

PROCESO DE SELECCIÓN Y EJECUCIÓN DE PUESTA A TIERRA PARA TORRES DE LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN

Ing. Oscar Santacruz S., Ing. Evelyn Gamarra, Ing. Jorge Campuzano

Itaipu Binacional - CIE S.A. - ANDE

Paraguay

Resumen

El Plan Maestro de Transmisión 2021-2030 de la ANDE [1] contempla, además de la LPI 1542/19 “Proyecto de Construcción e Interconexión de la SE Yguazú 500 kV” actualmente en ejecución, una serie de nuevos proyectos (algunos en proceso licitatorio) que pueden ser resumidos de la siguiente manera: 1349 km de líneas de transmisión (LT) en 500 kV; 2315 km de LT en 220 kV; y 492 km de LT en 66 kV. Siendo que, el lote N°2 de la licitación mencionada abarca la nueva LT 500 kV doble terna entre la Subestación Margen Derecha (SEMD) de Itaipu y la futura Estación (ES) de Colonia Yguazú (YGU), la adecuación de la LT 220 kV SEMD – ES Itakyry, y el seccionamiento de la LT 220 kV ES Kilometro 30 - ES Coronel Oviedo.

En este contexto, el presente documento tiene por objetivo definir el proceso a ser utilizado para la selección y ejecución de la puesta a tierra (PAT) de las líneas aéreas de transmisión, con la finalidad de agilizar la construcción y garantizar un dimensionamiento adecuado. Conjunto de procedimientos que tiene implicancias tanto en la de definición del proyecto ejecutivo como durante la ejecución de la obra, atendiendo a las especificaciones técnicas y normas internacionales aplicables.

El proceso de selección adecuado trae a colación una serie de procedimientos, entre los que se destacan: la memoria de cálculo utilizando simulación por medio de software para el diseño de los distintos tipos de mallas de PAT, en base a las mediciones de resistividad del suelo; las buenas prácticas de las instalaciones de PAT; procedimientos de medición de PAT aplicando el método de caída de potencial (IEEE Std. 81); y la validación de los resultados entre las mediciones de campo y los valores teóricos. Cabe destacar que la selección de la metodología de medición de la resistencia de PAT depende del tamaño y del área de influencia de la puesta a tierra.

Palabras clave

Puesta a Tierra; Método de Caída de Potencial; Área de Influencia; Buenas Prácticas de PAT.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión proyectadas en el Plan Maestro de la ANDE [1], en conjunto con las subestaciones, son planificadas con la finalidad de aumentar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN-PY). Estas obras deben de ser ejecutadas objetivando un buen desempeño del sistema eléctrico al cual pertenecen, lo que implica que a lo largo de su vida útil estas instalaciones deben de mantener una buena calidad en cuanto a su funcionalidad como a los materiales empleados en su construcción.

Con la finalidad de obtener una buena calidad, además de agilizar la construcción y garantizar un dimensionamiento adecuado, serán definidas una serie de directrices a ser empleadas durante la selección, ejecución y medición de los sistemas de puesta a tierra (PAT) de líneas áreas de transmisión.

En este contexto, el presente documento tiene por objetivo definir un conjunto de procedimientos a ser utilizados en el proceso de selección y ejecución de sistemas de puesta a tierra para torres de líneas aéreas de transmisión. Conjunto de procedimientos que, tiene implicancias tanto en la de definición del proyecto ejecutivo como durante la fase de ejecución de la obra, atendiendo a las normas internacionales aplicables [2, 3, 4] y a las especificaciones técnicas (EE.TT.) de estas [5, 6].

El presente documento está dividido cuanto sigue: Memoria de Cálculo, con la generalización de la técnica aplicada en el dimensionamiento de la PAT de líneas aéreas de transmisión; Buenas Prácticas, con las diferentes técnicas empleadas en las instalaciones de PAT que permiten atender los requisitos de buena calidad y funcionalidad; Medición de Puesta a Tierra, con la aplicación de métodos para determinar la resistencia de la PAT y así corroborar que atiende las EE.TT. del proyecto; Validación Teórica/Práctica, contrarrestando los valores teóricos con las mediciones de campo demostrando la precisión de todo el procedimiento; por último, las conclusiones del trabajo.

2. PROCESO DE SELECCIÓN Y EJECUCIÓN DE PUESTA A TIERRA

El objetivo de un sistema de puesta a tierra es el de evitar tensiones elevadas entre estructuras, personas, equipos y el terreno durante la aparición de una corriente transitoria, ofreciendo una baja impedancia que permite su disipación y dispersión en el terreno. Además, esta debe de atender los criterios de diseño, resistir esfuerzos mecánicos y corrosión a lo largo de su vida útil.

2.1 Memoria de Cálculo

Entre los criterios principales de diseño de las mallas de PAT se encuentran: la resistividad del terreno; la composición del suelo; la intensidad y la duración de la corriente de falla.

2.1.1 Medición de resistividad del suelo

La resistividad aparente del terreno, en el punto de instalación de la PAT, es obtenida empleando el método Wenner [7]. El procedimiento, que es un caso particular del método de los cuatro electrodos, se realiza disponiendo los electrodos en línea recta y equidistantes a una distancia (a), simétricas respecto al punto en el que se desea medir la resistividad. El conjunto de mediciones es realizado con un telurómetro (de baja frecuencia) de cuatro terminales, siendo los dos electrodos externos para la

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

inyección de corriente medida (I) y los dos centrales para medición de potencial (V), conforme Figura 1. El valor de la resistencia (R), para cada separación, es obtenida por la Ley de Ohm (V/I).

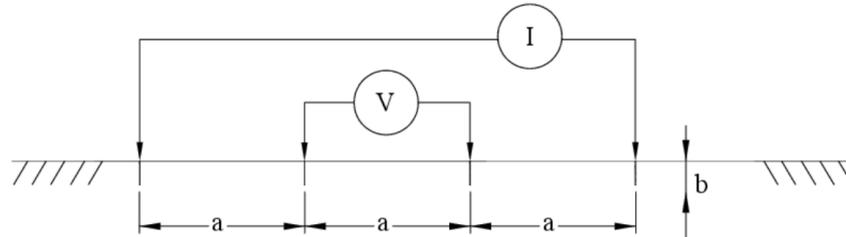


Figura 1. Método Wenner de medición de resistividad. Fuente: [2].

Es recomendable efectuar dos conjuntos de mediciones, perpendiculares entre sí, utilizando como eje el punto de instalación de la torre. De manera que, para una misma distancia de separación, pueda ser realizado un promedio entre los dos valores obtenidos en cada conjunto. Para obtener la resistividad, la ecuación puede ser simplificada a $\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$, cuando se asume que la profundidad de enterramiento (b) es 1/10 de la separación a entre electrodos [2]. Donde ρ es la resistividad aparente del terreno en Ohm.m; R es la resistencia medida por el telurómetro en Ohm y a es la distancia de separación en metros.

2.1.2 Tipos de suelo

La composición del suelo en el sitio de instalación de cada torre es analizada con la realización de estudios geotécnicos, ejecutados en la fase de proyecto ejecutivo de las fundaciones. El análisis utilizado es el ensayo de penetración estándar o SPT (*Standard Penetration Test*), que contabiliza el número de golpes necesarios para introducir un tomamuestras repetidamente hasta cierta profundidad. Esta contabilización es registrada y en conjunto con el estudio de estratigrafía obtenido en laboratorio, permite identificar el tipo de suelo (blando, arenoso, rocoso, etc.) en el punto de instalación de la torre. El tipo de suelo permite adoptar valores de resistividad aproximados que posteriormente son utilizados en el modelado de la malla a tierra, conforme presentado Tabla I [7].

Tabla I: Tipos de suelo. Fuente: [7].

CLASE	TIPO	RESISTIVIDAD
Suelo clase A	suelos blandos ácidos	menor de 200 Ω .m
Suelo clase B1	suelos arenosos semisecos	entre 500 y 1000 Ω .m
Suelo clase B2	suelos arenosos secos	entre 1000 y 2000 Ω .m
Suelo clase C1	suelos rocosos	menor de 1000 Ω .m
Suelo clase C2	suelos rocosos	mayor de 1000 Ω .m.

2.1.3 Modelado de malla a tierra

La manera más adecuada de elaborar el dimensionamiento de la malla y verificar el cumplimiento de los criterios de diseño, descritos en las secciones 2.2 y 2.3.1, es mediante simulaciones en *softwares* específicos para el efecto. Los datos de entrada de estos programas son los resultados de las mediciones de resistividad junto con las separaciones utilizadas y el método empleado (Wenner), obteniéndose así la estratificación del terreno en capas con su correspondiente resistividad, conforme Figura 2. Convenientemente, es necesario verificar que el resultado obtenido es coherente con el tipo de suelo determinado en el estudio de la composición del suelo.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

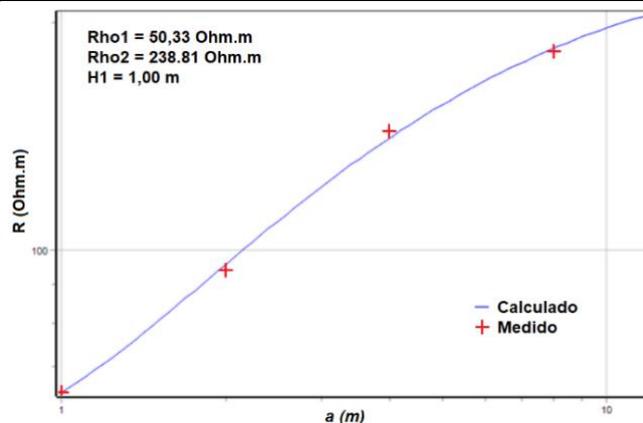


Figura 2. Estratificación del suelo en dos capas para T-010 de la LT 66kV PBU-NAR.

Llevando en consideración que a lo largo del trazado de una LT podrán encontrarse distintas composiciones de suelo, se diseñan diferentes tipos de mallas de PAT a ser empleados [8, 9]. Estos diseños incluyen la disposición de los electrodos de tierra (cables conductores, electrodos o varillas verticales, conectores, entre otros) con sus respectivas dimensiones y la contabilización de los materiales necesarios para su instalación, conforme observado de manera simplificada en la Figura 3. Además, son proyectados de tal forma a constar de distintas etapas de ampliación.

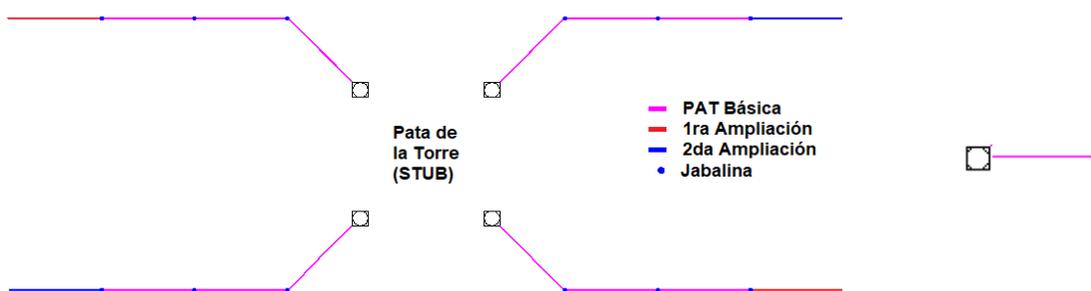


Figura 3. Disposiciones típicas de un sistema de puesta a tierra. Fuente: [10, 11]

En conjunto, los resultados de cada etapa conteniendo los valores de resistividad del terreno; los resultados del estudio de composición del suelo; los modelos de la malla a tierra del *software*; y los diseños de cada tipo de PAT; son los que permiten la elaboración de la Memoria de Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra del proyecto [10, 11].

2.1.4 Tipificación de puesta a tierra

Una vez diseñado un tipo de PAT es posible realizar simulaciones de dicha malla, condicionado a la resistividad del terreno del sitio específico donde será instalado, de manera a obtener un valor de resistencia de puesta a tierra teórico previo a su ejecución en campo.

Estas simulaciones, que permiten la obtención teórica en cada sitio, posibilitan la elaboración de un documento conocido por tipificación de puesta a tierra [12]. El mismo compendia las informaciones de cada etapa (resistividad, resultados del estudio geotécnico y el tipo de suelo, valor teórico de la resistencia de cada torre), lo que permite realizar una buena estimación del tipo del tipo de PAT a ser utilizado en cada torre a lo largo de la línea de transmisión. Además, estas estimaciones permiten al

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

proyectista contabilizar los materiales necesarios para la ejecución de los trabajos, definiendo de antemano si serán usadas mallas básicas o si serán necesarias ampliaciones en un sitio específico, lo que agiliza las adquisiciones de componente de la PAT y el trabajo en campo.

2.2 Buenas Prácticas

En la selección de los materiales a utilizar son considerados los valores obtenidos de la resistividad del terreno y los resultados del estudio geotécnico con el tipo de suelo en el sitio de instalación de la PAT, de manera que [10]: para suelos húmedos y lugares donde no se espera la existencia de rocas o piedras, la malla podrá utilizar jabalinas del tipo *copperweld*; en casos donde se detecte la existencia de rocas y/o piedras o en condiciones especiales, la malla podrá estar formada por pletinas de acero galvanizado; y en casos donde en el lugar de emplazamiento de la malla aflora roca o la misma se encuentre a escasa profundidad, se podrán emplear pletinas conectadas a perfiles metálicos tipo L.

En lo que respecta al tipo de conexiones, podrán ser empleadas las de tipo compresión o las exotérmicas, siempre que estén acordes al estándar IEEE Std. 837 [13]. Las conexiones tipo compresión utilizan medios mecánicos que son de fácil instalación, pero a lo largo del tiempo presentan un aumento de la resistencia en el punto por corrosión. En cambio, las del tipo exotérmicas permiten conexiones entre elementos a nivel molecular, presentan una capacidad de conducción superior a los conductores, no aumentan la resistencia en el punto de conexión y son de fácil inspección, sin embargo, son más complejas de instalar y durante este proceso la humedad del ambiente debe de ser llevada en consideración.

Es práctica común la utilización de conductores de cobre desnudo en las mallas a tierra, pero la experiencia demuestra que estos están sujetos a vandalismo/hurto cuando empleados en líneas aéreas de transmisión. Por consiguiente, la utilización de conductores de acero tipo EHS se vuelve ventajosa –siempre que sea atendido el criterio de diseño referente a la corriente de falla.

La aplicación de suelo artificial (bentonita o el tipo gel) también puede ser considerado, principalmente en casos donde el valor de resistividad del terreno no permite alcanzar el valor de resistencia de PAT estipulado en las EE.TT. del proyecto.

En caso de que el valor de la EE.TT. no pueda ser atendido en una torre específica, mismo posterior a la ejecución de las ampliaciones, podrá ser permitida una resistencia mayor toda vez que el promedio de las resistencias de las 5 torres consecutivas sea inferior al del criterio del proyecto [14].

2.3 Procedimiento de Medición de PAT

2.3.1 Normas

La literatura técnica establece diferentes métodos que pueden ser aplicados en la medición de la resistencia de la puesta a tierra [2, 3, 4]. Según la necesidad puede ser empleado un método u otro, siendo que el más ampliamente utilizado es el método de la curva de caída de potencial (*fall of potential*). Estos métodos ayudan a verificar la eficacia de estas instalaciones, tanto en caso de una nueva PAT (que debe de atender a sus EE.TT.) como en la detección de cambios a lo largo su vida útil (estado de las conexiones inaccesibles bajo tierra, variación del valor de su resistencia) y, por ende, de los criterios de seguridad que están deben de cumplir. Según la norma IEEE Std.80 [15],

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

una puesta a tierra debe presentar una baja resistencia respecto a una tierra remota para minimizar la elevación del potencial de tierra (*ground potential rise*), de manera a evitar riesgos de eléctricos y mejorar las respuestas del sistema a las sollicitaciones eléctricas requeridas durante su operación (descargas atmosféricas, fallas a tierra, etc.).

Conforme EE.TT. de ANDE [5, 6], las líneas aéreas de transmisión deben de tener un valor de resistencia de puesta a tierra menor o igual a 6 Ohms en las primeras 7 torres que están próximas a las subestaciones y 10 Ohms para el restante de las torres que interconectan dos subestaciones.

2.3.2 Consideraciones previas

Las mediciones deben de ser realizadas preferentemente empleando telurómetros de alta frecuencia (aprox. 25kHz). En caso de que se trate de una nueva instalación, además de atender lo dispuesto en la sección 2.2, las mediciones deben de ser realizadas previo a la conexión del cable de guardia, posterior a un cierto tiempo de haber finalizado el montaje de la malla y en un tiempo mínimo de 7 días posteriores al último día de lluvia en la región. En caso de una instalación existente, como el de una repotenciación de línea o una línea energizada, todas las disposiciones anteriores continúan válidas no obstante el empleo de telurómetros de alta frecuencia se vuelve imprescindible.

Cabe destacar que durante la realización de las mediciones, otras normas de seguridad dirigidas principalmente al personal que realiza el trabajo deben ser llevadas en consideración, cuanto sigue: las mediciones deben de ser ejecutadas por personal técnico capacitado; el personal debe de emplear elementos de protección individual (EPI); estos deben de tener cuidado con los electrodos de prueba durante las mediciones; no proseguir en caso de condiciones atmosféricas adversas; seguir estrictamente el protocolo de campo elaborado por ingeniería; entre otros.

Con respecto a la dirección de realización de las mediciones, la transversal al eje de la línea debe de ser considerado el sentido preferencial. El sentido opuesto, el longitudinal, solo debe de ser considerado cuando se observen obstrucciones para la realización de las mediciones: vegetación densa, proximidad con otras líneas de transmisión y/o imposibilidad de acceso al predio colindante.

Los sistemas de PAT propuestos en la etapa de proyecto ejecutivo, conforme memoria de cálculo [10, 11] y los criterios mencionados en la sección 2.1, definen dos o más padrones de instalación (ejemplo: suelo normal-jabalinas [8], suelo rocoso-pletinas [9]) con diferentes dimensiones. Conforme Figura 3 es posible observar que estos sistemas, juntamente con los STUBs de las estructuras reticuladas o con las bases de las estructuras tipo octogonales, alcanzan dimensiones considerables que deben ser llevadas en consideración de manera a garantizar mediciones fidedignas.

2.3.3 Teoría del método de caída de potencial

El método de caída de potencial (*fall of potential*), establecido en las normas IEEE Std. 81 [2] y la NBR 15749 [3], es uno de los más utilizados para la medición de la resistencia de puesta a tierra, posible mediante el uso de un telurómetro. Este método consiste básicamente en hacer circular una corriente entre la puesta a tierra sobre ensayo (*G*) y un electrodo auxiliar de corriente (*CP*), midiendo la tensión entre la malla de aterramiento *G* y una tierra de referencia (tierra remota) por medio de un electrodo auxiliar de potencial (*PP*), conforme se indica en la Figura 4,

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

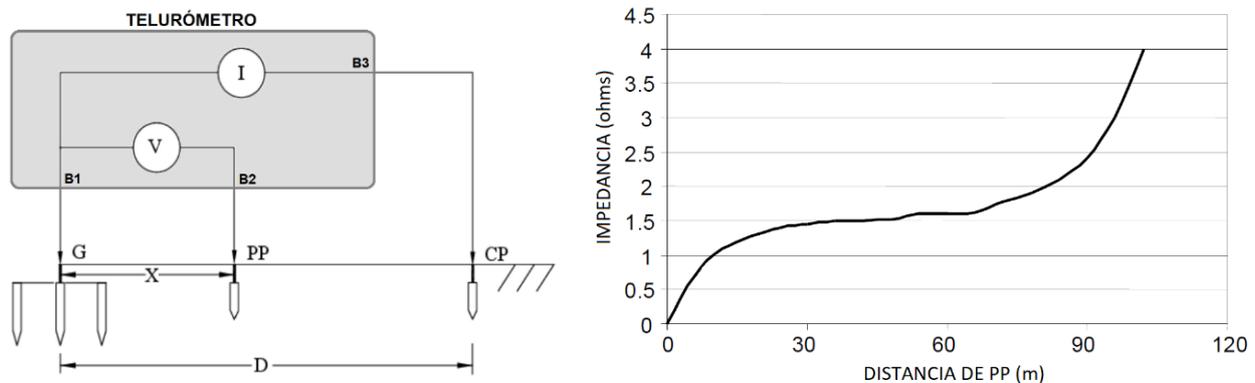


Figura 4. Método de la Caída de Potencial. Fuente: [2].

donde: B1 es el borne del equipo para conexión a la puesta a tierra *G*; B2 es el borne para el electrodo auxiliar de potencial *PP*; B3 es el borne para el electrodo auxiliar de corriente *CP*.

La distancia total de medición (*D*) debe de ser definida como siendo al menos 3 (o más) veces la mayor dimensión del sistema de puesta a tierra de la torre *G* [3]. Por consiguiente, esta longitud debe de ser determinada en cada tipo de PAT (distancia padrón) para asegurar una separación suficiente entre la malla de la torre y el electrodo auxiliar *CP* de manera tal a que las zonas de influencia de cada no estén superpuestas una con la otra. Este criterio de distanciamiento es esencial y debe de ser satisfecho, ya que es lo que posibilita una medición precisa de la resistencia [2].

El proceso de medición es repetitivo, consiste en que el electrodo auxiliar *PP* sea desplazado a lo largo de la dirección escogida a partir de la periferia de *G* en intervalos regulares e incrementales iguales a 10% del valor de la distancia *D* definida para el tipo de PAT. La Figura 4 también presenta el gráfico típico de la resistencia medida (por *PP*) versus la distancia de medición (incremento de la distancia *X*), donde se observa que la resistencia se aproxima de cero cerca de la malla sobre ensayo y tiende a un valor máximo en la proximidad del electrodo auxiliar de corriente *CP* (fijo), conocido como curva característica de la resistencia de PAT. El trazado de la curva busca encontrar la región con pendiente cero conocido como zona plana, o sea puntos de medición donde el electrodo *PP* no se encuentra en ninguna de las dos zonas de influencia.

Una aproximación válida y acotada del método anterior es conocido como la Regla del 62% [2]. Esta reduce la cantidad de mediciones necesarias para determinar la resistencia de la PAT, posicionando el electrodo *PP* (distancia *X*) a 62% del valor de la distancia *D*. La regla, definida en este trabajo como el método acotado, se basa en que la posición mencionada es la teóricamente correcta cuando se trata de suelos con resistividad suficientemente uniformes.

2.3.4 Procedimiento de medición aplicando el método

El procedimiento de medición propuesto para los sistemas de puesta a tierra de líneas áreas de transmisión consiste: en la obtención de la resistencia a través de la Regla del 62%, supeditada a la verificación de la zona de plana; caso contrario, como segunda instancia, es necesario un aumento de la distancia *D* aplicando el mismo método. Alternativamente, o en casos donde el aumento de la distancia no arroje resultados satisfactorios empleando el método anterior, la obtención de la curva característica aplicando el método completo puede ser empleado.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

El criterio para evaluar la medición, en el caso de ser aplicado la regla del 62%, o las mediciones, en el caso del método completo, difiere. En el primer caso, son necesarios más dos mediciones de manera a verificar que la medición a 62% de la distancia D es realmente el valor de la resistencia de PAT de la torre, estas nuevas mediciones deben de ser realizadas a $\pm 5\%$ de distancia de la primera medición y los valores obtenidos deben de verificar que la variación resulte menor a 10%.

En casos excepcionales o en caso de que se desee aplicar el método completo, con los valores obtenidos es posible graficar la curva característica y por inspección de esta determinar la zona plana (que la distancia D utilizada es adecuada). Si la inspección resulta pertinente, entonces el valor de la resistencia de PAT puede de ser determinado: a través del cálculo de la pendiente entre los valores medidos a 60% y 70% de la distancia D , de manera tal a que resultado retorne un valor calculado a 61.8%; o, simplemente, a través de la media aritmética de todos los valores obtenidos entre 50% y 70% de la distancia D .

2.3.5 Ampliaciones de la malla de PAT

Una vez obtenido la resistencia de puesta a tierra de una torre específica, por el primer (el acotado) o el segundo método (completo), es necesario corroborar si esta cumple con sus EE.TT. [5, 6]. Caso contrario, deberán de ser realizadas cuantas ampliaciones sean necesarias hasta lograr alcanzar el criterio especificado, en conformidad con las disposiciones del proyecto de cada tipo de PAT.

Posterior a la ejecución de cada ampliación, llevando en consideración las determinaciones de la sección 2.3.2, nuevamente debe de ser aplicado el procedimiento escogido para la obtención de la resistencia de PAT conforme sección 2.3.4. Sin embargo, un nuevo valor de distancia D deberá de ser empleado en función de la ampliación realizada a la PAT de la torre.

2.3.6 Métodos alternativos

Además del método mencionado, el de la caída de potencial, existen otros métodos propuestos en la literatura técnica [2, 3, 16]: método de dos puntos; método de la pendiente (variante de la caída de potencial); método *clamp-on*; método de caída de potencial/*clamp-on*; método de la intersección; entre otros.

Estos métodos pueden ser aplicados siempre que se tenga el equipo específico que permita su implementación (en el caso del método *clamp-on*; caída de potencia/*clamp-on*) o en condiciones donde la distancia D resulte excesiva. En este último caso, el método de la pendiente (*slope method*) [17] podría ser empleado, principalmente cuando: se presentan las obstrucciones mencionadas en la sección 2.3.2; la dimensión del tipo del sistema de PAT es considerable (ejemplo, suelo rocoso que conlleva el uso de pletina extendido a lo largo de la superficie); o, en función de la distancia D requerida, no se dispone de cables lo suficientemente extensos como para realizar la medición.

2.4 Validación Teórica/Práctica

Los resultados presentados a seguir fueron obtenidos durante el proyecto y ejecución del Lote N°3 de la LPI 1483/2019 [6], que consistió en la repotenciación de la línea de transmisión en 66 kV entre las subestaciones de Paranambu (PBU) y Naranjal (NAR). El proyecto contemplaba, además del cambio de conductores (de ACSR a HTLS) y del cable de guardia (de EHS a OPGW), la sustitución

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

total de algunas torres, así como la verificación de las condiciones de las puestas a tierra de las torres existentes a lo largo del trazado de línea. Básicamente, las PAT de las torres de esta LT se dividían en dos tipos: la Tipo 1, para suelos normales, baja resistividad, empleando cables y jabalinas; y la Tipo 2, para suelos rocosos empleando pletinas.

La Tabla II presenta mediciones de resistividad de suelo, por el método de Wenner, de algunas de las torres (T-010, T-049, T-089, T-123) sustituidas. Se pueden observar mediciones tanto longitudinales como transversales al eje de la línea, con separaciones entre electrodos de 1, 2, 4 y 8 m. Con estos valores fue posible elaborar la memoria de cálculo de puesta a tierra del proyecto, conforme sección 2.1, lo que permitió determinar a través de simulaciones la resistencia de puesta a tierra teórica (esperada) de estas torres.

Tabla II: Mediciones de resistividad del suelo – método Wenner.

TORRE	T-010		T-049		T-089		T-123	
DIRECCIÓN	Long.	Transv.	Long.	Transv.	Long.	Transv.	Long.	Transv.
SEPARACIÓN	Ω [Ohms]							
1m	8,76	11,92	9,6	12,2	8,8	10,51	14,1	15,1
2m	6,6	8,4	7,1	8,3	6,42	7,8	7,3	8,2
4m	5,16	6,3	5,42	5,66	4,9	6,5	9,4	6,1
8m	3,2	4,1	2,9	3,42	3,1	4,9	5,5	3,9

La Tabla III presenta los valores obtenidos tanto en las simulaciones (PAT Teórico) como en las mediciones realizadas en campo aplicando el método del 62% (PAT). Por otra parte, se presentan las tipificaciones estimadas que posteriormente fueron ejecutadas en cada torre sustituida. Cabe destacar que la distancia D definida para el tipo de PAT de estas torres (Tipo 1 con jabalinas) fue de 15 metros. Es posible observar una buena aproximación entre ambos valores (teórico y el de la medición). Además del valor de la PAT, medición a 9.3 m (62% de la distancia D), se observan los valores obtenidos para determinar la zona plana ($\pm 5\%$ de D) que ratifican la medición.

Tabla III: Mediciones de resistencia de PAT – simulación y método del 62%.

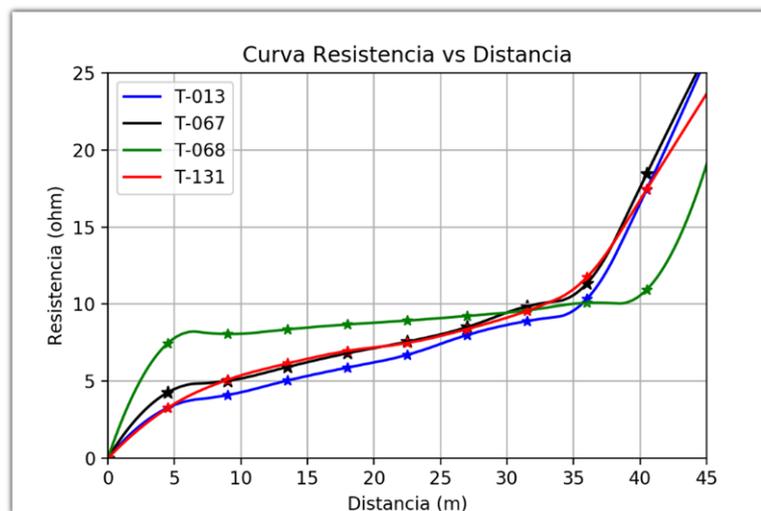
TORRE	PAT Teórico [Ohms]	Tipificación de PAT	PAT [Ohms]	Zona Plana [Ohms]		Verificación Zona Plana [%]	
			a 9,3m	a 8,5m	a 10,1m		
T-010	10,94	Cable + Jabalina	8,74	8,31	9,52	4,9%	-8,9%
T-049	10,17	Cable + Jabalina	9,87	9,22	10,09	6,6%	-2,2%
T-089	11,37	Cable + Jabalina	10,09	9,56	11,04	5,3%	-9,4%
T-123	14,52	Cable + Jabalina	13,06	11,98	14,36	8,3%	-10,0%

En la repotenciación de esta LT, además de las sustituciones mencionadas anteriormente, también fueron necesarias verificaciones de las condiciones existentes de las PAT de cada torre. Actividad que consistió, entre otras acciones, en la determinación de sus resistencias. La Tabla IV presenta las mediciones obtenidas a través del método completo de caída de potencial para algunas de las torres verificadas y con PAT Tipo 2. En función de las dimensiones de este tipo, fue definida una distancia D igual a 45 metros como valor padrón para la ubicación del electrodo de corriente (CP). Por otro lado, la Figura 5 presenta las curvas características de resistencia de cada torre (T-013, T-067, T-068, T-131). Estos resultados permiten verificar que las resistencias de PAT de estas torres, presentes en la última línea de la tabla, cumplen con las EE.TT. del proyecto.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
 23 y 24 de Junio 2022

Tabla IV: Mediciones de resistencia de PAT – método completo.

TORRE	T-013	T-067	T-068	T-131
DISTANCIA (m)	Ω [Ohms]	Ω [Ohms]	Ω [Ohms]	Ω [Ohms]
0,0 (0%)	Malla de PAT de la Torre			
4,5 (10%)	3,27	4,27	7,46	3,26
9,0 (20%)	4,1	5,02	8,06	5,09
13,5 (30%)	5,04	5,92	8,36	6,15
18,0 (40%)	5,88	6,81	8,68	6,96
22,5 (50%)	6,71	7,56	8,93	7,48
27,0 (60%)	7,99	8,51	9,23	8,38
31,5 (70%)	8,9	9,85	9,59	9,56
36,0 (80%)	10,33	11,34	10,08	11,74
40,5 (90%)	17,44	18,45	10,94	17,45
45,0 (100%)	Electrodo EC			
PAT (valor promedio)	7,87	8,64	9,25	8,47


Figura 5. Curvas de las resistencias en función de la distancia de las PAT.

La Tabla V presenta dos valores de resistencia por cada torre (T-051, T-152), para casos donde fueron necesarias ampliaciones, conforme sección 2.3.5 y de manera a atender las EE.TT. del proyecto. La primera medición correspondió a la verificación de las condiciones existentes de cada torre, donde se observa que por más que se cumpla la condición de la zona plana, los valores de 23,7 y 13,57 Ohms no atienden a las especificaciones [6]. No obstante, posterior a la primera ampliación (en conformidad con el proyecto del tipo de PAT) es posible observar que las dos condiciones son satisfechas: sus EE.TT. y la de la zona plana.

Tabla V: Mediciones de resistencia de PAT en condiciones existentes y posterior a una ampliación.

TORRE	PAT [Ohms]	Zona Plana [Ohms]		Verificación Zona Plana [%]		Tipo PAT / Observación
	a 9,3m	a 8,5m	a 10,1m			
T-051	23,7	22,7	25,4	4,2%	-7,2%	Básica / Requiere ampliación
	9,24	8,42	10,1	8,9%	-9,3%	Ira Ampliación / Atiende EETT
T-152	13,57	13,04	14,46	3,9%	-6,6%	Básica / Requiere ampliación
	9,58	8,97	10,36	6,4%	-8,1%	Ira Ampliación / Atiende EETT

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

3. CONCLUSIONES

Hasta la fecha de presentación del presente documento no fueron realizadas mediciones de resistencia de puesta a tierra en las torres de la nueva LT 500 kV SEMD-YGU y en las demás adecuaciones en 220 kV. Sin embargo, las consideraciones realizadas en este trabajo junto con las experiencias adquiridas a lo largo de la repotenciación de la LT 66 kV PBU-NAR, sirvieron como hincapié para determinar las metodologías a ser adoptadas en estas próximas mediciones. Cabe destacar que, según los proyectos de PAT de las líneas de la LPI 1542/19 presentados a ANDE, las posibilidades de utilizar algunos de los métodos alternativos mencionados en la sección 2.3.6 serán discutidas.

Las mediciones de resistencia requieren de un conjunto de procedimientos que fueron divididos en cuatro, siendo cada una de las partes igualmente importante: desde el proyecto (memoria de cálculo, mediciones de resistividad, definición de los tipos de PAT de la obra, tipificación de PAT); pasando por su ejecución en campo (siguiendo las buenas prácticas) y el procedimiento de medición adoptado (método a ser aplicado a cada tipo); hasta alcanzar la validación teórica/práctica (análisis de los resultados).

Los resultados de la Tabla III muestran una muy buena aproximación entre lo teórico (simulaciones de resistencia) y lo práctico (mediciones en campo) para los casos de sustitución de torre con nueva malla de puesta a tierra. Las discrepancias mínimas entre los valores pueden deberse a varios factores, como siendo: compactación del terreno, presencia de sales, humedad, temperatura, entre otros. Por consiguiente, en la fase de proyecto ejecutivo, el procedimiento puede considerarse como la mejor vía para seleccionar y dimensionar los diferentes tipos de PAT, así como para elaborar una buena tipificación de PAT para el proyecto – acciones que son consideradas previas a la ejecución en campo. Todavía cabe señalar que la tipificación realizada permite al proyectista agilizar las instalaciones y adquirir los insumos necesarios, evitando así sobrecostos.

Los resultados presentes en las Tablas IV y V posibilitaron la evaluación de las condiciones previas (o existentes) de las PAT de la línea en proceso de repotenciación. Estas evaluaciones, a través de mediciones de resistencia empleando los métodos propuestos (acotado y completo), permitieron determinar: la existencia de la malla a tierra, con su búsqueda y/o instalación de una nueva malla; el valor de la resistencia de PAT, a través del método de medición; y, en caso de no atendimento a las EE.TT., la determinación de la necesidad de ampliaciones.

El procedimiento de medición a ser empleado depende de las dimensiones del sistema de puesta a tierra. Por consiguiente, en el caso específico de la LT 66kV PBU-NAR, para las torres con puestas a tierra tipo 1 fue posible el empleo del método de 62%, mientras que para las del tipo 2 (en función de su mayor extensión) fue consensuado la utilización del método completo de la caída de potencial. Todavía cabe señalar que, para poder realizar una evaluación de la medición, es recomendable realizar el trazado de la curva característica.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

BIBLIOGRAFIA

- [1] Plan Maestro de Transmisión 2021-2030. ANDE. Paraguay, 2021. Páginas 3-10.
- [2] Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. IEEE Std 81, 2012. Páginas 19-30.
- [3] Medição de Resistência de Aterramento e Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento. ABNT NBR-15749, Brasil, 2009. Páginas 5-10.
- [4] Medição de Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo. ABNT NBR-7117, Brasil, 2009. Páginas 4-19.
- [5] EE.TT. de Obras del Lote N°2 de la LPI N°1542. Proyecto de Construcción e Interconexión de la SE Yguazú 500 kV. ANDE, Paraguay, 2019. Páginas 61-62.
- [6] EE.TT. de Obras del Lote N°3 de la LPI N°1483. Construcción e Interconexión de la SE Santa Rita en 220 kV. ANDE, Paraguay, 2019. Páginas 11, 20-21.
- [7] F. Casas Ospina. Tierras. Soporte de la Seguridad Eléctrica. Ed. ICONTEC, 2010. Página 190.
- [8] Puesta a Tierra para Estructuras Reticuladas en Suelo Normal con Todos sus Accesorios. LT 500 kV SE MD ITAIPU – SE YGUZÚ. ANDE, Paraguay, 2021. M-3000-36140-001-PL.
- [9] Puesta a Tierra para Estructuras Reticuladas en Suelo Rocoso con Todos sus Accesorios. LT 500 kV SE MD ITAIPU – SE YGUZÚ. ANDE, Paraguay, 2021. M-3000-36140-002-PL.
- [10] Diseño de Malla de Puesta a Tierra – Memoria de Cálculo. LT 500 kV SE MD ITAIPU – SE YGUZÚ. ANDE, Paraguay, 2021. M-3000-36140-001-MC.
- [11] Diseño de Malla de Puesta a Tierra – Memoria de Cálculo. Recapacitación de la LT 66 kV PARANAMBU – NARANJAL. ANDE, Paraguay, 2020. J-2350-36440-001-MC.
- [12] Tipificación de PAT por Estructura desde V8/1 al V12/7. LT 500 kV SE MD ITAIPU – SE YGUZÚ. ANDE, Paraguay, 2022. M-3000-36140-001-MD.
- [13] IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding. IEEE Std. 837, 2014. Páginas 3-8.
- [14] Interconexiones Aéreas en 220kV - Instalación del Sistema de Puesta a Tierra. Itaipu Binacional. 6424-DC-04007-E.
- [15] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80, 2013. Página 24.
- [16] Getting Down to the Earth – A practical guide to earth resistance testing. Megger, 2018. Páginas 61-72.
- [17] Tagg, G. F. “Measurement of Resistance of Physically Large Earth-Electrode System”. Proceedings of the IEEE, vol. 117, no. 11, pp. 2185-2190, 1970.