

**PROYECTO PLANTA TERMICA DE GENERACION DE  
ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA**

1123-03-90-E01-CAL-016

Rev. a

**CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Rev.	FECHA DATE	OBJETO OBJECT	ELABORÓ / BY Iniciales/Initials	REVISÓ/ REWD. Iniciales/Initials	APROBÓ/APVD. Iniciales/Initials
a	24/10/07	EMISIÓN ORIGINAL	L.C.	S.C.	A.M.

---

## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

### Índice

1.	GENERAL .....	3
2.	OBJETIVO.....	3
3.	REFERENCIAS .....	4
4.	NORMAS .....	4
5.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA TERMICA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA .....	5
6.	PROGRAMA UTILIZADO .....	5
7.	CRITERIOS DE DISEÑO .....	5
8.	RESISTIVIDAD DEL TERRENO .....	7
9.	TENSIONES MAXIMAS DE TOQUE Y PASO TOLERABLES .....	7
10.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	8
11.	VERIFICACIÓN DEL AREA MÍNIMA DEL CONDUCTOR DE TIERRA .....	9
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	10
	ANEXO A: Clculo de la corriente maxima de cortocircuito. ....	11
	ANEXO B: Dimensionamiento del calibre del conductor. ....	14
	ANEXO C: Calculo de la corriente maxima de malla.....	17
	ANEXO D: Trayectorias para Determinar Tensiones de Toque y Paso .....	20

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

---

### 1. GENERAL

Este documento tiene como finalidad presentar las consideraciones, criterios de diseño y los resultados de los cálculos del Sistema de Puesta a Tierra diseñado para la implantación de la nueva PLANTA TERMICA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA. El diseño del Sistema de Puesta a Tierra debe permitir la correcta operación de los equipos y asegurar que las personas que se encuentren alrededor de las instalaciones no estén expuestas a ningún peligro, debido a los potenciales de toque y paso provocados por un cortocircuito en la Planta.

La presente emisión del documento de cálculo, se limita a definir el diseño de la malla del sistema de puesta a tierra únicamente para el área de los turbogeneradores. En una próxima revisión, se mostrarán los resultados obtenidos en los voltajes de toque y paso en el área de Balance de Planta (BOP).

El alcance de este trabajo consiste en diseñar la configuración y características de la malla de puesta a tierra de la planta, asegurando que las tensiones de toque y paso en las áreas de interés, resulten por debajo de los valores de tensión máxima de toque y paso permitidos, calculados mediante la Norma IEEE Std 80, 2000 "Guide for Safety in AC Substation Grounding".

Las áreas de interés de la planta, son aquellas en las cuales se prevé que existirá circulación de personal, el cual podrá estar potencialmente expuesto a un choque eléctrico en caso de una falla en el sistema eléctrico.

### 2. OBJETIVO

Este estudio tiene como objetivo calcular los niveles de tensión de toque y paso que se pueden presentar en la Planta y verificar que la malla de tierra es adecuada para mantener los mismos por debajo de los máximos niveles permitidos, el diseño del Sistema de Puesta a Tierra persigue principalmente dos objetivos:

- Conducir, en condiciones normales y anormales, las corrientes eléctricas a tierra, sin inhibir la operación o exceder los límites de los equipos y/o perturbar la continuidad de servicio del sistema de potencia, para lo cual la resistencia a tierra del sistema debe mantenerse en valores bajos.
- Garantizar la seguridad de los seres humanos que puedan ser afectados, durante la conducción de las corrientes de falla (a frecuencia industrial) a tierra, por diferencias de potencial peligrosas.

## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

En tal sentido, se definen las tensiones correspondientes a dos situaciones generalmente analizadas y controladas:

- **TENSIÓN DE PASO:** Es la diferencia de potencial, que experimenta una persona entre sus pies, cuando los mismos están separados 1 m y la persona no está haciendo contacto con ningún otro elemento puesto a tierra.
- **TENSIÓN DE TOQUE O CONTACTO:** Es la diferencia de potencial que se presenta entre el alza de potencial del arreglo de puesta a tierra involucrado y el potencial superficial en el punto donde una persona está parada, cuando al mismo tiempo está tocando con una de sus manos un elemento puesto a tierra.

### **3. REFERENCIAS**

- **DOCUMENTOS DE REFERENCIA**

<b>TÍTULO</b>	<b>FECHA</b>	<b>ORIGEN</b>
Diseño del sistema de protección catódica de la línea de agua de producción de $\varnothing$ 16"	21/11/02	OTEPI

### **4. NORMAS**

El cálculo del Sistema de Puesta a Tierra se basa fundamentalmente en el método expuesto en las siguientes publicaciones:

- Optimum Design of Substation Grounding in a Top Layer Earth Structure. Part I, Analytical Study. Marzo / Abril 1975. PAS-94 N. 2, IEEE.
- IEEE Guide for Safety in Substation Grounding. Std. IEEE 80, 2000.
- Especificación Técnica para el Sistema de Puesta a Tierra. NS-P-360.
- IEEE TUTORIAL COURSE, Practical Applications of ANSI/IEEE Guide for Safety. 86 EH0253-5-PWR.
- IEEE Guide for Generating Station Grounding. Std. IEEE 665, 1995.

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

---

### 5. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA TERMICA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA

La PLANTA TERMICA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA consta de dos áreas. Un área donde estarán ubicados los turbogeneradores y otra área que es la de BOP (Balance de Operaciones de Planta).

En condiciones normales de operación, la planta exportará energía al sistema eléctrico de CADAFE en 230 kV, a través de la conexión en la subestación de la planta con el sistema interconectado.

Se instalarán dos unidades de generación de 150 MW nominales, ciclo simple, de operación a Gas.

### 6. PROGRAMA UTILIZADO

El diseño del arreglo de Puesta a Tierra, se realizó utilizando un programa digital, de nombre TERRAM desarrollado por *inelectra* y basado en el método expuesto en las tres primeras publicaciones indicadas en la Sección 4. Este programa está basado en la metodología de DAWALIBI y MUDEDKAR, modela la topología del sistema de puesta a tierra propuesto y calcula la resistencia a tierra de la configuración en estudio y las tensiones de toque y paso en las zonas de mayor interés.

### 7. CRITERIOS DE DISEÑO

A continuación se presentan los criterios de diseño para el cálculo del Sistema de Puesta a Tierra:

- El máximo nivel de cortocircuito monofásico en 230 kV para la Planta San Diego de Cabrutica es de 20.97 kA para el año 2030 (de acuerdo a información suministrada por CADAFE). En el anexo A se presenta el cálculo de cortocircuito de la planta.
- Se considera que la corriente simétrica que circula por tierra ( $I_g$ ) es solo una fracción de la corriente de cortocircuito ( $I_f$ ) al ocurrir una falla. Por lo cual, se usará un factor de derivación ( $S_f$ ) para obtener la corriente que circula por tierra, además de un factor de corrección por proyección ( $C_p$ ) y un factor de decremento ( $D_f$ ). El cálculo detallado de la máxima corriente de malla se observa en el anexo C.

## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

- El tiempo de duración de la corriente de falla se consideró 0,4 seg. (por ser un valor conservador indicado en la Norma IEEE Std 80, 2000) que corresponde con el tiempo de operación de las protecciones de respaldo para despejar la falla.
- El acabado final del suelo, en cada zona de interés, fue suministrado por la Disciplina Civil, y será el que se muestra a continuación:

TABLA N° 1  
Acabados Superficiales

<b>Acabado Superficial</b>	<b>Resistividad (Ohm·m)</b>	<b>Espesor (cm)</b>
Concreto	21	10
Piedra Picada	1300	7
Asfalto	10000	10
Ref: Tabla 7, IEEE Std 80, 2000		

- La máxima resistencia permitida será de 1 Ohm, que satisface los requerimientos de la red de potencia y control, en lo que al alza de potencial de la configuración se refiere (basado en la Norma IEEE Std 80, 2000).
- El arreglo de puesta a tierra estará constituido por conductores de cobre desnudos colocados en un plano paralelo a la superficie del terreno, a una profundidad de 50 cm. Los conductores enterrados serán interconectados por termofusión. La configuración dispondrá de cabos de adecuada capacidad y rigidez mecánica para que se puedan conectar todas las estructuras metálicas, normalmente no energizadas, que accidentalmente puedan estarlo, tales como: Carcasas de transformadores, carcasa del generador, carcasa de interruptores, en general carcasa de equipos que tengan alimentación eléctrica, bandejas portacables y ductos de barras, entre otros, así como: Pararrayos, descargadores de sobre tensión, circuitos de control y de iluminación, neutros de máquinas y transformadores, etc.
- Los conductores enterrados fueron seleccionados con calibre 4/0 AWG, tomando en consideración las recomendaciones indicadas en las Normas antes mencionadas y a fin de contrarrestar los efectos de la corrosión y los esfuerzos mecánicos.

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

---

### 8. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Debido a que los movimientos de terreno en el área de la estación están previstos realizarse a mediados del año 2.008, aun no se ha realizado la medición de la resistividad del suelo, por lo que para realizar un diseño inicial del Sistema de Puesta a Tierra, a fin de presentar una revisión a del mismo, se tomara como referencia una medición realizada en un proyecto anterior realizado en la zona de San Diego de Cabrutica cercana a la ubicación de la planta. El proyecto contempla el diseño de la protección catódica de una Línea de Agua de Producción de Ø 16'' que se extiende a través de 9300m. Se espera que los valores de medición que se obtendrán en el área de la estación sean similares a los aquí referenciados, debido a las condiciones geográficas del lugar. Para la medición de la resistividad se utilizo el método de cuatro electrodos de Wenner.

Se debe realizar la observación de que la medición de la resistividad se realizo en un terreno húmedo, debido a lluvias que se suscitaron en días anteriores a la medición.

Analizando las mediciones de resistividad del suelo realizadas en la región de San Diego de Cabrutica, se observa que no existen grandes variaciones entre los valores obtenidos en cada punto de medición y los valores obtenidos son bajos.

Por estas razones se adopta un modelo de suelo uniforme cuyo valor de resistividad este dado por el valor de resistividad más alto encontrado en las mediciones, que constituye la condición más desfavorable para el diseño.

$$\rho = 6.22\Omega \cdot m$$

### 9. TENSIONES MAXIMAS DE TOQUE Y PASO TOLERABLES

Las tensiones máximas de toque y paso tolerables se calcularon considerando una persona de 50 Kg de peso.

Se tomaron en cuenta los valores correspondientes al tiempo de despeje de la falla, resistividad del suelo y del acabado superficial, así como también el espesor de este último. Estos cálculos se muestran a continuación:

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

**TABLA N° 2**  
Tensiones Máximas de Toque y Paso Tolerables

Acabado Superficial	Peso de la Persona = 50KG	
	Tensión de Paso (V)	Tensión de Toque (V)
	Resistividad del Terreno = 6.22 Ohm.m	
Piedra Picada	1056.9	401.8
Asfalto	7775.0	2081.3
Concreto	201.5	187.9
Suelo Natural	190.3	185.1

### 10. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se muestran las tensiones de toque y paso productos de la corrida del Programa TERRAM en las diferentes trayectorias seleccionadas. La ubicación de las trayectorias planteadas para la verificación de los potenciales se encuentran en el anexo D.

**TABLA N° 3**  
Caso 2. Tensiones de Toque y Paso Calculadas.

Trayectorias	Tensión Máx. de Paso (V)	Tensión Máx. de Toque (V)
1	11.27	44.91
2	0.99	60.90
3	3.75	127.37
4	2.75	80.13
5	18.00	100.98
6	10.80	113.14
7	3.71	105.73
8	2.77	130.21
9	3.02	102.96
10	9.41	95.40
11	2.90	107.03
12	6.87	93.11
13	20.71	109.88
14	7.04	123.85
15	13.98	94.85
16	24.42	118.33
17	18.27	119.04
18	22.70	126.51
19	17.16	78.00
20	10.53	128.34
21	14.32	88.36



## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

---

Al comparar las tensiones calculadas con las permitidas, se puede observar, que las tensiones de toque y paso calculadas están por debajo de las permitidas en los turbogeneradores GT-3001 y GT-3002 de la Planta San Diego de Cabrutica.

La resistencia de puesta a tierra de la malla de la isla de generación es de 0.03Ω.

### 11. VERIFICACIÓN DEL AREA MÍNIMA DEL CONDUCTOR DE TIERRA

El área mínima fijada para el conductor de cobre suave trenzado, utilizado para la malla de tierra del área de la isla de generación, es de 184,29 kcmil, equivalente a un conductor 4/0 AWG. Mediante la siguiente formula se verificara la corriente máxima que puede soportar este conductor durante 0.4seg sin sufrir daños.

$$A_{kcmil} = I \times K_f \times \sqrt{t_c}$$

$$I = \frac{A_{kcmil}}{K_f \times \sqrt{t_c}}$$

$$I = 48.33kA$$

Donde:

$A_{kcmil}$	→	Sección del conductor circular [kcmils]
$I$	→	Máxima corriente rms soportada por el conductor de la malla [kA]
$K_f$	→	Constante calculada en el anexo B.
$t_c$	→	Tiempo de exposición de la falla [s].

Esta corriente es mucho mayor que la máxima esperada, lo que garantiza la durabilidad del conductor a lo largo de toda la vida útil de la planta, además de asegurar la solidez mecánica necesaria y la resistencia contra acción corrosiva del suelo. El anexo B muestra el cálculo detallado del calibre del conductor.

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

---

### 12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye que el diseño del Sistema de Puesta a Tierra propuesto para la PLANTA TERMICA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA presenta una resistencia de puesta a tierra de valor menor a un (1) Ohm, por lo que se cumple con el requerimiento de diseño solicitado. La resistencia a tierra de la configuración es de 0,03 Ohm.

De los resultados obtenidos se aprecia que los valores calculados de tensiones de toque y paso de la TABLA N° 3 son inferiores a los valores máximos tolerables de la TABLA N° 2, por lo que podemos asegurar que la red de tierra diseñada es segura para las personas.

No se recomienda utilizar jabalinas en el sistema de puesta a tierra, debido a la baja resistividad del suelo, vasta con arreglos horizontales de electrodos para limitar a valores seguros los potenciales generados.

## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

ANEXO A: Calculo de la corriente maxima de cortocircuito.

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Se realizó un estudio de cortocircuito de la planta a fin de determinar la falla que producirá la mayor corriente a través del sistema de puesta a tierra. Para ello se utilizó el diagrama unifilar simplificado de la figura 3.1.

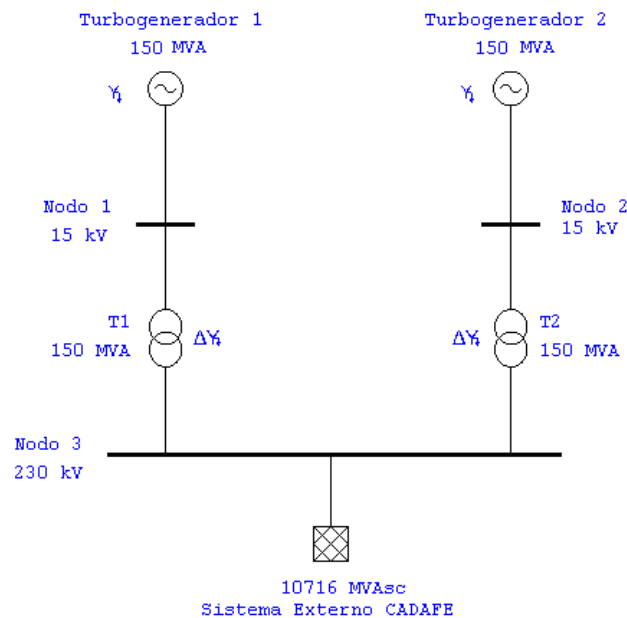


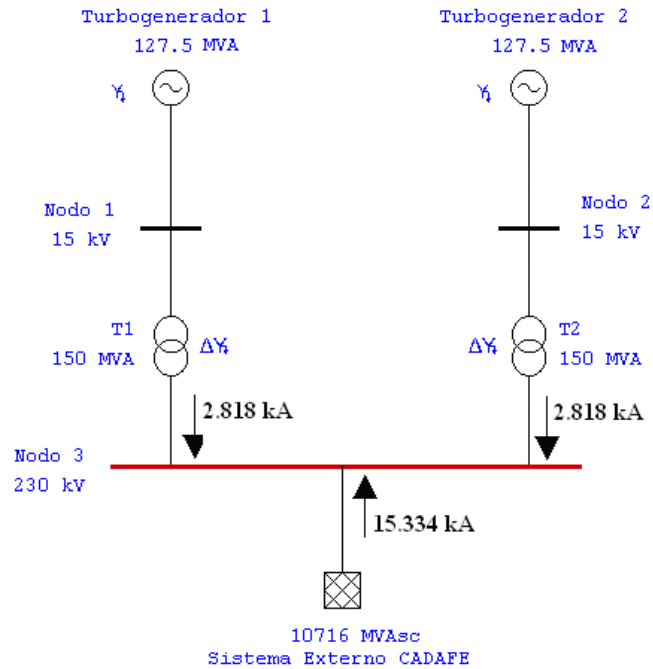
Diagrama unifilar simplificado de la estación.

La corriente de falla a través del neutro de los turbogeneradores está limitada por medio de un reactor a 400A. Para la modelación de los transformadores y el turbogenerador se tomaron datos típicos de sus impedancias de cortocircuito.

El estudio de cortocircuito del sistema se realizó utilizando el software de simulación gráfico de sistemas eléctricos ETAP Power Station.

La mayor corriente de falla a tierra se origina al ocurrir una falla monofásica a tierra en la barra de conexión con el sistema externo CADAFE (nodo 3).

**CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**



Contribuciones a la corriente de falla. Falla monofásica en nodo 3.

Contribuciones a la corriente de falla. Falla monofásica en nodo 3.

Contribución a la corriente de falla		$I_a$ [kA]
Desde	Hacia	
Sistema externo	Nodo 3	15.334
Nodo 1	Nodo 3	2.818
Nodo 2	Nodo 3	2.818
Corriente de falla total [kA]		20.970



**PROYECTO PLANTA TERMICA DE GENERACION DE  
ENERGIA ELECTRICA SAN DIEGO DE CABRUTICA**

**1123-03-90-E01-CAL-016**

**Rev. a**

## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

ANEXO B: Dimensionamiento del calibre del conductor.

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La corriente de falla total de 20.970kA es la corriente que se utilizara para el dimensionamiento del calibre del conductor de puesta a tierra.

$$I = 20.970kA$$

Se utilizara el conductor de cobre del tipo annealed soft-drawn, debido a su alta resistencia a los esfuerzos mecánicos, a la acción corrosiva del suelo y su alta conductividad.

Los valores de los parámetros TCAP,  $K_0$ ,  $\alpha_r$ ,  $\rho_r$  son obtenidos de la tabla 1. Material Constans. IEEE Std 80-2.000.

Se fijo una temperatura ambiente de 30°C, de acuerdo a las condiciones del lugar, y una temperatura máxima igual a la temperatura de fusión del conductor de 1083°C.

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

$$A = 91.81066kcmil$$

Realizando la conversión a  $mm^2$  ( $1.974kcmil = 1mm^2$ ).

$$A = 46.50996mm^2$$

Se selecciona el calibre del conductor a utilizar, de acuerdo a los valores comerciales.

El calibre mínimo requerido por el sistema de puesta a tierra es el N° 1/0 AWG. Se utilizara un conductor AWG 4/0 ya que es el conductor mínimo recomendado por la norma IEEE Std 665-1.995 y fijado en los criterios de diseño, debido a los esfuerzos mecánicos a los que se vera sometido el conductor.

Fijando el calibre del conductor a un AWG 4/0 podemos calcular la corriente máxima que puede circular por este durante 0.4seg sin que sufrir daños, debido al calentamiento.

$$I = \frac{A_{kcmil}}{197.4} \cdot \sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}$$

## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

$$I = 48.33339kA$$

Esta corriente es mucho mayor que la máxima esperada, lo que garantiza la durabilidad del conductor a lo largo de toda la vida útil de la planta, además de asegurar la solidez mecánica necesaria y la resistencia contra acción corrosiva del suelo.



## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

ANEXO C: Calculo de la corriente maxima de malla.

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La corriente máxima de malla depende de diversos factores, como el factor de división de corriente, el factor de decremento y el factor de corrección por proyección.

$$I_G = I_f \cdot S_f \cdot D_f \cdot C_p$$

Donde  $I_f$  esta dada por la contribución del sistema externo a la falla, debido a que las contribuciones provenientes de los nodos 1 y 2 corresponden a fuentes de falla locales, debido a la conexión del los transformadores elevadores y estas no contribuyen a la elevación del potencial del terreno (GPR).

$$I_f = 15.334kA$$

Debido a que el valor de  $R_g$  calculado mediante la expresión de Sverak es muy bajo, no se logra obtener el valor del factor de división de corriente a través del método grafico.

Por esta razón se utilizara para el cálculo un método basado en tablas y ecuaciones, también presentado en la Norma IEEE Std. 80-2000.

Este método consiste en determinar el valor  $S_f$  considerando un divisor de corriente entre la resistencia del sistema de puesta a tierra ( $R_g$ ) y la impedancia equivalente aproximada ( $Z_{eq}$ ) de los demás caminos posibles de retorno de la corriente de falla hacia la fuente. Esta impedancia equivalente resulta de la impedancia entre los cables de guarda de las líneas de transmisión y los neutros de las líneas de distribución.

En el nodo de falla se tienen cuatro líneas de transmisión y una línea de distribución, pertenecientes al sistema de CADAFE. El valor de la impedancia equivalente ( $Z_{eq}$ ) se obtuvo a partir de la Tabla C1, IEEE Std. 80-2.000.

$$Z_{eq} = (0.45 + j0.16)\Omega$$

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right|$$

$$S_f = \left| \frac{(0.45 + j0.16)\Omega}{(0.45 + j0.16)\Omega + 0.02815\Omega} \right|$$

$$S_f = 0.94722$$

## CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

---

Para el cálculo del factor de decremento se seleccionó un valor de X/R típico de acuerdo a la ubicación de la falla, correspondiente a la salida de una estación de generación, en el lado de alta tensión del transformador elevador, debido a que no se contaba con esta información para el cálculo. El valor de X/R fijado fue de 60.

$$T_a = \frac{X}{60 \cdot 2\pi \cdot R} = 0.159155 \text{seg}$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \cdot (1 - e^{-2 \frac{t_f}{T_a}})}$$

$$D_f = 1.14792$$

Debido a que el nivel de cortocircuito provisto por el CADAFE corresponde al nivel de cortocircuito esperado para el año 2.030 y debido se ha considerado en el diseño la totalidad de la planta de generación, el factor de corrección por proyección se fijara igual a la unidad.

$$C_p = 1$$

Entonces procedemos a calcular la corriente máxima de malla:

$$I_G = I_f \cdot S_f \cdot D_f \cdot C_p$$

$$I_G = 16.67316A$$

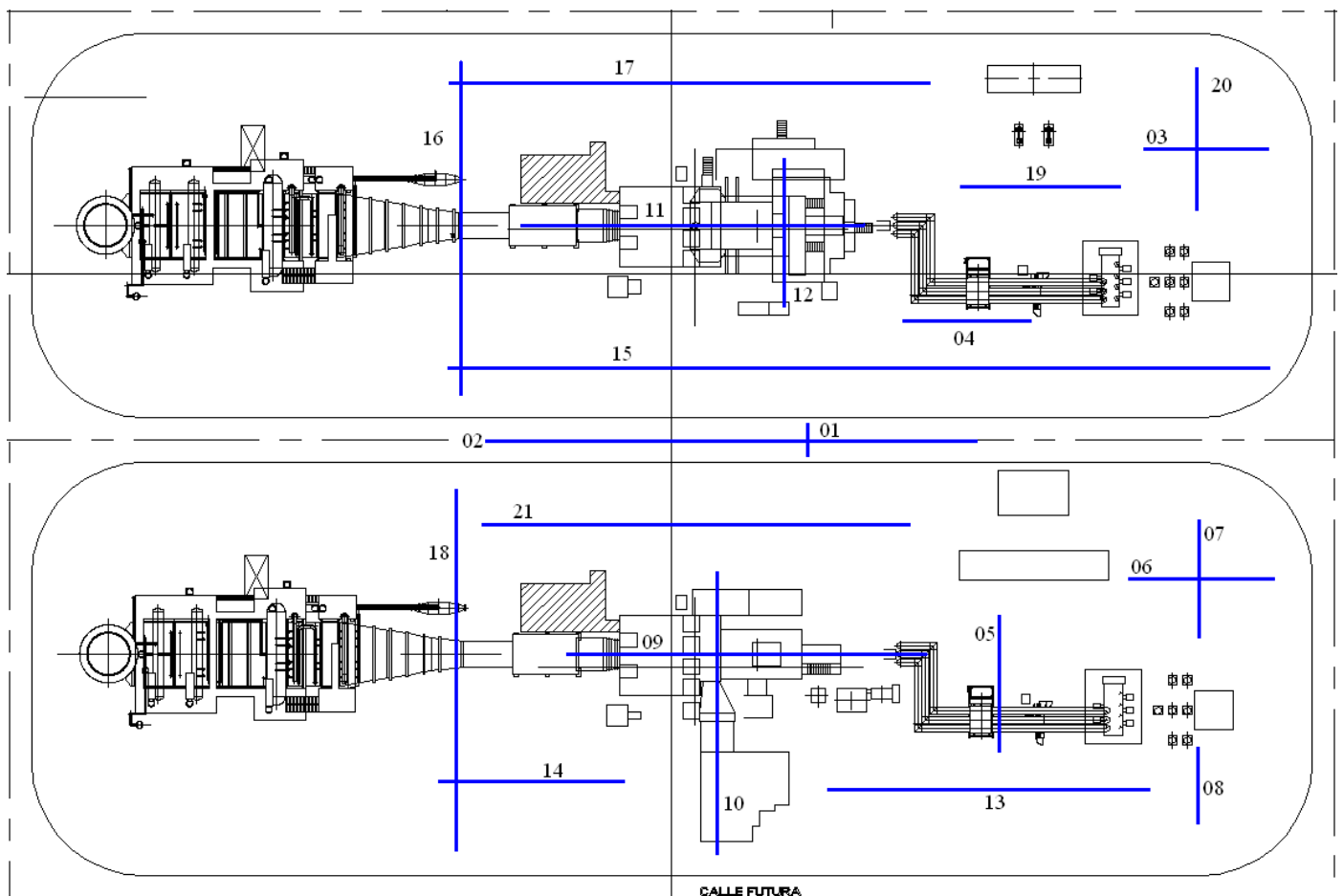
## **CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

---

ANEXO D: Trayectorias para Determinar Tensiones de Toque y Paso

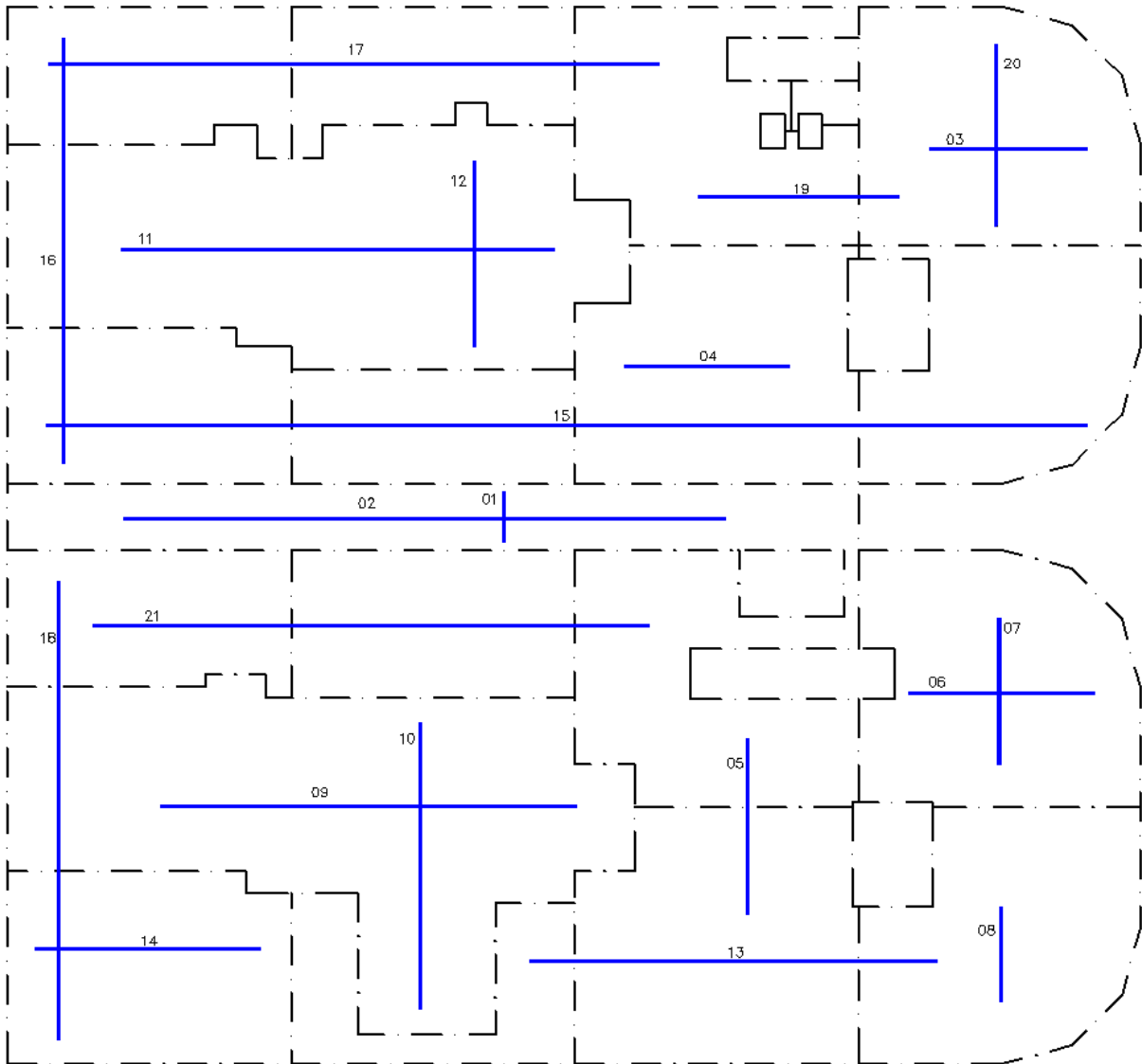
**CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Trayectorias de verificación de las tensiones de toque y de paso. Area de la Isla de generación.



Trayectorias de verificación de las tensiones de Toque y de Paso.  
Área de la Isla de Generación.

**CALCULO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**



Trayectorias de verificación de las tensiones de Toque y de Paso sobre el trazado de la malla en el área de la Isla de Generación.