolerables y los valores máximos obtenidos en cada punto del reticulado de la MPT se muestra en gráficos 2D que abarcan todas las zonas de la subestación.

6.4 CÁLCULO DE SECCIÓN ADMISIBLE

La verificación de la sección mínima admisible de los conductores que conforman la MPT se fundamenta en las recomendaciones de diseño presentadas en el estándar IEEE Std. 80–2013 [4]. Para el cálculo del dimensionamiento de los conductores se emplea la siguiente formulación:

$$A_{kcmil} = \mathrm{I} \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c} \cdot I_f \cdot D_f \qquad \textit{Ecuación 5}$$

Donde,

A_{kcmil} : Área admisible del conductor [kcmil].

I : Corriente de cortocircuito máxima [kA] en la subestación, según resultados presentados en sección 6.2.1

K_f : Constante del material del conductor de la MPT. Para el caso del cobre comercial se utiliza el valor referencia de la Tabla 2 del estándar IEEE Std. 80–2013 [4] (K_f = 7,06).

t_c : Tiempo de despeje de las protecciones ante falla residual [s]. Para los análisis del Informe corresponde a 0,5 segundos.

I_f : Factor se seguridad asociado al incremento de la corriente de cortocircuito máxima. Se utiliza un valor de I_f = 1 ya que las corrientes consideran una proyección al año 2024.

D_f : Factor de Decremento de la corriente residual. Se utiliza un valor de $D_f = 1$, para todos los casos analizados.

El valor obtenido con la ecuación anterior es comparado con el conductor existente en la MPT, verificando su cumplimiento mediante la siguiente inecuación:

$$A_{kcmil} < Área\ Conductor$$ *Ecuación 6*

Teatinos N°280, Piso 11, Santiago de Chile o Avenida Apoquindo N°4501, Piso 6, Las Condes, Santiago de Chile.

7 REFERENCIAS

[1] Coordinador Eléctrico Nacional, Propuesta Anual de Expansión de la Transmisión, 2019.

[2] Coordinador Eléctrico Nacional , "https://infotecnica.coordinador.cl/," [Online].

[3] Comisión Nacional de Energía, "Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio - Anexo Técnico: Cálculo de Nivel Máximo de Cortocircuito," Santiago, 2018.

[4] IEEE, "IEEE Std. 80-2013: Guide for safey in AC substation grounding.," 2013.

[5] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, "NSEG. 5 En. 71: Norma de Seguridad en Instalaciones de Corrientes Fuertes.," Santiago, Chile .

[6] IEEE, "IEEE Std. 80-2010: Guide for safey in AC substation grounding.," 2010.