



**Diseño electromecánico de la subestación SAEB 34,5kV;
Diseño de apantallamiento y malla de puesta a tierra**

Sara Lilith Echeverri Rojo

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesor

Nelson de Jesús Londoño Ospina, Doctor (PhD) Ingeniería eléctrica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Eléctrica
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	Echeverri Rojo [1]
Referencia	[1] S. L Echeverri Rojo, “Diseño electromecánico de la subestación SAEB 34,5kV; Diseño de apantallamiento y malla de puesta a tierra”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, Estilo IEEE (2020) 2023.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noe Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. OBJETIVOS	11
A. Objetivo general	11
B. Objetivos específicos	11
III. MARCO TEÓRICO	11
Subestación.....	11
Densidad de rayo a tierra.....	11
Distancia de descarga o radio de la esfera.....	12
Riesgo.....	12
Sistemas de protección contra rayos (SIPRA)	12
Dispositivo de protección contra sobretensiones DPS.....	12
Malla de puesta a tierra	12
Electrodo de puesta a tierra	13
Resistividad del suelo.....	13
Tensiones de paso, contacto y transferida.....	13
IV. METODOLOGÍA	15
V. RESULTADOS	16
Sistema de apantallamiento.....	16
Solución a Sistema de apantallamiento.....	18
Sistema de puesta a tierra	20
Solución a Sistema de puesta a tierra	22

VI. ANÁLISIS	24
VII. CONCLUSIONES	25
REFERENCIAS	26
ANEXOS.....	28

LISTA DE TABLAS

TABLA I CARACTERÍSTICAS GENERALES DE ZONAS.....	17
TABLA II CARACTERÍSTICAS INICIALES DE LA RED ELÉCTRICA	17
TABLA III CARACTERÍSTICA DE LA ZONA.....	18
TABLA IV RIESGO OBTENIDO EN ÁREAS EVALUADAS.....	19
TABLA V CONSIDERACIONES DE DISEÑO SPT	21
TABLA VI MEDIDAS RESISTIVIDAD DEL TERRENO	21
TABLA VII TENSIONES ADMISIBLES	23
TABLA VIII TENSIONES CALCULADAS	23

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Zonas evaluadas de la Subestación SAEB 34,5kV	16
Fig. 2. Contorno de apantallamiento	19
Fig. 3. Contorno de apantallamiento con ocho puntas captadoras	20
Fig. 4. Áreas evaluadas en el SPT.....	20
Fig. 5. Configuración de la malla de puesta a tierra.....	22

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SPT	Sistema de Puesta a Tierra
C_d	Factor de localización
C_e	Factor ambiental
DDT	Densidad de descargas a tierra
h_Z	Factor de incremento de pérdida debida a daños físicos por presencia de condiciones especiales peligrosas
H	Altura de la edificación
H_a	Altura de la estructura de donde proviene la acometida de servicio.
H_b	Altura del punto de la estructura por donde ingresa la acometida de servicio.
H_c	Altura de los conductores del servicio sobre el suelo
K_{S1}	Factor de eficacia del apantallamiento de la estructura
K_{S2}	Factor de eficacia del apantallamiento interno de la estructura
K_{S3}	Factor de características del cableado interno
K_{S4}	Factor de soportabilidad al impulso tipo rayo del sistema a proteger
L	Largo de la estructura
L_c	Longitud de la sección de la acometida de servicio
L_f	Pérdidas por daños físicos
L_o	Pérdidas por fallas en sistemas internos
L_t	Pérdidas por lesiones a seres vivos por tensiones de paso y contacto
N_D	Número de eventos peligrosos debido a impactos directos a la estructura
N_I	Número de eventos peligrosos por descargas cercanas al servicio
N_L	Número de eventos peligrosos debido a descargas sobre el servicio
P_A	Probabilidad de lesiones a seres vivos a causa de tensiones de paso y contacto por descargas directas a la estructura
PLD	Probabilidad de falla de sistemas internos (impactos al servicio)
PSPD	Probabilidad de falla en sistemas internos cuando el servicio cuenta con
DPSs	

r_f	Factor reductor de pérdida debido a daños físicos el cual depende del riesgo de fuego de la estructura
r_a & r_u	Factor reductor de pérdida de vidas por características constructivas del piso
R_A	Componente de riesgo (lesiones a seres vivos por tensiones de paso y contacto-Impacto en la estructura)
R_B	Componente de riesgo (daños físicos por chispas dentro de las estructura - Impacto en la estructura)
R_U	Componente de riesgo (lesiones a seres vivos por tensiones de paso y contacto -Impacto en el servicio)
R_V	Componente de riesgo (daños físicos -Impacto en el servicio)
r_p	Factor reductor de pérdida debido a daños físicos el cual depende de medidas de protección tomadas para reducir las consecuencias de incendio.
R1	Riesgo de Pérdida de Vida Humana en la estructura
R2	Riesgo de pérdida de servicios
W	Ancho de la estructura
α_r	Factor De Corrección Por Temperatura
T_m	Temperatura Máxima Nodos De La Malla
T_a	Temperatura Ambiente
ρ_r	Coficiente Térmico de Resistividad a Temperatura Referencia
TCAP	Capacidad Térmica Por Unidad de Volumen
If	Corriente Asimétrica de Falla RMS
K_o	Temperatura
T_c	Tiempo Máximo Despeje Falla
A	Sección Transversal Conductor calculada

RESUMEN

El diseño electromecánico de una subestación comprende varias medidas de protección para disminuir el riesgo de accidentes dentro y fuera de esta misma, tanto para equipos como para personas; por lo anterior, diseños como el sistema de apantallamiento y el sistema de puesta a tierra son esenciales para la seguridad de este objetivo. En este trabajo, se diseña el sistema de apantallamiento de la Subestación Sistema de Almacenamiento de Energía con Baterías SAEB La Arenosa 34,5 kV implementando la norma NTC 4552-2 [1] para el análisis de riesgo ante posibles pérdidas de vidas humanas y servicios, con esta guía se concluyen las medidas de protección que se deben tomar para conseguir el objetivo de estos diseños, además se elabora el sistema de puesta a tierra siguiendo el estándar IEEE Std. 80 [2], en el cual, mediante el software CYMGRND, se encuentran las tensiones de paso, contacto y elevación de tensión admisibles dentro de la subestación, además de la resistencia de puesta a tierra.

Palabras clave — sistema de apantallamiento, sistema de puesta a tierra, análisis de riesgo, subestación.

ABSTRACT

The electromechanical design of a substation includes several protection measures to reduce the risk of accidents inside and outside it, both for equipment and people; Therefore, designs such as the shielding system and the grounding system are essential for the safety of this objective. In this work, the shielding system of the SAEB La Arenosa 34.5 kV Battery Energy Storage System Substation is designed, implementing the NTC 4552-2 [1] standard for risk analysis in the event of possible loss of human life and services, with this The guide concludes the protection measures that must be taken to achieve the objective of these designs, and the grounding system is also developed following the IEEE Std. 80 [2] standard, in which, through the CYMGRND software, the grounding voltages are found. allowable step, contact and voltage rise within the substation, in addition to the grounding resistance.

***Keywords* — shielding system, grounding system, risk analysis, substation.**

I. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía es indispensable hoy día para la cotidianidad de las personas e industrias, por lo que todo el proceso asociado a la obtención de energía eléctrica para el usuario final debe estar ligado a tres palabras: la seguridad, la cual es la capacidad de un sistema de energía en un momento dado para realizar su función de suministro en caso de falla; la confiabilidad, que se refiere a la capacidad de un sistema a cumplir con su función de suministro de energía, por último, la flexibilidad operativa, que permite limitar las consecuencias en caso de una falla en una parte del sistema [3]

Las subestaciones son según [3], la exteriorización física de un nodo del sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía se transforma a niveles adecuados de tensión para su transporte, distribución o consumo, está conformada por un conjunto de equipos utilizados para controlar el flujo de energía y garantizar la seguridad del sistema por medio de dispositivos de protección; juegan un papel fundamental en la matriz energética que actualmente pretende diversificarse con la penetración de energías renovables, como la energía solar y eólica, estas energías promueven una ruta de transición ya establecida en Colombia y se caracterizan por su necesidad de la radiación del sol y del flujo del aire respectivamente, lo anterior implica fluctuaciones y se necesita de un buen manejo de la energía, por lo que es inevitable acudir a el almacenamiento y así, poder cargar mediante electrónica de potencia un banco de baterías por ejemplo.

En la literatura hay estudios asociados a la incorporación de las baterías para aprovechar la energía, como por ejemplo en [4] se analizó el comportamiento operativo de la energía solar y un banco de baterías simulando perfiles de generación solar, dichos perfiles se integran usando el almacenamiento de la energía y paralelamente optimizando el uso de esta; en [5] se estudia el control de bancos de baterías para hacer un apropiado manejo de la energía, haciendo uso de estrategias para almacenar adecuadamente la generación fotovoltaica, se plantea un ajuste para compensar la variabilidad de las plantas solares y se simulan los diferentes controles aplicados para apreciar la operación esperada; y el caso de [6] que mediante un sistema de almacenamiento conectado a una planta solar estudia evitar que el suministro de la energía sea intermitente, describen y simulan la topología en MATLAB de la electrónica de potencia utilizada y ejercen el control de dicho caso de estudio con la red.

El presente caso de estudio se enfoca en una subestación en fase de diseño en la que su utilizará un banco de baterías conectado a la red para servir de respaldo a la red del departamento del Atlántico, región que posee inconvenientes por la insuficiencia de suministro de energía. Estará situado en Barranquilla. Se planea diseñar dos componentes importantes para preservar la seguridad y confiabilidad de una subestación, el apantallamiento y la malla de puesta a tierra de un nodo del Atlántico. Para ejecutar los diseños se realizará un análisis de riesgo contemplando la norma NTC 4552-2 [1] y lo relacionado con el método electro geométrico de la esfera rodante descrito en la NTC 4552-3 [7]; por otro lado, se diseñará la malla de puesta a tierra siguiendo la referencia IEEE Std. 80 y a su vez utilizando el software CYMGRND orientado a diseñar mallas de puesta a tierra, esto, para obtener los resultados del diseño a plantear.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar el apantallamiento y la malla de puesta a tierra con herramientas como AutoCAD y CYMGRND respectivamente para la seguridad de equipos y personas dentro de la subestación SAEB La Arenosa 34,5 kV.

B. Objetivos específicos

Realizar el análisis de riesgo para la Subestación Sistema de Almacenamiento de Energía con Baterías SAEB La Arenosa 34,5 kV.

Diseñar y validar el apantallamiento partiendo de los criterios de diseño y del análisis de riesgo de la Subestación SAEB La Arenosa 34,5 kV.

Realizar y validar el diseño de la malla de puesta a tierra en el software CYMGRND.

III. MARCO TEÓRICO

Subestación

Una subestación eléctrica es según [8] la interconexión de un conjunto de equipos que dadas sus características sirven para hacer la transferencia de la energía dentro de un sistema de potencia, esto, teniendo como principio de funcionamiento la seguridad del suministro de este servicio con base a dispositivos automáticos de protección para la posible distribución de energía por caminos alternos en caso de contingencias.

Densidad de rayo a tierra

Es el número promedio de descargas a tierra por unidad de área y por unidad de tiempo en un sitio determinado [3]. En la NTC 4552-1 [9] se encuentra el mapa geográfico de Colombia con la información del nivel cerámico con el que se puede calcular de densidad de rayo a tierra o DDT, por ejemplo, la densidad promedio para la ciudad de barranquilla es de 1 [strokes/km²-año].

Distancia de descarga o radio de la esfera

Es la longitud del último paso de la guía de un rayo, bajo la influencia de la tierra o de un terminal que lo atrae. La NTC 4552-3 [7] expresa la relación que hay entre el radio de la esfera con la clase de SIPRA la cual es determinada por el nivel de protección contra rayos y de las condiciones de la estructura a proteger, también expresa la relación que hay entre el nivel de protección contra rayos NPR y el radio de la esfera rodante.

Riesgo

El riesgo es una medida asociada el valor que se le puede asignar al objetivo a proteger frente a la posibilidad de pérdida del objeto tal [1].

Sistemas de protección contra rayos (SIPRA)

El SIPRA es un sistema que sirve por medio de sistemas de protección interno(ej. equipotencialización) y externo(ej. puntas captadoras) ser un amortiguador para disminuir los daños sobre estructuras por descargas atmosféricas [1].

Dispositivo de protección contra sobretensiones DPS

Los DPS sirven de limitadores de sobrevoltaje para una subestación, debido a su naturaleza este puede proteger de manera adecuada los equipos ante sobretensiones por maniobra o por descargas atmosféricas que se pueden producir por eventos aleatorios en estos centros de transformación.

Malla de puesta a tierra

La malla de puesta a tierra es un sistema conformado por electrodos de tierra que consiste en un número de conductores desnudos interconectados y enterrados en tierra, proporcionando una tierra común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente en un lugar específico [3]. La malla de puesta a tierra cumple con muchas funciones que tienen un propósito fijo, proteger a seres vivos y equipos de la subestación o lugar a proteger. Una por una son las siguientes [3]:

Proteger los individuos, limitando las tensiones de toque y paso a valores aceptables en las vecindades de una instalación durante condiciones de cortocircuito.

Proporcionar un medio para disipar corrientes en la tierra bajo condiciones normales o de cortocircuito, sin exceder ningún límite operacional de los equipos o afectar adversamente la continuidad del servicio.

Asegurar el buen funcionamiento de los equipos de protección de una red, lo cual garantizará el adecuado aislamiento de las porciones de dicha red que estén en falla.

Minimizar la interferencia de los circuitos de transmisión y distribución sobre los sistemas de comunicaciones y control.

Mantener ciertos puntos de una red a un nivel de potencial definido con referencia a la tierra.

Impedir que los soportes de los equipos alcancen un nivel de potencial diferente al de la tierra.

Evitar las descargas eléctricas estáticas en atmosferas explosivas.

Electrodo de puesta a tierra

Con base en [2], se trata de un conductor que se incrusta en la tierra para, por medio de esta, drenar las corrientes.

Resistividad del suelo

Para [10] representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un extracto del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ωm), es inversa a la conductividad. Para [3] es la tensión que se mide en los extremos de un cubo de 1 m(V/m) dividido por la corriente que atraviesa la sección cuadrada del cubo de 1 m.

Dentro de este concepto se pueden catalogar los tipos de suelo que se pueden encontrar comúnmente, este tipo de suelos describen cómo son las capas que hay en este, por ejemplo, se encuentra la magnetita con resistividad muy baja y el granito con una resistividad mucho más alta

Tensiones de paso, contacto y transferida

Las tensiones de paso se refieren a la diferencia de tensión que puede experimentar una persona con una separación entre sus pies de un metro.

Las tensiones de contacto [3] es la diferencia de tensión entre el GPR y la tensión en la superficie en el punto en donde una persona se para, mientras al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura de puesta a tierra.

La tensión transferida es un caso especial de la tensión de contacto donde una tensión es transferida dentro o fuera de la subestación [3].

IV. METODOLOGÍA

El presente informe estará dividido en dos enfoques esenciales de un diseño electromecánico de una subestación, estos son el sistema de apantallamiento y el sistema de puesta a tierra de la subestación SAEB; en donde en primera instancia se encontró la detección de las características relevantes de la subestación, las características del entorno del proyecto, las particularidades de la red eléctrica que contempla la subestación; lo anterior con un previo estudio de la normativa NTC 4552-2 [1] concerniente al análisis de riesgo para el sistema de apantallamiento. El segundo ítem que se desarrollo fue el de realizar el análisis de riesgo de la subestación subdividida en áreas para establecer el nivel de protección de la subestación, el radio de la esfera y la coordinación de protecciones; con esto, se implementó el posicionamiento estratégico de las puntas captadoras dentro de la subestación en el software AutoCAD para proteger completamente los equipos de patio y edificio de control, y así poder diseñar el apantallamiento con respecto a los criterios electromecánicos.

Para el sistema de puesta a tierra, se procedió a indicar los datos como la resistividad del terreno de la subestación para simular el perfil del suelo con el software CYMGRND, además de datos para la selección del calibre del conductor de la malla de puesta a tierra empleando la metodología descrita en la norma IEEE Std.80, teniendo en cuenta la normativa establecida en el RETIE. Posteriormente, se diseñó la malla de puesta a tierra en el software CYMGRND con ayuda de los criterios electromecánicos del proyecto y con los datos de entrada del programa definidos con antelación (resistividad, corriente de falla, área de la subestación), finalmente se procedió a verificar que las tensiones de transferencia, de toque y de paso cumplan con los requerimientos indicados en la norma IEEE Std.80. y así poder concluir y analizar las sensibilidades ante los componentes esenciales para cada uno de estos sistemas

Para el diseño del sistema de apantallamiento y puesta a tierra de la subestación SAEB, se deben garantizar la protección de las personas y las edificaciones que puedan quedar expuestas a los efectos de una eventual descarga eléctrica atmosférica, por esta razón se han desarrollado normas internacionales como la IEC 62305 “Protection against lightning”, la NFPA 780 “Standard for the Installation of Lightning Protection System” y la ANSI/IEEE 80 “Guide for Safety in A.C. Substation Grounding” que plantean metodologías para el diseño seguro de estos sistemas. A nivel nacional el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) toma de la norma NTC 4552

“Protección contra Descargas Eléctricas Atmosféricas” algunos requisitos básicos que deben cumplir los sistemas de protección contra descargas atmosféricas. El estudio del sistema apantallamiento se realizó siguiendo lineamientos dados por la NTC 4552-2 [1] y NTC 4552-3 [7] y el sistema de malla de puesta a tierra se plantea de acuerdo a la IEEE Std 80.

V. RESULTADOS

La configuración de la subestación SAEB cuenta con un módulo o unidad de sistema de almacenamiento de energía compuesto por seis racks de baterías con capacidad de entrega de energía en 1 hora; un sistema de conversión compuesto por 2 inversores cada uno con capacidad de 2.000kVA y un transformador de medida tensión 800V/34,5kV en aceite. La esquematización de tal configuración consta de dos módulos de almacenamiento que se conectan a un sistema de conversión y mediante un circuito subterráneo se agrupan varios sistemas de conversión; Además, se cuenta con el edificio de control en donde se tendrá un tren de celdas 34,5kV.

Sistema de apantallamiento

Con base en lo anterior, en primera instancia se formula el sistema de apantallamiento, introduciendo las características generales para estimar el riesgo, el cual concluye las medidas de protección para minimizarlo; por lo tanto, se evalúa la subestación en diferentes zonas como se muestra en la Fig. 1.

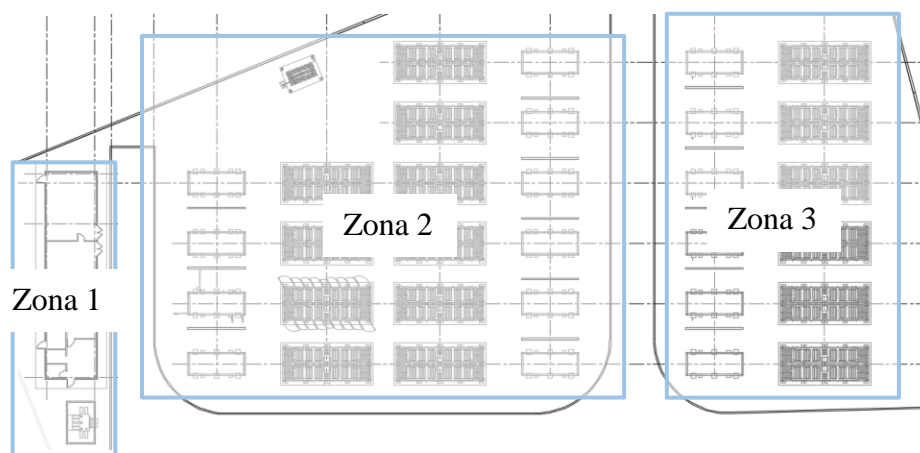


Fig. 1. Zonas evaluadas de la Subestación SAEB 34,5kV

A continuación se presenta en la TABLA I, TABLA II y TABLA III, las características necesarias para conocer los riesgos calculados asociados a las pérdidas de vidas humanas y pérdidas inaceptable de servicios públicos, teniendo en cuenta medidas de protección.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE ZONAS

Parámetro	Descripción	Símbolo	Valor
Factor de localización.	Objeto rodeado de objetos o arboles de igual altura o menor	Cd	5,00E-01
Nivel de protección contra rayos.	Estructura protegida (IV)	PB	2,00E-01
Probabilidad de lesiones a seres vivos a casasa de tensiones de paso y contacto por descargas directas a la estructura.	Equipotencialización efectiva del suelo	PA	1,00E-02
Densidad de descargas a tierra.	Rayos/km ² /año	DDT	2,97E+00
Resistividad del suelo.	Resistividad del terreno donde la acometida es enterrada	ρ	5,90E+01

TABLA II
CARACTERÍSTICAS INICIALES DE LA RED ELÉCTRICA

Parámetro	Descripción	Símbolo	Valor
Altura(m)	Subterráneo	Hc	0,00E+00
Altura fuente de acometida(m)	Altura de la estructura de donde proviene la acometida de servicio	Ha	0,00E+00
Altura ingreso de acometida (m)	Altura del punto de la estructura por donde ingresa la acometida de servicio	Hb	0,00E+00
Transformador	Transformador con devanado primario y secundario desacoplado eléctricamente	Ct	1,00E+00
Factor de ubicación de la línea	Objeto rodeado de objetos o arboles de igual altura o menor	Cd	5,00E-01
Factor ambiental de la línea	Suburbano (edificaciones menores a 10 metros de altura)	Ce	5,00E-01
Apantallamiento de la línea	Cable apantallado	PLD	8,00E-01
Factor de características del cableado interno	Cable apantallado, $1 < R_s \leq 5 \Omega/\text{km}$	Ks3	2,00E-04

Parámetro	Descripción	Símbolo	Valor
Factor de soportabilidad al impulso tipo rayo del sistema a proteger	Uw	Ks4	1,00E+00
Probabilidad de daño de sistemas internos por impacto directo a la estructura	Con nivel de protección contra rayos (IV)	PSPD	3,00E-02

TABLA III
CARACTERÍSTICA DE LA ZONA

Parámetro	Descripción	Símbolo	Valor
Tipo de la superficie del piso	Gravilla, tapete	ru, ra	1,00E-04
Riesgo de fuego	Alto	rf	1,00E-01
Riesgos especiales	Nivel bajo de pánico	hz	2,00E+00
Medida de prevención para reducir consecuencias de fuego	Con medida de prevención, extintor, alarma manual, hidrantes, ruta de evacuación	rp	5,00E-01
Pérdidas por tensiones de paso y toque	Todos los tipos de personas fuera de la estructura	Lt	1,00E-02
Pérdidas por daños físicos	Industrial, comercial, escuelas	Lf	5,00E-02
Pérdidas debidas a fallas en sistemas internos	Aplica	Lo	1,00E-03

Solución a Sistema de apantallamiento

De acuerdo con la metodología consignada en [1], los riesgos asociados a las pérdidas de vidas humanas y pérdidas de servicios calculados siguiendo dichos pasos, deben ser inferiores a los riesgos tolerables consignados en la norma NTC 4552-2 [1], esta comparación es indicada en la TABLA IV para cada zona evaluada de la subestación SAEB. Como parámetro más importante a concluir, se destaca el radio de la esfera para el cual el riesgo se encuentra debajo de lo establecido, además de este, hay más medidas de protección que se deben implementar, las cuales son significantes en los valores alcanzados en los cálculos:

Sistema de protección externa: Se requiere Sistema de Protección Externa Contra Rayos con Nivel de protección IV (55 m de radio de la esfera rodante bajo NTC 4552-3 [7]).

Dispositivos de protección contra sobretensiones en sistema eléctrico de baja tensión: Se requieren DPS coordinados con Nivel de Protección IV según la NTC 4552-2 [1].

Dispositivos de protección contra sobretensiones en sistema de telecomunicaciones: Se requieren DPS coordinados con Nivel IV de Protección IV según la NTC 4552-2 [1].

Medida de prevención para reducir consecuencias de fuego: Una de las siguientes prevenciones, extintores manuales; instalaciones de alarma manual; hidrantes; compartimientos contra fuego; rutas de evacuación.

TABLA IV
RIESGO OBTENIDO EN ÁREAS EVALUADAS

Riesgo	Riesgo calculado	Riesgo calculado	Riesgo calculado	Riesgo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	tolerable
Riesgo de pérdida de vida humana	2,61E-06	7,42E-06	5,60E-06	1.00E-05
Riesgo pérdida inaceptable de servicios	2,50E-05	9,81E-05	6,20E-05	1,00E-03

Para el proceso de simulación de protección externa se utiliza AutoCAD. A continuación, se presenta cada zona evaluada, situadas bajo el contorno de color azul, dicho manto está diseñado con un Nivel de Protección III y puede apreciarse en la Fig. 2 y Fig. 3, lo que implica una esfera de radio de 50m, más conservador que el requerido por el nivel de riesgo dado por el análisis de riesgo de la NTC 4552-2 [1]. El apantallamiento se formuló con ocho puntas captadoras con una altura de 50 cm, tales puntas se sitúan sobre postes de diferentes alturas, cuatro de estos postes son de 10 m cada uno y los cuatro restantes de 12 m cada uno.

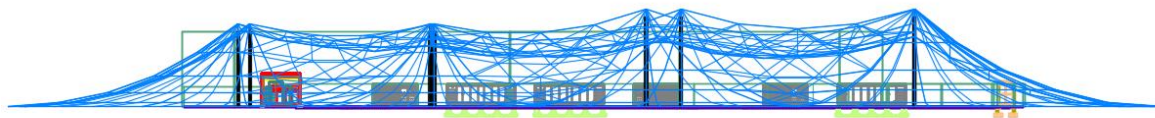


Fig. 2. Contorno de apantallamiento

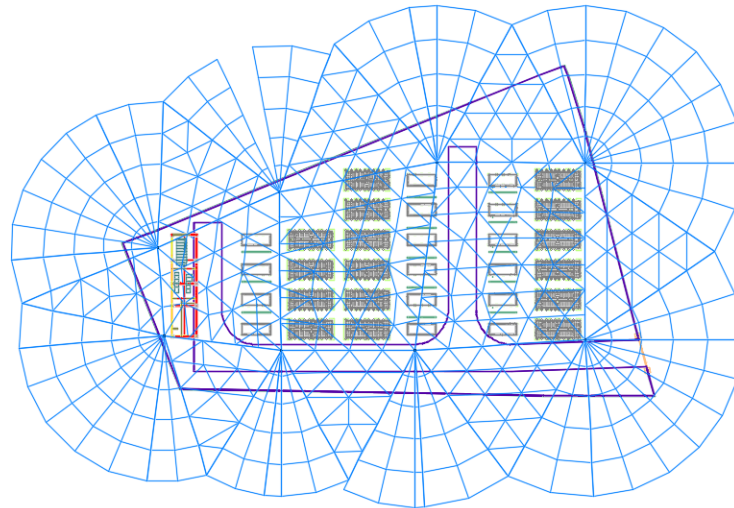


Fig. 3. Contorno de apantallamiento con ocho puntas captadoras

En ANEXOS, se podrá observar el posicionamiento de las puntas captadoras en la disposición física de la subestación, dicho planteamiento debe tener en cuenta posibles interferencias con demás diseños dentro de la subestación.

Sistema de puesta a tierra

Para evaluar el sistema de puesta a tierra (SPT) se trazan nuevas áreas de subestación como se muestra en la Fig. 4. Se evalúa alrededor del edificio; el área indicada como ST-G1, ST-G2, ST-G3 corresponden a la ubicación de los equipos del sistema de conversión; el área indicadas como SC-G1, SC-G2, SC-G3 corresponde a la ubicación del banco de baterías.

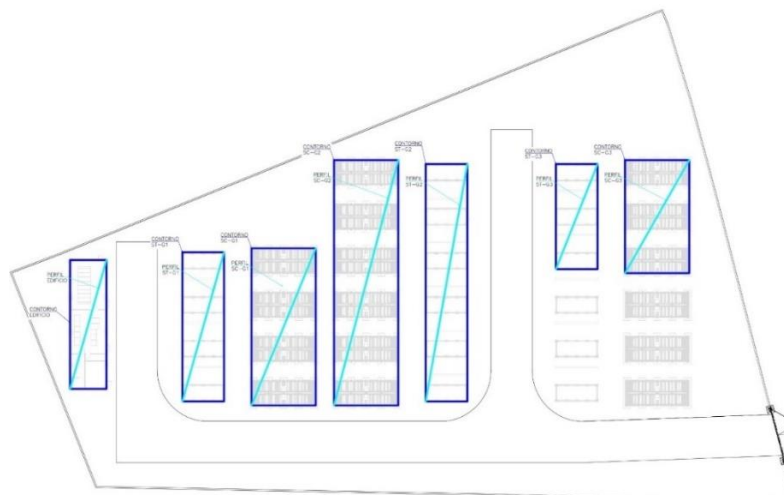


Fig. 4. Áreas evaluadas en el SPT

Para el sistema de puesta a tierra (SPT) se toman las consideraciones de diseño mostradas en la TABLA V, estos valores son ingresados al software CYMGRND junto con las medidas de resistividad del suelo indicadas en la TABLA VI.

TABLA V
CONSIDERACIONES DE DISEÑO SPT

Consideración	Valor
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa acabado de patio	0,1 m
Resistividad de la capa acabado de patio	5000 Ω-m
Tiempo de despeje de la falla	0,4 s
Corriente de cortocircuito para equipos y conductores	25 kA
Máxima corriente de cortocircuito prevista	22,6 kA
Máxima tensión de servicio fase-fase VmaxF-F	22,6 kA

TABLA VI
MEDIDAS RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Ruta de medida	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
ρ ruta 1 [Ω-m]	61,80	72,70	82,00	82,00	76,10	79,40
ρ ruta 2 [Ω-m]	47,80	45,70	53,20	54,20	49,90	47,90
ρ ruta 3 [Ω-m]	93,70	71,80	58,60	62,20	55,70	71,10
ρ ruta 4 [Ω-m]	79,80	49,70	38,80	32,10	33,80	33,30
ρ ruta 5 [Ω-m]	77,60	57,10	47,80	57,60	51,70	45,30
Promedio	72,14	59,40	56,08	57,62	53,44	55,40

Paralelamente, para el sistema de pues a tierra es necesario la selección del conductor que se empleará, esto según la metodología IEEE Std. 80, en el cual se determina el área (mm²) mínima del conductor que soportará las corrientes de cortocircuito a partir de la siguiente expresión.

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (1)$$

Una vez hecho el cálculo, el calibre del conductor mínimo debe tener una sección igual o mayor a $50,72\text{mm}^2$ que soportaría la corriente de falla a disipar por la malla, el conductor 2/0 AWG tiene una sección aproximada de $67,45\text{mm}^2$. Se selección el conductor calibre 2/0 AWG para la malla de puesta a tierra y para aterrizar los equipos.

Conocidas las consideraciones para el análisis de riesgo del sistema de apantallamiento, y las características bajo las cuales se encuentra el sistema de puesta a tierra de la subestación SAEB, se encuentra que ambos sistemas deben cumplir con ciertas características, las cuales serán el propósito de esta sección.

Solución a Sistema de puesta a tierra

Con los datos de entrada del programa definidos (resistividad, corriente de falla, área de la subestación) se procede con el diseño de la malla de puesta tierra de la subestación, donde se verifica que las tensiones de superficie, de toque y de paso cumplan con los requerimientos indicados en la norma IEEE Std.80, además, se calcula el valor de la resistencia de puesta a tierra.

En la Fig. 5 se muestra la configuración de conductores y electrodos simulada en el software.

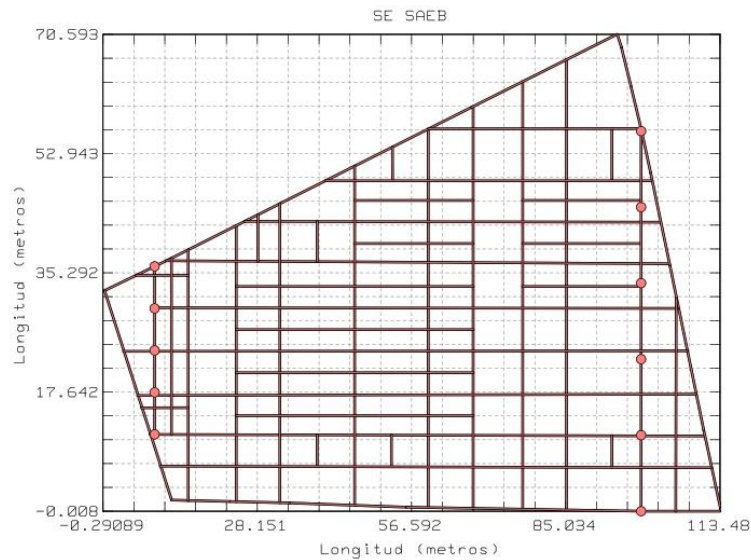


Fig. 5. Configuración de la malla de puesta a tierra

De acuerdo con la configuración indicada se muestran los valores admisibles y la resistencia de puesta a tierra en la TABLA VIII, en ANEXOS se muestra los resultados del software.

TABLA VII
TENSIONES ADMISIBLES

Descripción	Valor
Elevación del potencial de tierra	7889.63 V
Tensión máxima de paso admisible	4003,71 V
Tensión máxima de contacto admisible	1138,49 V
Resistencia de tierra calculada	0.338Ω

A su vez, se calculan las tensiones de paso, de contacto y la elevación de potencial para cada zona, los resultados obtenidos se indican en la TABLA VIII.

TABLA VIII
TENSIONES CALCULADAS

Descripción	Elevación del potencial de tierra	Tensión de paso	Tensión de contacto
Edificio de control	7341,62 V	179,96 V	995,57 V
SC-G1	7301,09 V	112,18 V	772,76 V
SC-G2	7414,05 V	154,83 V	857,9 V
SC-G3	7164,92 V	119,23 V	1014,13 V
ST-G1	7235,73 V	142,03 V	828,61 V
ST-G2	7492,88 V	133,8 V	721,75 V
ST-G3	7440,94 V	131,46 V	612,04 V

VI. ANÁLISIS

Es de importancia resaltar que ante la probabilidad de ocurrencia de lesiones de seres vivos, daños físicos o fallas en los sistemas eléctricos o electrónicos de la subestación, la evaluación de riesgo es indispensable para aminorar las pérdidas, ya sea de vida humana, servicios públicos, patrimonio culturales o económicas. Es por lo anterior que los resultados obtenidos del sistema diseñado, contienen ciertas medidas de seguridad que incluyen desde un sistema de protección interno (Sistema de puesta a tierra para equipotencializar la subestación), hasta un sistema de protección externo (Sistema de apantallamiento). Para lo anterior es primordial realizar en primera instancia un análisis de riesgo sin ningún medio de protección, para conocer a profundidad si es realmente necesario incorporar estos medios de no propagación de probabilidad de las pérdidas; una vez hecha la comprobación, es necesario en caso de que los riesgos sean mayores que los riesgos tolerables, comenzar con el radio de esfera más grande (menos riguroso) e ir comprobando los resultados de los riesgos obtenidos. Es importante resaltar que las medidas de protección pueden variar sustancialmente en cada escenario, por lo que el análisis de riesgo depende en gran medida de las características de la zona, del riesgo inherente de fuego y de la zona geográfica.

Los sistemas de puesta a tierra suelen estar asociados con el sistema de apantallamiento para en caso de una descarga eléctrica, mediante la malla poder drenar estas corrientes, las cuales pueden ser perjudiciales para el estado de los componentes y seres vivos dentro de la subestación, por lo que es indispensable conocer datos de entrada como la corriente de cortocircuito para el punto en el que se evalúa la malla, la resistividad del terreo para poder decidir la conveniencia de plantear varillas o cable de cobre o ambas, la normativa a seguir, el conductor y varilla a emplear.

VII. CONCLUSIONES

El edificio de control, los dispositivos de protección contra rayos del sistema eléctrico y los dispositivos de protección contra sobretensiones del sistema de telecomunicaciones requieren un Nivel de Protección contra Rayos nivel IV.

La estructura de la zona uno, los dispositivos de protección contra rayos del sistema eléctrico y los dispositivos de protección contra sobretensiones del sistema de telecomunicaciones requieren un Nivel de Protección contra Rayos nivel IV.

La estructura de la zona dos, los dispositivos de protección contra rayos del sistema eléctrico y los dispositivos de protección contra sobretensiones del sistema de telecomunicaciones requieren un Nivel de Protección contra Rayos nivel IV.

Se formuló el apantallamiento con una esfera de Nivel de Protección III, por lo que el modelo se configura con ocho postes de concreto, de los cuales cuatro de ellos son de 10 metros y los 4 restantes son de 12 m, para cada poste se adaptó 8 puntas captadoras de 50 cm respectivamente

Realizados los cálculos, se verifica que el conductor de cobre calibre 2/0 AWG para la malla de puesta a tierra y para las colas o conductores de puesta a tierra de los equipos, cumple con los requerimientos de las normas aplicables y la corriente de corto del sistema.

Las tensiones de superficie, de paso y de contacto calculadas en las diferentes áreas de la subestación, están por debajo de las admisibles.

El valor de la resistencia de tierra obtenida es de $0,34 \Omega$.

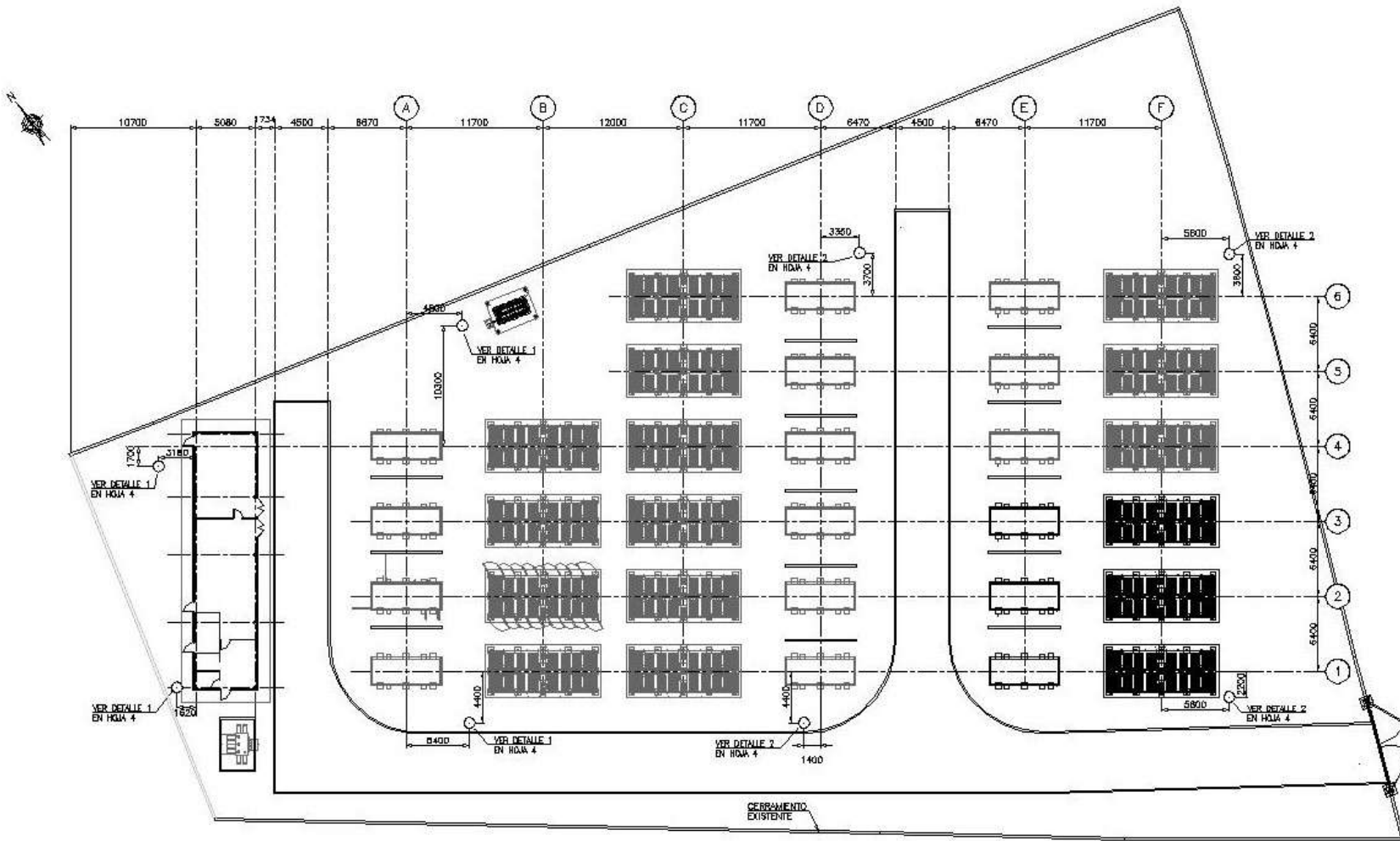
REFERENCIAS

- [1] PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS). PARTE 2: MANEJO DEL RIESGO, 4552-2, NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC, Bogotá, 2008..
- [2] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80, IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., NEW YORK, NY, 2013.
- [3] H.M.V. (2003). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión segunda edición. Mejía Villegas S.A..
- [4] Shashi Shekhar Giri, Aziz Ahmad, Vimal Katiyar, "Evitar las pérdidas de recorte de energía por parte del inversor que tiene una alta relación de carga de CC a CA en una planta fotovoltaica solar conectada a la red que utiliza un sistema de almacenamiento.
- [5] S. S. Giri, A. Ahmad and V. Katiyar, "Avoiding Power Clipping Losses by Inverter having High DC-to-AC Loading Ratio in Grid Connected Solar PV Plant Using Battery Energy Storage System," 2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and I.
- [6] Q. Duan, F. Qian, Z. Chao, Y. Tang and J. Zhong, "Impact of Integrating Solar Generation in Power Systems with Battery Energy Storage," 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 2020, pp. 109-113, doi:.
- [7] PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS(RAYOS), PARTE 3: DAÑOS FÍSICOS A ESTRUCTURAS Y AMENAZAS A LA VIDA, 4552-3, NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC, Bogotá, 2008..
- [8] Rueda D, Luz Andrea & Blanco, Anyinson. (2011). DISEÑO DE LA SUBESTACION ELÉCTRICA DEL EDIFICIO DE ADMINISTRACIÓN I BAJO LOS LINEAMIENTOS DEL REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS -RETIE. 10.13140/RG.2.2.15853.26088/1..
- [9] PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. PARTE 1: PRINCIPIOS GENERALES, 4552-1, NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC, Bogotá, 2008..
- [10] (N.d.). Com.Co. Retrieved May 19, 2023, from https://cu.epm.com.co/Portals/proveedores_y_contratistas/proveedores-y-

contratistas/normas tecnicas/documentos/DOCUMENTOS-ENERGIA/NORMAS-
TECNICAS-PARA-REDES-AEREAS/NORMAS-DE-MONTAJES-
COMPLEMENTARIOS/RA6-014.pdf.

ANEXOS

A continuación, se evidencian la ubicación de las puntas captadoras en la disposición física de la subestación SAEB 34,5kV



PLANTA GENERAL
ESCALA 1:200

CONVENCIONES
 (Symbol) PUNTA CAPTADORA TFD FRANKLIN DE 500 mm VISTA EN PLANTA

A continuación, se evidencian los resultados del software CYMGRND.

Reporte de contorno de potencial

Monday, April 03, 2023, 23:26:19

Nombre de la subestación SE SAEB
Proyecto SAEB
Estudio SAEB

Parámetros

Título Diagrama contorno potencial SE SAEB

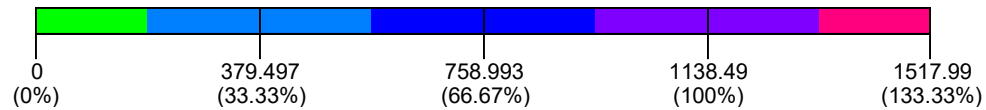
Nombre de la barra SAEB
Corriente de falla LG 22600 amps
Contribución a distancia 100 %
Corriente del electrodo de retorn 0 amps
Espesor de la capa superior 1 metros
Resistividad de la capa superior 74.84 ohm-m
Resistividad de la capa inferior 52.47 ohm-m
Potenciales iguales (distintos) Sí

X1 0.2654 metros
Y1 0.2008 metros
X2 113.94 metros
Y2 70.796 metros

Intervalos X 10
Intervalos Y 10

Niveles de umbral del potencial de contacto

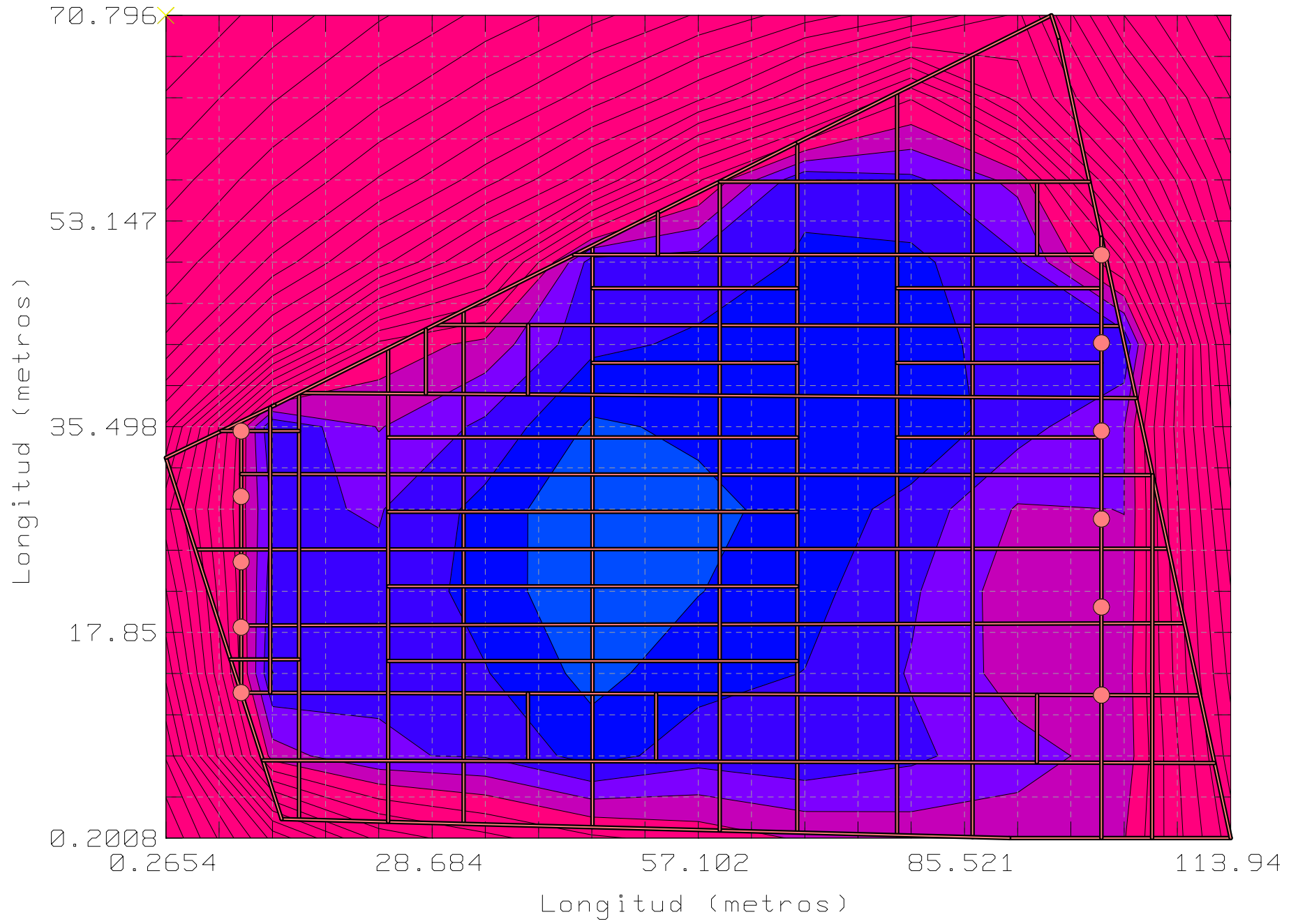
Tensión máxima de contacto 1138.49 voltios

**Máximo**

Potencial de contacto en los puntos 5253.15 voltios Corriente LT Permitida 4897.82 amps

X (metros)	Y (metros)
0.2654	70.796

Diagrama contorno potencial SE SAE₃



Reporte del perfil de potencial

Monday, April 03, 2023, 23:30:39

Nombre de la subestación	SE SAEB
Proyecto	SAEB
Estudio	SAEB

Parámetros

Título	Diagrama perfil potencial SE SAEB
Nombre de la barra	SAEB
Corriente de falla LG	22600 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorn	0 amps
Espesor de la capa superior	1 metros
Resistividad de la capa superior	74.84 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	52.47 ohm-m
Potenciales iguales (distintos)	Sí
X1	0.27 metros
Y1	0.2 metros
X2	113.94 metros
Y2	70.8 metros
Intervalo entre los pasos	1 metros

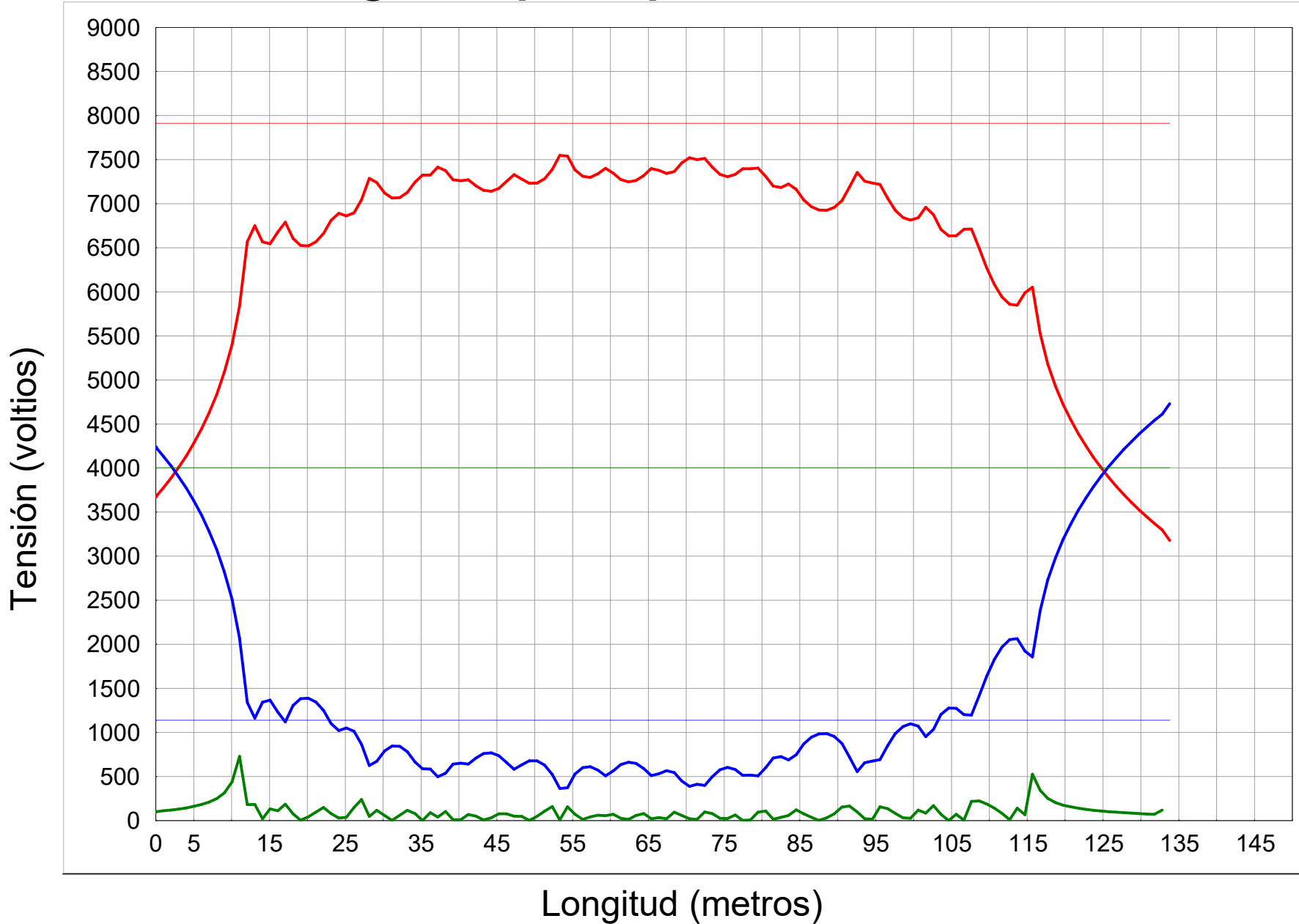
Niveles de umbral del potencial de contacto

Elevación del potencial de tierra	7910.72 voltios
Tensión máxima de paso	4003.71 voltios
Tensión máxima de contacto	1138.49 voltios

Máximo

Potenciales de superficie	7546.56 voltios
Potenciales de paso	728.28 voltios
Potenciales de contacto	4730.77 voltios

Diagrama perfil potencial SE SAEB



- Potenciales de superficie
- Potenciales de contacto
- Paso máximo admisible = 4003.71 voltios
- Potenciales de paso
- Elevación del potencial de tierra = 7910.72 voltios
- Contacto máximo admisible = 1138.49 voltios