

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

Subestación Margen Derecha - Diagnóstico de las instalaciones de puesta a tierra y equipotencialización.

Rodrigo Eduardo Chaparro Moraes

Emilio Antonio Arteta Roman

ITAIPU Binacional

RESUMEN

La Subestación de la Margen Derecha de la Itaipú Binacional, construida a mediados de la década de los ochenta, constituye una de las más importantes subestaciones del Sistema Interconectado Nacional del Paraguay. Con más de 35 años de operación comercial, la malla de puesta a tierra ha pasado por sucesivas etapas de expansión como resultado del crecimiento en la capacidad de transformación y transmisión de la subestación en los últimos años.

Teniendo en cuenta que las mediciones de la puesta a tierra fueron realizadas a principios de los años ochenta, y que posteriormente no ha sido realizada ninguna otra verificación relevante del terreno, la ITAIPU en busca de mantener la seguridad de su personal técnico, la operatividad e integridad de sus instalaciones, ha requerido impulsar como parte de su programa de mantenimiento, un proyecto de diagnóstico del Sistema de Puesta a Tierra de la SEMD, que también incluyó mediciones en las torres aéreas de transmisión.

Realizar cualquier estudio en el sistema de puesta a tierra de una gran subestación en operación, fue y sigue siendo una desafío importante para la ingeniería, pues requiere metodologías de medición que tomen en cuenta las restricciones comunes a los sistemas eléctricos y las particularidades de cada instalación, lo que considera no solo la obligación de mantener la continuidad operativa y confiabilidad de la subestación o los factores de riesgo que pueden afectar la seguridad de las personas, pero también aspectos como el deterioro de la planta derivado de los años de funcionamiento o los riesgos de afectar a las distintas tecnologías de equipos sensibles existentes, entre otros.

La primera acción emprendida por la Itaipú constituyó en la realización de una auditoría especializada, cuyas acciones centrales se basaron en las tareas de inspección, relevamiento y medición de miles de puntos de puesta a tierra y equipotencialización existentes en las instalaciones de la SEMD. Mediante este proceso, además de permitir trazar la hoja de ruta para las siguientes tareas correctivas, ha permitido elaborar una importante tipificación de las fallas y defectos de puesta a tierra con su correspondiente estadística, entre ellas se encuentran algunos defectos durante la etapa de montaje, deterioro propio de las conexiones e instalaciones por sus años en servicio, etc.

Seguidamente, tras la identificación de todos los puntos auditados de equipotencialización que presentaban condiciones insatisfactorias, la Itaipú a través de su personal propio emprendió las correspondientes tareas correctivas. Las ejecuciones de las correcciones fueron realizadas conforme a las recomendaciones técnicas de los especialistas y a las normativas internacionales vigentes. En

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

cada punto fue llevado a cabo la medición y el registro de la resistencia de equipotencialización antes y después de cada intervención. De esta manera fue posible garantizar la calidad de la equipotencialidad corregida, contrastando las mediciones del antes y el después de cada intervención.

Esta experiencia ha contribuido con el enriquecimiento de los criterios y las buenas prácticas en puesta a tierra de aquellas instalaciones influenciadas por conductores energizados, así como ha permitido identificar y caracterizar los diversos tipos de defectos con sus respectivos grados de incidencia, además de implementar el método y los recursos necesarios para llevar a cabo las acciones correctivas correspondientes.

La metodología llevada a cabo por la auditoría especializada y las correspondientes acciones correctivas encaradas por la Itaipú en el reacondicionamiento de los sistemas de puesta a tierra y equipotencialización de la SEMD, propone ser un modelo para las empresas del sector eléctrico interesadas en tomar acciones que permitan salvaguardar la integridad de sus instalaciones y por sobre todo la de sus colaboradores.

PALABRAS CLAVES

Puesta a Tierra, Equipotencialidad, Subestación, Resistencia a tierra, Seguridad, Tensión de Paso, Tensión de Contacto, Itaipú.

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

1. ANTECEDENTES

La subestación margen derecha comprende un área aproximada de 700.000 m², está dividida en cuatro sectores y tres niveles de elevación del terreno; tiene una potencia instalada de 7000 MW; posee nueve líneas de transmisión a 500 kV, cuatro a 220 kV y tres a 66 kV

La información sobre el parámetro de diseño del sistema de puesta a tierra SEMD fue recopilada de las memorias y planos de los proyectos disponibles en los archivos de ITAIPU, conforme se presenta en la Tabla I:

Tabla I: Parámetros de diseño de la PAT de la SEMD

Estandar	IEEE 80/1976
Corriente de falla a tierra monofásica asimétrica	50 kA
Duración de la corriente de falla	0.5 s
Resistividad del suelo / Resistividad de la capa superficial de grava	400 Ω.m / 3000 Ω.m
Cobertura de capa de piedra triturada	15 cm
Conexiones a tierra	Soldadura exotérmica
Voltaje máximo de contacto/paso en circuito abierto	731 V / 2434 V
Máxima resistencia a tierra en las torres	20 Ω
Sistema de contrapeso	30 m
X/R	20
Área de conductor de PAT	240 mm ²
Electrodos (acero revestido de cobre)	3/4" x 3 m
Profundidad de la malla	0.6 m
Temperatura ambiente máxima	40°C

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

2. METODOLOGÍA

En la Tabla II se muestra un esquema de la metodología para el diagnóstico del sistema de puesta a tierra de grandes subestaciones energizadas, la cual corresponde para el caso de la SEMD. La metodología denominada “Triádica”, por sus tres pilares; antes, durante y después de las mediciones de campo, fue desarrollada por la empresa Segeléctrica Colombia.

Tabla II: Esquema de la metodología para el diagnóstico del sistema de puesta a tierra

PRELIMINARES	ACTIVIDADES DE CAMPO	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN
<ul style="list-style-type: none">· Antecedentes· Tipo y número de mediciones· Administración y planificación operativa· Personal y equipos· Seguridad laboral· Simulaciones y modelado	<ul style="list-style-type: none">· Inspección inicial· Medición de prueba· Medición de resistencia y equipotencialidad· Medida de tensiones de seguridad· Medición de la resistividad eléctrica del suelo· Medición de Corriente en la puesta a tierra· Registro de la información	<ul style="list-style-type: none">· Gestión de datos· Elaboración de estadísticas· Conclusión· Recomendaciones· Plan de ACCION· Priorizar la mejora actividades

3. MEDICIONES

3.1.1 Mediciones de prueba

Inicialmente, se realizó un estudio cuidadoso de los proyectos de sistemas de puesta a tierra disponibles en Itaipú, para luego pasar a un proceso de inspección y reconocimiento de las instalaciones, lo que permitió ajustes a nivel de planificación operativa.

Adicionalmente, se realizaron algunas mediciones de prueba para verificar la ausencia de tensiones peligrosas en los sistemas de puesta a tierra, donde se aumentó gradualmente la corriente, verificando que no se afectaran los componentes del sistema eléctrico ni se pusiera en riesgo la continuidad operativa del sistema.

3.1.2 Medida de equipotencialidad

Es la medida más importante para diagnosticar el sistema de puesta a tierra de una subestación, ya que verifica la integridad de las conexiones de baja impedancia entre todos los elementos que componen el sistema para evitar tensiones elevadas entre puntos interconectados.

Para estas mediciones se determinó como criterio aceptable para la resistencia de interconexión entre dos puntos, menos de 100 mΩ, con base en el estudio de las normas [1][2][3][4] y la vasta experiencia de los ingenieros de campo.

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

Se aplicó el método de Kelvin, que consiste en la inyección de corriente continua con una fuente regulada y la medición simultánea de voltaje para calcular la resistencia de interconexión (ver Figura 1).

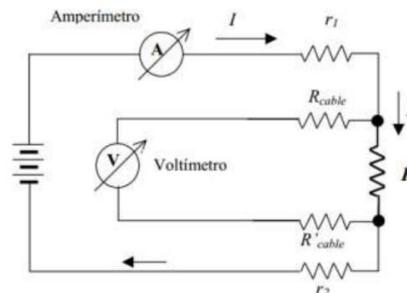


Figura 1: Método de las Cuatro puntas o Método de Kelvin

3.1.3 Medida de resistencia a tierra

Con base en las normas [1] [5] [6], se tomó como criterio que el valor de la resistencia de puesta a tierra para subestaciones de alta tensión debe ser menor a 1Ω . Se utilizó un generador de pulsos portátil que permitía inyectar un pulso de corrientes mayores a 100 A y registrar las señales de corriente y voltaje por medio de un osciloscopio conectado al mismo (ver Figura 2a).

En la SEMD, se midió la resistencia de puesta a tierra aplicando el método de caída de potencial con electrodo de corriente a aproximadamente 1700 metros, al otro lado del río en territorio brasileño (ver Figura 2b), y para ello, la infraestructura que se ha utilizado fue una línea de 13,8 kV que estaba inoperable y parcialmente desmontada.

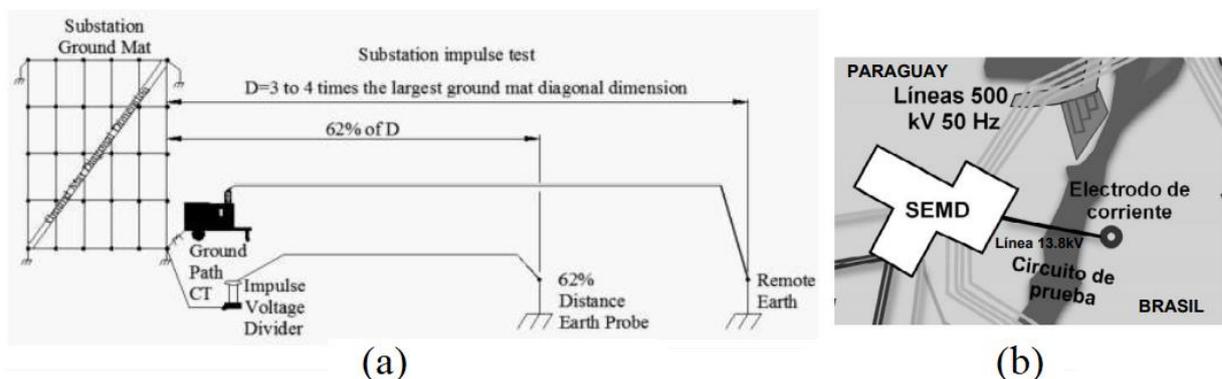


Figura 2: (a) Medición de resistencia de puesta a tierra con generador de impulsos (IEEE 81);
(b) Zona de montaje

3.1.4 Medida de tensión de paso y de contacto

En la SEMD se midieron las tensiones de seguridad para verificar que las tensiones de paso y de contacto fueran seguras en los puntos accesibles a las personas. Se realizaron 462 mediciones de tensiones de paso y de contacto en la subestación con un generador de impulsos de onda 8/20, en sitios escogidos en conjunto entre los especialistas, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

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

- Tiempos de construcción de la malla de puesta a tierra (existen cuatro zonas con diferentes periodos de construcción).
- Puntos críticos identificados en la medición de equipotencialidad.
- Distribución espacial (cubrimiento de todas las zonas de la subestación).
- Tipos de equipo (se escogieron equipos donde pudiese haber presencia de operarios).

El método utilizado fue el denominado “Método de Personal Simulado” [7], que se basa en inyectar pulsos de corriente y medir tensión. Cabe mencionar que para estas mediciones se aplicaron estándares tanto para equipos y procedimientos [7] como para umbrales [1].

3.1.5 Medición de la resistividad eléctrica del suelo

Las técnicas o método para medir la resistividad del suelo se describen en detalle en la norma [5]. En este proyecto se utilizó el método de Wenner, por ser el más aceptado, adecuado y práctico para diseños eléctricos.

Se realizaron tres mediciones alrededor de la subestación en diferentes direcciones. Con los datos obtenidos y el software disponible se obtuvo el modelado multicapa que se presenta en la Figura 6, a diferencia de las mediciones que se tomaban hace casi 40 años como una sola capa.

Para realizar estas mediciones se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- Los lugares de medición deben estar alejados de la subestación y las torres, para evitar interferencias.
- La separación máxima de electrodos fue de 8 m.
- Realizar mediciones Norte-Sur y Este-Oeste.
- Registrar las condiciones ambientales (temperatura y condiciones de humedad del suelo).
- Medir en tiempo seco

Además, se tomaron tres muestras de diferentes excavaciones para analizar el pH del suelo y complementar la caracterización del terreno, siguiendo el procedimiento de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria – EMBRAPA. El suelo mostró ser ligeramente ácido.

3.1.6 Medición de corriente de modo común

Se realizaron mediciones de corriente de modo común, utilizando pinzas amperométricas, aunque no estaban incluidas en el alcance del trabajo. Se llevaron a cabo como una rutina de control de riesgo para la realización de las mediciones contratadas y no como una investigación de la fuente de dichas corrientes. Para este fin se tomaron de manera aleatoria diferentes conductores de puesta a tierra de la subestación.

4. DIAGNÓSTICO

4.1.1 Medición de equipotencialidad

Se midieron 5600 puntos en todos los sectores de la subestación, de los cuales el 7,4% no cumplieron con el criterio del estándar (ver Tabla III).

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

Tabla III - Mediciones de equipotencialidad fuera de norma

TENSIÓN	SECTOR	No conectado a la puesta a tierra		Alta resistencia de interconexión con la PAT		No cumple criterio	
		Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
500kV	Sector 1	57	3.2%	76	4.3%	133	7,6%
	Sector 2	9	1.3%	27	3.9%	36	5,2%
	Sector 3	10	2.1%	28	5.9%	38	7,9%
	Sector 4	10	2.9%	14	4.1%	24	7%
220kV	Sector 2	13	1.6%	42	5.2%	55	6,8%
	Sector 3	20	3.8%	22	4.2%	42	8%
66kV	Sector 1	41	9.8%	0	0.0%	41	9,8%
	Barras	13	0.0%	21	6.3%	18	15,8%
	Otros	0	11.4%	30	4.4%	30	6,3%
Total de mediciones		173	3.1%	260	4.6%	417	7,4%

Los principales tipos de deficiencias o no conformidades que se encontraron durante la medición de equipotencialidad se enumeran a continuación:

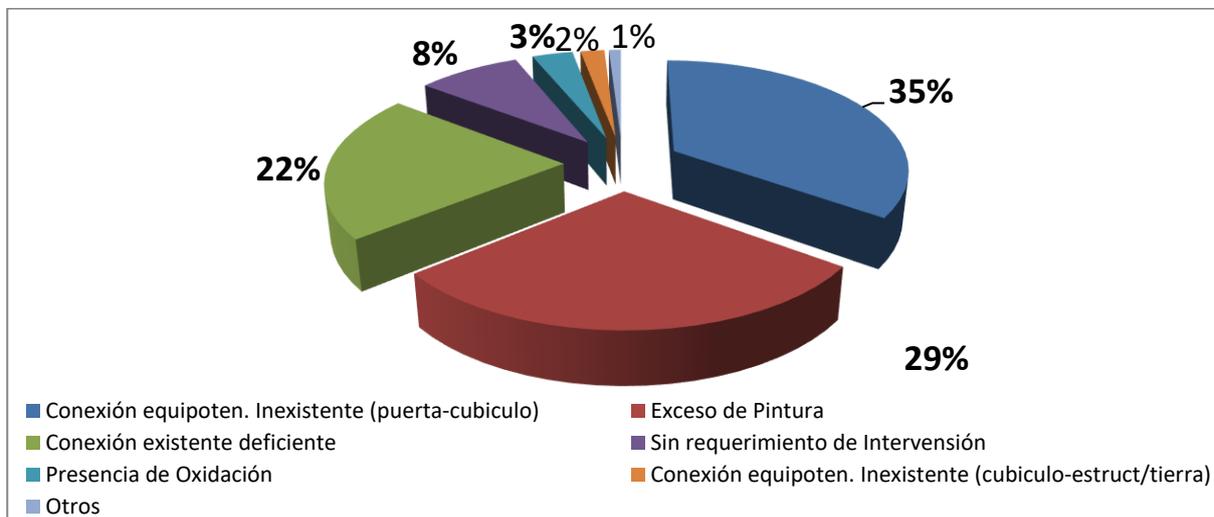
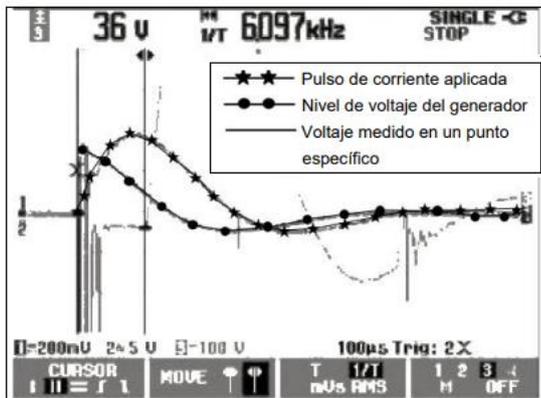


Figura 3: Tipos de deficiencias que se encontraron durante la medición de equipotencialidad.

4.1.2 Medición de resistividad

La Figura 4a muestra un oscilograma típico obtenido con el generador de pulsos en la medición de resistencia a tierra donde se midieron 36 V en un punto específico del campo cuando se aplicó un pulso de corriente de 145 A; y en la Figura 4b se presenta la curva de resistencia de puesta a tierra obtenida de la medida de campo. Dado que la resistencia de puesta a tierra SEMD medida fue de 0.254Ω, esto significa que cumple con los estándares y no varían considerablemente sus valores de diseño a pesar del tiempo ya transcurrido.

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



(a)



(b)

Figura 4: (a) Medida de resistencia típica (b) Curva de resistencia de puesta a tierra

4.1.3 Medida de tensión de paso y de contacto

Las mediciones se realizaron en puntos de riesgo para el personal de campo, tales como: área de operación de interruptores y seccionadores, alimentador de entrada y salida, cercos, sitios externos a la malla perimetral y portones de acceso.

El criterio aplicado para evaluar las medidas se basó en la tensión máxima de contacto a la que puede estar sometido un ser humano de 50 kg, cuando el tiempo de despeje de la falla es de 500 ms. El umbral de tensión se limitó a 164 V. Además, la ITAIPU se interesó en evaluar el caso específico del umbral de tensión para niños de 20 kg; debido a que unas torres de 8 líneas de interconexión en 500 kV pasan por lugares donde hoy en día existen colonias. El umbral de tensión se evaluó a 73,5 V. Dando como resultado que el 100% de las tensiones de paso cumple con el criterio de la IEEE 80 y en tensiones de contacto únicamente dos sitios no cumplen

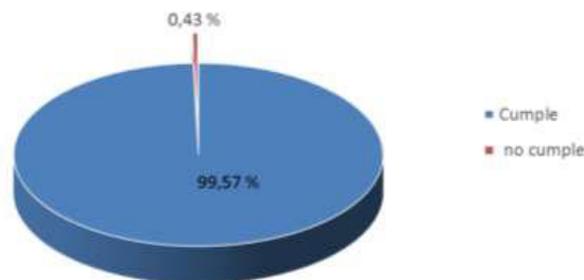


Figura 5: Medición de tensiones de seguridad SEMD

Es de anotar, que las memorias de cálculo de ITAIPU, que tienen como umbral tensión de contacto 731,6 V y de paso 2434,2 V se hicieron para circuito abierto y los umbrales establecidos para este informe se determinaron teniendo en cuenta la resistencia de un ser humano.

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

4.1.4 Medición de la resistividad eléctrica del suelo

En la SEMD se realizaron tres mediciones de resistividad en diferentes sentidos. En las Figuras 6a y 6b, se muestra el resumen de los resultados. Las dos primeras mediciones se tomaron en el costado Noroeste de la SEMD y se compilaron en un modelamiento y la segunda se realizó en el lado Suroeste.

Diagrama:

Diagrama:

R1=	92.12	H1=	1.95
R2=	348.73	H2=	Inf.

(a)

R1=	66.31	H1=	0.55
R2=	512.45	H2=	Inf.

(b)

Figura 6 – (a) Resultados resistividad lado noroccidental de la SEMD; (b) Resultado resistividad lado suroccidental de la SEMD

En conclusión, el suelo se caracteriza por la predominancia de arcillas caoliníticas y una acumulación residual de hierro y óxidos e hidróxidos de aluminio, una estructura estable, una baja relación limo/arcilla y un muy bajo contenido de minerales meteorizables, y muestran generalmente colores amarillentos o rojizos. Estas características hacen que el valor de resistividad no sufra variaciones significativas. En otras palabras, los valores obtenidos hace 40 años (400 Ω .m) y los actuales, son muy similares.

4.1.5 Medición de corriente común

La corriente máxima medida fue de 109,5 A y las normas establecen un máximo de 10 A (ver Figura 7). Este tipo de corrientes pueden presentarse por varios motivos como, por ejemplo, errores de cableado, desbalance de transformadores, asilamientos defectuosos y hace necesaria la realización de un estudio específico para determinar su fuente.

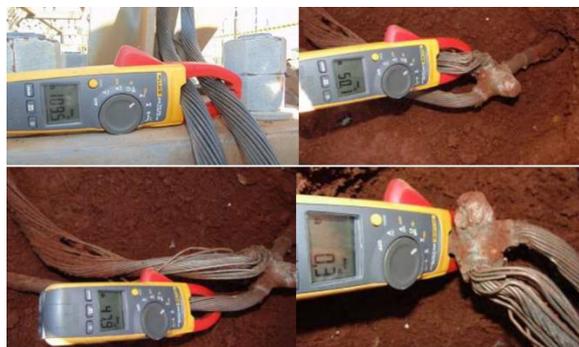


Figura 7 – Corrientes de modo común

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

5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las medidas de campo obtenidas fueron analizadas en base al cumplimiento de criterios normativos establecidos y de cálculos particulares del sistema en estudio.

El análisis de la información permitió:

- Caracterizar el estado real del sistema de puesta a tierra, rediseñar casos específicos e identificar puntos críticos o potencialmente peligrosos.
- Establecer prioridades de intervención correctiva en puntos críticos o peligrosos.
- Incluir acciones preventivas en los planes de mantenimiento existentes
- Unificar criterios de selección, adquisición y montaje de materiales.
- Elaborar el informe con conclusiones y propuestas de soluciones.
- Actualizar la información del sistema de puesta a tierra

6. CONCLUSIÓN

- Los resultados globales de las mediciones muestran el estado del Sistema de Puesta a Tierra, luego de más de 32 años de funcionamiento.

Tabla VI - Resultados Globales

SEMD	RESULTADOS	NIVEL SATISFACCIÓN
Equipotencialidad	92,60%	Parcial
Resistividad	$\rho_1=92.1\Omega.m$; $\rho_2=348.7\Omega.m$	-----
Resistencia de aterramiento	0,254 Ω	SI
Tensión de paso y de toque	99%	SI
Inspecciones en sitio	BUENO	SI

- Es posible realizar un diagnóstico completo del Sistema de Puesta a Tierra sin poner en riesgo a las personas, las instalaciones o el sistema eléctrico en funcionamiento, por complejo que sea.
- La metodología aplicada incluye los aspectos relevantes para auditar y certificar el Sistema de Puesta a Tierra de las subestaciones en operación, brindando una visión clara de las acciones de mantenimiento para garantizar un buen desempeño de la instalación.
- El éxito de este trabajo se basó en la excelente coordinación entre el personal de ITAIPU y los ingenieros responsables de las mediciones.

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

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Std 80. Guide for Safety in AC Substation Grounding”. December 2013.
- [2] IEEE Std 1100. Emerald Book, “Power and Grounding Electronic Equipment”. December 2005
- [3] IEC TR 61000-5-2. “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 2: Earthing and cabling”. November 1997
- [4] IEC 61000-4-6. “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields”. October 2013
- [5] IEEE Std 81, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”. December 2012.
- [6] ABNT NBR 15749 (2009). “Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento”. Agosto 2009
- [7] IEEE 81.2. “IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems”. December 1991.