

MEMORIA DE CÁLCULO PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA							
NOMBRE DEL PROYECTO:		Implementación de sistemas de energía fotovoltaica en instituciones educativas del municipio de Tame, Departamento de Arauca.					
UBICACIÓN:	I.E. PARMENIO BONILLA PAREDES	LUGAR:	Tame (Arauca)	LATITUD:	6°39'28.48"N	LONGITUD:	71°34'56.84"O
ELABORADO POR:	Justo Jesus Eslava Badillo		REVISAR/APRUEBA:	Oscar Alexander Merchan Peñaranda			
FECHA DE ELABORACIÓN:	7 de octubre de 2025		FECHA DE APROBACIÓN:	7 de octubre de 2025			
CARGO/ROL:	Pasante de Ingeniería Eléctrica		CARGO/ROL:	Ingeniero Electricista	Mat. Prof:	SN205 - 165063	
	Diseñador – Sistema de Puesta a Tierra			Revisor - Sistema de Puesta a Tierra			
CÁLCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA – METODOLOGÍA IEEE Std 80-2013							
Nota: Este calculador aplica las ecuaciones y criterios definidos en la norma IEEE Std 80-2013 “Guide for Safety in AC Substation Grounding” para determinar la seguridad frente a tensiones de paso y contacto, y dimensionar la red de puesta a tierra de acuerdo con las condiciones del terreno y la corriente de falla del sistema.							
Corriente de Falla Monofásica Asimétrica [kA]				2,469			
PARÁMETROS							
Símbolo	Valor	Descripción Técnica					
ρ	1252	Resistividad aparente del terreno. Valor determinado mediante ensayo de resistividad (método de Wenner) o suministrado por el diseñador. Representa el comportamiento eléctrico promedio del suelo natural, expresado en Ω m.					
ρ_s	1252	Resistividad de la capa superficial protectora. Corresponde al material de cobertura (grava o roca triturada) dispuesto sobre la superficie del terreno para reducir las tensiones de paso y contacto. Si no aplica, usar el mismo valor de ρ .					
h_s	0,2	Espesor de la capa superficial protectora. Depende del tipo de material y de la disposición constructiva. Este valor, expresado en metros (m), suele encontrarse entre 0,10 m y 0,15 m.					
I_o	0,82	Corriente de falla monofásica asimétrica a tierra. Valor máximo obtenido del estudio de cortocircuito del sistema, expresado en kA.					
t	0,5	Tiempo de despeje de la falla. Tiempo total de operación del dispositivo de protección más lento ante falla monofásica a tierra, expresado en segundos (s).					
Parámetro auxiliar		Aplica	Observación				
Capa superficial protectora (C _s)		NO	Seleccionar “SI” cuando la superficie esté recubierta con material de alta resistividad ($\rho_s \approx 2000\text{--}5000 \Omega$ m, p. ej. grava o roca volcánica triturada). Esta capa incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies del personal, reduciendo la corriente a través del cuerpo y, por tanto, las tensiones de paso y contacto. En caso contrario “NO”, el calculador usa $C_s = 1,0$ (terreno natural sin efecto aislante).				
SELECCIÓN DEL CONDUCTOR							
1. Fundamentación normativa							
De acuerdo con el RETIE 2024 (Art. 3.12.2.2), la selección del conductor del electrodo de puesta a tierra o conductor a tierra se realiza según el tipo de sistema:							
Tipo de sistema		Norma aplicable		Método de selección			
Baja tensión (≤ 1000 V)		NTC 2050 – Tabla 250.66, adoptada de la IEC 60364-5-54		Método prescriptivo según el calibre del conductor de fase o acometida.			
Media, alta o extra-alta tensión (> 1000 V)		IEEE Std 80-2013(Ecuación 47) o (Ecuación 4) adoptada expresamente por el RETIE 2024		Método analítico por cálculo térmico basado en corriente de falla, constante del material y tiempo de despeje.			
2. Cálculo para sistemas de media, alta o extra-alta tensión (IEEE 80 / RETIE 2024)							
$A_{mm^2} = I \times K_f \sqrt{t_c}$		IEEE 80 Fórmula (47)		$A_{mm^2} = \frac{I \times K_f \sqrt{t_c}}{1,9737}$		RETIE Ecuación 4	
$A_{mm^2} = I \left(\frac{197,4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}}} \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right) \right)$		IEEE 80 Fórmula (46)					
Donde:							
Símbolo	Descripción		Unidad	Observación / Fuente			
I_f	Corriente asimétrica de falla RMS (máxima simulada)		kA	Del cálculo/estudio de cortocircuito			
t_c	Tiempo de despeje de la falla		s	Datasheet de la protección a implementar			
T_m	Temperatura de fusión o límite térmico		°C	Tabla 1 – IEEE 80			
T_a	Temperatura ambiente		°C	IEEE 80 (default)			
ρ_r	Resistividad del material a 20 °C		$\mu\Omega$ -cm	Cobre duro comercial			
α_r	Coeficiente térmico de resistividad a 20 °C		1/°C	IEEE 80 – Tabla 1			
K_0	Constante térmica a 0 °C		°C	IEEE 80 – Tabla 1			
TCAP	Capacidad térmica volumétrica		J/(cm³·°C)	IEEE 80 – Tabla 1			
—	Conductividad del material		% IACS	IEEE 80 – Tabla 1			

Cálculo:

Símbolo	Valor	Unidad	Descripción Técnica
Material	Cobre duro comercial (estirado)	—	Según IEEE 80 – Tabla 1.
I	2,469	kA	Corriente de falla monofásica a tierra (máxima simulada).
tc	0,5	s	Tiempo de despeje de la falla.
Tm	1084	°C	Temperatura de fusión del cobre (IEEE 80).
Ta	40	°C	Temperatura ambiente adoptada por IEEE 80.
ρr	1,78	μΩ·cm	Resistividad a 20 °C (Tabla 1 – IEEE 80).
αr	0,00381	1/°C	Coefficiente térmico de resistividad a 20 °C.
K0	242	°C	Constante térmica a 0 °C.
TCAP	3,4	J/(cm³·°C)	Capacidad térmica volumétrica del material.
—	97	% IACS	Conductividad relativa (respecto al Cobre duro comercial (estirado)).
Amm²	12,37	mm²	Área mínima térmica calculada según (IEEE 80, Fórmula 46)
Conductor Sugerido	6	AWG	Según área calculada y Tabla 250.122 – NTC 2050.
Conductor a Implementar	2	AWG	Seleccionado conforme a la IEEE 80 y RETIE 2024.
Ac	33,62	mm²	Sección real del conductor (NTC 2050)
d	0,00742	m	Diámetro nominal del conductor

Notas y condiciones de aplicación (RETIE 2024, Art. 3.12.2.2)

Nota 1: El recubrimiento en cobre de la varilla de acero no debe ser menor a 0,25 mm de espesor.

Condiciones adicionales:

- a. La temperatura del conductor no debe superar la del aislamiento de los conductores activos alojados en la misma canalización, conforme al Capítulo 9 de la IEEE Std 242.
- b. Según el RETIE 2024, no se permite el uso de aluminio enterrado.
- c. Se permite el uso de cables de acero galvanizado en sistemas de puesta a tierra (líneas de transmisión, redes de distribución o instalaciones de uso final), aplicando los parámetros de la varilla de acero recubierta de zinc.
- d. Se permiten conductores con geometría distinta (pletinas en “L” o “T”) u otros materiales que demuestren resistencia mecánica y a la corrosión, probados a 1000 h en cámara salina (RETIE 2024, numeral 2.3.15.1.1.c).
- e. Las constantes de materiales (cobre, acero, acero inoxidable y zinc) provienen del The Metals Handbook de la American Society for Metals.
- f. Las varillas de acero recubiertas de cobre se basan en diámetro nominal de 5/8 in (15,9 mm) y espesor de recubrimiento de 0,010 in (0,25 mm) de cobre blando.
- g. Las varillas recubiertas de acero inoxidable se basan en diámetro nominal 5/8 in (15,9 mm) y espesor de recubrimiento de 0,020 in (0,5 mm) sobre núcleo de acero No. 1020.
- h. En el caso del acero, la capacidad térmica es variable entre 550 °C y 800 °C; los valores inferiores son conservadores respecto al calentamiento del conductor.
- i. Para materiales bimetálicos, la temperatura de fusión corresponde al metal de menor punto de fusión.

TENSIONES DE PASO Y CONTACTO MÁXIMAS TOLERABLES

Nota:

Aquí se introduce el factor de disminución de la capa superficial (Cs), el cual puede considerarse como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona cuando existe un material superficial de espesor finito (por ejemplo, grava o roca triturada).

La norma IEEE Std 80-2013 presenta un procedimiento matemático y gráficas para determinar este valor; sin embargo, también propone una expresión empírica que ofrece resultados dentro del 5 % de diferencia respecto al método analítico.

La ecuación para el cálculo de Cs es la siguiente:

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

IEEE 80
Fórmula (27)

Donde:

Símbolo	Valor	Descripción	Unidad
Cs	1,000	Factor de disminución de la capa superficial	—
ρ	1252	Resistividad del terreno	Ω·m
ρs	1252	Resistividad de la capa superficial	Ω·m
hs	0,2	Espesor de la capa superficial	m

TENSIÓN DE PASO Y DE CONTACTO – FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA (IEEE Std 80-2013, Cap. 8)

Nota:

La tensión de paso y de contacto representa uno de los criterios de seguridad eléctrica en el diseño de sistemas de puesta a tierra. La norma IEEE Std 80-2013 – Guide for Safety in AC Substation Grounding establece los límites máximos tolerables de estas tensiones para proteger a las personas frente a los efectos del paso de corriente a través del cuerpo humano durante una falla a tierra.

Durante una falla, la corriente de cortocircuito fluye por la red de puesta a tierra y produce diferencias de potencial entre distintos puntos del suelo o entre el suelo y estructuras metálicas accesibles. Estas diferencias generan dos situaciones críticas:

Tensión de paso (Estep): Diferencia de potencial entre los pies de una persona cuando camina o permanece sobre el terreno sometido a un gradiente de potencial.

Tensión de contacto (Etouch): Diferencia de potencial entre una parte conductora (por ejemplo, una estructura metálica energizada) y los pies de una persona que la toca.

La IEEE 80 define ecuaciones empíricas para determinar los valores límite tolerables para una persona entre 50 kg y 70kg de masa corporal, considerando el efecto de la duración de la falla, la resistividad del suelo y el efecto de la capa superficial protectora (como grava o piedra triturada), que aumenta la resistencia entre los pies y el terreno.

Estas tensiones se calculan mediante las ecuaciones:

Tensión de paso (Estep)	
50 kg	70 kg
$E_{step50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \cdot \left(\frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \right)$	$E_{step70} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \cdot \left(\frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \right)$
Fórmula (29) - IEEE 80	Fórmula (30) - IEEE 80

Tensión de paso (Etouch)	
50 kg	70 kg
$E_{touch50} = (1000 + 1,5C_s \times \rho_s) \cdot \left(\frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \right)$	$E_{touch70} = (1000 + 1,5C_s \times \rho_s) \cdot \left(\frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \right)$
Fórmula (32) - IEEE 80	Fórmula (33) - IEEE 80

Donde:

Símbolo	Valor	Descripción	Unidad
C_s	1,000	Factor de disminución de la capa superficial	—
ρ_s	1252	Resistividad de la capa superficial	$\Omega \cdot m$
t_s	0,5	Tiempo de despeje de la falla	s

Peso de la persona (kg)	50	Factor de Relación (adimensional), según el peso de la persona	0,116
-------------------------	----	--	-------

Cálculo:

Descripción	Valor	Unidad	Observación
$V_{step-tol}$	1396,38	V	Tensión Máxima Tolerable
$V_{touch-tol}$	472,13	V	Tensión Máxima Tolerable

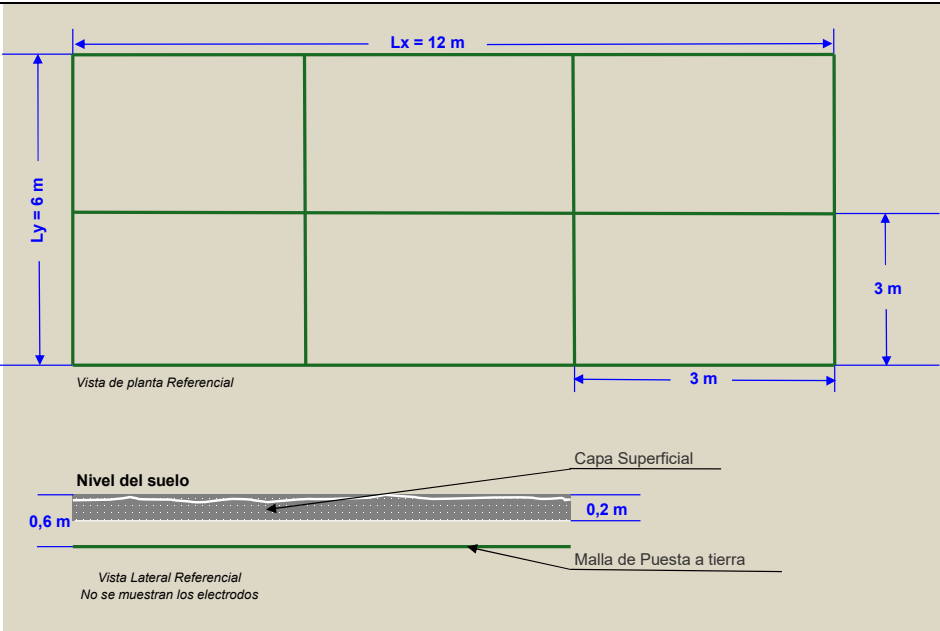
GEOMETRÍA DE LA MALLA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (IEEE Std 80)

Nota:

La determinación de la geometría de la malla constituye una de las etapas en el diseño de un sistema de puesta a tierra conforme a la metodología establecida en la IEEE Std 80-2013. La configuración geométrica de la red de conductores enterrados influye directamente en la resistencia total del sistema, en la distribución del potencial de tierra (**GPR**) y en los niveles de tensión de paso y de contacto presentes durante una condición de falla.

El diseño geométrico tiene por objeto definir el número de conductores, su espaciamento, la profundidad de enterramiento y la ubicación de los electrodos verticales o varillas de refuerzo, de modo que se garantice una disipación de corriente eficiente y segura hacia el terreno. Para sistemas de subestaciones o instalaciones equivalentes, la IEEE 80 recomienda que la malla sea cuadrada o rectangular, manteniendo una relación equilibrada entre el área total (**A**) y la longitud total del conductor (**Lc**), con el fin de optimizar el comportamiento térmico y eléctrico del sistema.

PARÁMETROS				FÓRMULAS
Símbolo	valor	Unidad	Descripción	$N = \frac{L_y}{D} + 1 \quad ; \quad M = \frac{L_x}{D} + 1$
D	3	m	Lado de la cuadrícula o espaciamento entre conductores	
Lx	12	m	Largo de la malla	
Ly	6	m	Ancho de la malla	$L_c = N \cdot L_x + M \cdot L_y$
h	0,6	m	Profundidad de enterramiento de los conductores	
N	3	Und	Número de conductores de longitud Lx	
M	5	Und	Número de conductores de longitud Ly	$A = L_x \times L_y$
nr	4	Und	Número de varillas de tierra	
Lr	2,44	m	Longitud de cada varilla de puesta a tierra	
Lc	66	m	Longitud total del conductor	$L_T = L_c + n_r \cdot L_r$
A	72	m²	Área cubierta por los conductores de la malla de tierra	
LT	75,76	m	Longitud total de conductores enterrados	



CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Propósito
Estimar la resistencia del sistema de malla en suelo uniforme para el prediseño del SPT, con base en la formulación de Sverak incorporada por la IEEE 80 (Fórmula 57), que introduce el efecto de la profundidad de enterramiento.

Fórmula:

$$R_g = \rho \left(\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right)$$

Dónde:

R_g [Ω]: resistencia de la malla.
ρ [Ω·m]: resistividad aparente del terreno.
L_T [m]: longitud total de conductor enterrado de la malla horizontal (no incluye varillas).
A [m²]: área de la malla.
h [m]: profundidad de enterramiento del conductor.

Cálculo:

R _g	74,59	Ω
----------------	-------	---

Nota: Esta ecuación ofrece resultados equivalentes a los de la ecuación de Schwarz (IEEE 80, Fórmula 58) para mallas con varillas.

CÁLCULO DEL MÁXIMO POTENCIAL DE TIERRA (GPR)

Nota:

El **GPR** es la elevación máxima del potencial del sistema de puesta a tierra durante una falla a tierra, según (IEEE Std 80-2013). Se estima como el producto entre la corriente que realmente se disipa por la malla y la resistencia del sistema de tierra:

$$GPR = I_G \times R_g$$

La corriente máxima a disipar por la malla (I_G) se obtiene considerando la corriente de falla del sistema, aplicando los factores que definen su comportamiento real durante la condición de cortocircuito:

$$I_G = I_F \times D_f \times S_f \times C_p$$

Donde:

I_F = 3·I_o: Corriente simétrica de falla a tierra (A), obtenida del estudio de cortocircuito.
D_f: Factor de decremento, que considera la componente de corriente continua (DC) asociada a la asimetría de la falla.
S_f: Factor de división de corriente, que representa la fracción de la corriente total de falla que fluye hacia el terreno a través de la malla de puesta a tierra.
C_p: Factor de crecimiento futuro de, el cual considera incrementos de carga o de capacidad instalada; si no se prevén expansiones futuras, se adopta **C_p** = 1.

Una vez determinada la corriente **I_G**, se procede a calcular el potencial máximo de tierra mediante el producto con la resistencia del sistema de puesta a tierra. El resultado se expresa en voltios (V) y corresponde a la máxima elevación de potencial del SPT respecto al suelo remoto durante la falla.

Cálculo:

Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Df	1,026	—	Factor de decremento de corriente por componente DC, determinado según la relación X/R del sistema y el tiempo de falla (IEEE Std 80-2013, Tabla 10).
Sf	1	—	Factor de división de corriente. Representa la fracción de la corriente de falla que se deriva efectivamente a tierra a través de la malla del SPT.
Cp	1	—	Factor de crecimiento futuro. Para instalaciones sin expansión prevista se asume Cp = 1.
IF	2,469	kA	Corriente simétrica de falla a tierra (3Io), obtenida del estudio de cortocircuito o del nivel de falla definido por el operador de red.
IG	2,53	kA	Corriente máxima disipada por la malla del SPT
GPR	188939	V	Ground Potential Rise o elevación máxima del potencial de tierra, Representa la tensión máxima entre la malla de puesta a tierra y una referencia remota durante una falla.
Vtouch-tol	472,13	V	Tensión de contacto máxima tolerable para el cuerpo humano.

El cumplimiento normativo se verifica asegurando que el valor obtenido del GPR sea inferior a la tensión de contacto tolerable calculada para un cuerpo humano, conforme a las ecuaciones (29 a la 33, según sea el caso), establecido por (IEEE Std 80-2013).

GPR<Vtouch-tol

Si la fórmula se muestra en **VERDE**, el sistema **CUMPLE** con los límites de seguridad eléctrica, indicando que las tensiones transferidas al entorno no representan riesgo para el personal ni para la operación del sistema.

Si la fórmula se muestra en **ROJO**, el sistema **NO CUMPLE** con la norma, lo que implica que el potencial de tierra supera el valor tolerable y se requiere rediseñar o reforzar la malla de puesta a tierra.

Acciones recomendadas cuando **GPR > Vtol** (Paso 8 → Paso 12, según IEEE std 80-2013):

Paso 8 – Cálculo de tensiones de malla y de paso: determinar E_m y E_s considerando los factores K_m , K_s , K_i , K_h y K_{fl} para evaluar el riesgo real en la superficie.

Paso 9 – Comparación $E_m < E_{tol}$: si $E_m > E_{tol}$, revisar la geometría de la malla (reducir D , aumentar L_a o añadir varillas).

Paso 10 – Comparación $E_s < E_{tol}$: si $E_s > E_{tol}$, revisar el diseño para disminuir gradientes superficiales.

Paso 11 – Rediseño: aplicar correcciones de geometría y resistividad (mejoramiento del suelo, varillas adicionales, mayor profundidad h).

Paso 12 – Validación final: verificar que el nuevo diseño satisfaga $E_m < E_{tol}$ y $E_s < E_{tol}$ antes de emitir el diseño definitivo.

De esta manera, se garantiza que el diseño del sistema de puesta a tierra mantenga las condiciones de seguridad y confiabilidad exigidas por la IEEE Std 80-2013 y el RETIE 2024.

CÁLCULO DE TENSIÓN DE MALLA EN CASO DE FALLA

Propósito:

Determinar la tensión de malla (E_m) que se genera en la superficie del terreno durante una falla a tierra, de acuerdo con la metodología establecida en la IEEE Std 80-2013. El cálculo considera la resistividad del terreno (ρ), los parámetros geométricos de la malla (D , h , L_x , L_y , L_c , L_R) y los factores de corrección asociados a la forma, profundidad y configuración (K_m , K_i , K_h , K_{fl}).

Esta magnitud representa el potencial máximo de contacto que puede producirse entre los pies de una persona ubicada directamente sobre el área energizada de la malla. Para efectos de diseño, se debe garantizar que el valor calculado de E_m sea menor que la tensión de contacto tolerable ($V_{touch-tol}$), determinada conforme a las ecuaciones (29 a 33) de la IEEE 80, en función del tiempo de despeje de falla (t_f) y la masa corporal considerada (50 kg o 70 kg).

Cuando la condición $E_m > V_{contacto_tolerable}$ no se cumple, el sistema debe ajustarse según los pasos 9 a 12 del procedimiento de diseño de la IEEE 80, aplicando medidas como:

- 1. Reducción del espaciamiento D entre conductores.
- 2. Incremento de la longitud total L_c o L_R .
- 3. Aumento de la profundidad de enterramiento h o del número de varillas n_r .
- 4. Optimización de las condiciones del terreno mediante el uso de materiales de relleno o capas superficiales de alta resistividad (como grava o piedra triturada), que limiten el flujo de corriente a través del cuerpo humano.

El cumplimiento de esta condición garantiza que las tensiones de contacto dentro del área de la malla se mantengan dentro de los límites fisiológicamente seguros, asegurando la protección del personal y la confiabilidad operativa del sistema de puesta a tierra.

1. Parámetros iniciales de diseño

Símbolo	valor	Unidad	Descripción
D	3	m	Lado de la cuadrícula o espaciamiento entre conductores
Lx	12	m	Largo de la malla
Ly	6	m	Ancho de la malla
h	0,6	m	Profundidad de enterramiento de los conductores
nr	4	Und	Número de varillas de tierra
Lr	2,44	m	Longitud de cada varilla de puesta a tierra
LR	9,76	m	Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra
Lc	66	m	Longitud total del conductor
Lp	36	m	Longitud del perímetro de la malla
A	72	m²	Área cubierta por los conductores de la malla de tierra
Calibre del conductor	2	AWG	Seleccionado conforme a la IEEE 80 y RETIE 2024.
Ac	33,62	mm²	Sección real del conductor (NTC 2050)
d	0,00742	m	Diámetro nominal del conductor
ρ	1252	Ω·m	Resistividad aparente del terreno.
IG	2,53	kA	Corriente máxima disipada por la malla del SPT

Tipo de Malla

Rectangular

Lp = 36

2. Cálculo de factores geométricos (IEEE 80 – Ec. 89 a 92)

Ecuación	Expresión	Valor	Unidad	Descripción
90	$n_a = \frac{(2 \times L_c)}{L_p}$	3,67	—	Factor a – conductores equivalentes
91	$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}}$	1,03	—	Factor b – forma de la malla
92	$n_c = \left(\frac{L_x \times L_y}{A}\right)^{\frac{0,7 \times A}{L_x \times L_y}}$	1,00	—	Factor c – rectangularidad
89	$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$	3,78	—	Factor total de geometría

3. Factores de corrección (IEEE 80 – Ec. 87, 88, 94)

Ecuación	Expresión	Valor	Unidad	Descripción
87	$K_{ii} = 1$	1	—	Factor por disposición de varillas, para mallas con varillas de puesta a tierra ubicadas a lo largo del perímetro, o en las esquinas de la malla.
	$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}}$	0,34	—	Factor por disposición de varillas, para mallas sin varillas de puesta a tierra o con solo unas pocas varillas, y ninguna ubicada en las esquinas o en el perímetro.
88	$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$	1,26	—	Factor de profundidad, con h=1
94	$K_i = 0,644 + 0,148 \times n$	1,20	—	Factor de irregularidad

4. Longitud efectiva enterrada (IEEE 80 – Ec. 95 y 96)

Ecuación	Expresión	Valor	Unidad	Descripción
95	$L_m = L_c + L_R$	75,76	m	Sin varillas perimetrales
96	$L_M = L_c + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}\right)\right] L_R$	83,29	m	Con varillas en esquinas y perímetro

5. Factor geométrico **K_m** (Sverak) – Ec. (86)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right]$$

Cálculo:

Símbolo	Valor	Unidad	Descripción	Configuración de la malla del SPT
K _m	0,73	—	Factor geométrico de la malla	Con varillas en esquinas y perímetro

Nota: Para realizar el cálculo de **K_m** debe indicar primero si la configuración de la malla es:
Sin varillas perimetrales
Con varillas en esquinas y perímetro

6. Tensión de malla (Eq. 85)

Ecuación	Expresión	Valor	Unidad	Descripción
85	$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times L_G}{L_M}$	33,36	V	Tensión de malla calculada

7. Verificación de cumplimiento normativo

Símbolo	valor	Unidad	Descripción
V _{touch-tol}	472,13	V	Tensión Máxima Tolerable
E _m	33,36	V	Tensión de malla calculada
E _m < V _{touch-tol}			CUMPLE

CÁLCULO DE TENSIÓN DE PASO EN CASO DE FALLA

Propósito

Determinar la tensión de paso (E_s) que puede presentarse sobre la superficie del terreno durante una falla a tierra, como consecuencia del flujo de corriente de falla a través del sistema de puesta a tierra.
Este cálculo se realiza conforme a la IEEE Std 80-2013 – Guide for Safety in AC Substation Grounding, considerando la resistividad del suelo (ρ), la geometría de la malla (D, h, L_c, L_R, n), el factor de irregularidad (K_i) y los coeficientes geométricos específicos (K_s).
La tensión de paso representa la diferencia de potencial entre los pies de una persona ubicada sobre el terreno durante una falla, con una separación estándar de 1 m. Para garantizar la seguridad eléctrica, el valor calculado de E_s debe ser menor que la tensión de paso tolerable (V_{step-tol}), conforme a las ecuaciones (29 – 33) de la IEEE 80, determinadas en función del tiempo de despeje de la falla (t_f) y de la masa corporal considerada (50 kg o 70 kg).

En caso de incumplimiento (E_s > V_{step-tol}), deberán aplicarse medidas de mejora, como:

1. Incrementar la longitud total del conductor (L_c o L_R).
2. Aumentar la profundidad de enterramiento (h).
3. Añadir o reubicar varillas de tierra (n_r).
4. Mejorar las condiciones del terreno mediante grava o material de alta resistividad superficial.

1. Parámetros iniciales de diseño

Símbolo	valor	Unidad	Descripción
D	3	m	Lado de la cuadrícula o espaciamiento entre conductores
h	0,6	m	Profundidad de enterramiento de los conductores
L _R	9,76	m	Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra
L _c	66	m	Longitud total del conductor
n	3,78	—	Factor total de geometría (Ec. 89)
K _i	1,20	—	Factor de irregularidad (Ec. 94)
I _G	2,53	A	Corriente máxima disipada por la malla del SPT
ρ	1252	Ω·m	Resistividad aparente del terreno.

2. Cálculo de la tensión de paso (Ec. 97–99)

2.1 Longitud efectiva de conductor enterrado			
$L_s = 0,75 \times L_c + 0,85 \times L_R$			
Ecuación	valor	Unidad	Descripción
98	57,80	m	Longitud efectiva del conductor enterrado.
2.2 Factor geométrico K _s (Sverak)			
$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$			
Ecuación	valor	Unidad	Descripción
99	0,43	—	Factor geométrico K _s de la malla
2.3 Tensión de paso			
$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s}$			
Ecuación	valor	Unidad	Descripción
97	28,30	V	Tensión de paso calculada

3. Verificación de cumplimiento normativo

Símbolo	valor	Unidad	Descripción
V _{step-tol}	1396,38	V	Tensión Máxima Tolerable
E _s	28,30	V	Tensión de paso calculada
E _s < V _{step-tol}			CUMPLE

CUMPLE: E_m y E_s cumplen. GPR > V_{touch-tol}, se debe implementar control de potencial transferido y tratamiento de perímetro (IEEE 80, 16.6 y 17).