



| EMISIÓN | ELABORADO: | REVISADO: | APROBADO: | FECHA: |
|---------|---------------------|------------------|-------------------|-------------|
| PRIMERA | Ing. Fausto Carrión | Ing. Bryan Quero | Ing. Jorge Proaño | Agosto 2023 |
| SEGUNDA | | | | |
| FINAL | Ing. Fausto Carrión | Ing. Bryan Quero | Ing. Jorge Proaño | Agosto 2023 |
| FIRMA | | | | |

Derechos reservados sobre este documento. Queda prohibida la reproducción y/o distribución de este documento por personas o entidades ajenas al proyecto para el cual fue elaborado.

| | | | |
|-------------------|---|-----------------|------|
| PROYECTO: | "SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD" | | |
| DOCUMENTO: | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) | | |
| CÓDIGO: | SE-SU-23-ME-05 | N° HOJA: | 1/11 |

REV. ENGYWORK:



REV. CLIENTE



| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2. CONSIDERACIONES TECNICAS DE DISEÑO DE LA AMPLIACION DE LA MALLA A TIERRA | 3 |
| 3. VALORES DE RESISTIVIDAD | 4 |
| 4. DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA | 5 |
| 4.1 PARAMETROS CONSIDERADOS..... | 5 |
| 4.2 PROCESO DE CALCULO PARA LOS CRITERIOS DE POTENCIALES DE TOQUE Y PASO. 5 | |
| 4.3 MAXIMA CORRIENTE EN LA MALLA..... | 6 |
| 4.4 VOLTAJE DE MALLA..... | 7 |
| 4.5 CONCLUSIONES..... | 7 |
| 4.6 BIBLIOGRAFIA..... | 7 |
| 5. INTRODUCCIÓN DE APANTALLAMIENTO | 3 |
| 6. MÉTODO DE CALCULO | 3 |
| 7. REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO | 3 |
| 8. METODO DE CALCULO | 4 |
| 9. Cálculo de la densidad de rayos a tierra GFD en la subestación | 6 |
| 10. PLANOS DEL APANTALLAMIENTO | 6 |

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

1. INTRODUCCIÓN

La subestación Shushufindi ha sido sujeto de varias ampliaciones desde su puesta en operación, en la primera ampliación se instaló un nuevo switchgear de 13.8 kV para lo cual fue necesario ampliar la casa de control, posteriormente y debido al crecimiento del sistema de 69 kV del Sistema Sucumbíos, se cambió el pórtico tipo terminal por un cuadro de 69 kV, a fin de poder alimentar a la subestación Tarapoa a través de una posición completa de línea de 69 kV, por lo que para esta ampliación se implementó un nuevo sistema de puesta a tierra con conductor desnudo de cobre 4/0 AWG de 19 hilos, conductor que tiene una capacidad térmica de 42.7 kA durante 0.5 seg. Finalmente se instaló el transformador Crompton de 10/12.5 MVA 69/13.8 KV conexión Dy1.

En esta oportunidad la ampliación consiste en instalar un segundo transformador 69/13.8 kV, de conexión Dy1, 16/20 MVA 69/13.8 KV con su correspondiente switchgear que trabajarán independientemente de las instalaciones asociadas al transformador Crompton existente.

2. CONSIDERACIONES TECNICAS DE DISEÑO DE LA AMPLIACION DE LA MALLA A TIERRA

Al no existir ningún cambio en la topología de 69 kV de la subestación, los niveles de cortocircuito fase tierra a este nivel de voltaje que circularan por la malla de tierra de la subestación Shushufindi, son exactamente iguales a los existentes y esta falla es la que determina las características con las que debe ser diseñada la malla para brindar la protección al personal y equipamiento de la subestación.

Actualmente Shushufindi se alimenta de la barra de 69 kV de la subestación Jivino de CELEC TRANSELECTRIC, los niveles de cortocircuito de esta barra son los siguientes:

Falla trifásica

$I_{kss} = 10,841 \text{ kA}$

$R_0 = 0,055 \Omega$

$X_0 = 1,328 \Omega$

$Z_0 = 1,329 \Omega$

$R_1 = 0,241 \Omega$

$X_1 = 5,417 \Omega$

$Z_1 = 5,422 \Omega$

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

$$R2= 0,230 \, \Omega$$

$$X2= 5,382 \, \Omega$$

$$Z2= 5,387 \, \Omega$$

Falla monofásica

$$Ikss=8,09 \, \text{kA}$$

$$R= 0,241 \, \Omega$$

$$X=5,417 \, \Omega$$

$$Z= 5,422 \, \Omega$$

Si se considera que en el futuro el sistema de 69 kV de CNEL Sucumbíos se repotenciaran a líneas con conductor ACAR 500, la corriente de falla monofásica en la barra de 69 KV de Shushufindi será de 1.579 kA.

3. VALORES DE RESISTIVIDAD

Al existir ya una malla en el terreno de la subestación cualquier medición de resistividad del terreno esta alterado por la presencia de los conductores de la malla, por lo que se realizó la medición de resistencia de malla y se obtuvo valores aproximados, ya que físicamente no es posible medirla debido a la distancia entre electrodos del equipo de medición que se requiere y que en las actuales circunstancias no es posible obtenerla.

Los valores medidos tienen un promedio de $2.72 \, \Omega$, considerando las características de la malla actual y aplicando la fórmula de resistencia determinada en la Norma 80 de la IEEE, se obtiene que la resistividad de suelo es del orden de $125 \, \Omega\text{-m}$. Las consideraciones de cálculo son las siguientes:

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

LT= Longitud del conductor de cobre 4/0 AWG: 252 m (malla existente)

A= $18 \times 18 \, \text{m}^2 = 324 \, \text{m}^2$ (malla existente)

h= 0.5 m profundidad de la malla

$$R_g = 0,02744 \cdot \rho$$

Si $R_g = 2.72 \, \Omega$

Se obtiene que: $\rho = 125 \, \Omega\text{-m}$.

Con estos valores se procederá a diseñar la malla de tierra.

4. DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA

El presente diseño está realizado en base a los criterios y recomendaciones de la Norma 80 de la IEEE, la misma que establece los voltajes de paso y de toque máximos que deben ser obtenidos en el diseño a fin de obtener una instalación segura y confiable frente a la ocurrencia de descargas atmosféricas y cortocircuitos que se presenten en dichas instalaciones:

4.1 PARAMETROS CONSIDERADOS

El valor de la resistividad del terreno fue determinado en el numeral 3 y es de 125 $\Omega \cdot m$.

Los valores de cortocircuitos fase tierra fueron determinados en el numeral 2, la corriente para una falla fase tierra en el lado de 69 kV es 1579 Amp para la subestación Shushufindi:

| BARRAS SE SHUSHUFINDIALTA | Trifásico | | Fase tierra | RELACION X/R | |
|------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------|-------|
| | Ikss 3 ϕ [kA] | Skss [MVA] | Ikss 1 ϕ -T [kA] | X0/R0 | X1/R1 |
| 69 KV | 2,126 | 188,71 | 1,579 | 3,31 | 31,28 |

El área de terreno empleada en la malla de tierra de esta subestación es de 678 m².

Al ser una ampliación de la malla existente, el conductor es cobre desnudo 4/0 AWG de 19 hilos de 13,40 mm de diámetro y 107,2 mm² de sección, cuya corriente de fusión a 30 ciclos es de 42.7 kA.

El tiempo de duración de la falla se considera 0,5 seg.

La profundidad de la malla 0,5 metros.

La resistividad y el espesor de la grava de la subestación está considerada de 2500 ohm-metros y de un espesor de 15 cm, valores que son utilizados en los diseños de este tipo.

4.2 PROCESO DE CALCULO PARA LOS CRITERIOS DE POTENCIALES DE TOQUE Y PASO.

Se procede a calcular el coeficiente Cs con la expresión:

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

$$Cs = 1 - (0.09 * (1 - \rho / \rho_s)) / (2 * h_s + 0.09)$$

$$Cs = 1 - (0.09 * (1 - 125 / 2500)) / (2 * 0.15 + 0.09)$$

$$Cs = 0.781$$

Con este coeficiente se calcula el voltaje de paso y de toque de la malla con las siguientes expresiones:

$$E_{step} = (1000 + 6 * Cs * \rho_s) * 0.157 / \sqrt{t}$$

$$E_{touch} = (1000 + 1.5 * Cs * \rho_s) * 0.157 / \sqrt{t}$$

Los valores obtenidos son:

$$E_{step} = 2.822,36 \text{ volts}$$

$$E_{touch} = 872.11 \text{ volts}$$

El diseño debe mantener la geometría de la malla existente con cuadrículas de 3 x 3 metros a lo largo de la ampliación, a fin de que los potenciales en la malla tengan una distribución uniforme de potenciales. Con esta ampliación la malla tiene una longitud de conductor de 561 metros de cable de cobre desnudo 4/0 AWG.

Se procede a calcular la resistencia de la malla con la siguiente expresión:

$$R_g = \rho * (1/LT + (1/\sqrt{20 * A})) * (1 + 1/(1 + h * (\sqrt{20/A})))$$

$$R_g = 2.30 \text{ ohmios}$$

4.3 MAXIMA CORRIENTE EN LA MALLA

De acuerdo al procedimiento de cálculo de la Norma 80 de la IEEE, la corriente de falla se divide en los diferentes elementos asociados a la subestación y establece que el factor de disipación está en función de las líneas del primario que ingresan a la subestación y del valor de resistencia de pie de torre de estas líneas, recomiendan utilizar valores tipos de las resistencias equivalentes de estas configuraciones con los cuales se establece el valor de difusión de la corriente de falla a tierra, para el presente caso este valor es **0,32** de la corriente máxima de falla que en este caso es 1,579 kA que corresponde al cortocircuito fase tierra en la barra de 69 kV de Shushufindi, ya que en esta falla hay circulación de corriente por la malla. El factor de decremento en base a la relación X/R es de 1,043 Por tanto, se tiene que:

$$I_G = 1,043 * 0,32 * 1.579 \text{ kA}$$

$$I_G = 0.527 \text{ kA.}$$

Con este valor se procede a calcular el GPR en la malla

$$E_{I_G} = 0.527 \text{ kA} * 2,3 \Omega = 1.212,1 \text{ Volt}$$

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

Los voltajes de paso y de toque de la malla calculados son:

E_{paso}= 2.822,36 volts

E_{toque}= **872,11**

El valor del GPR supera al voltaje de toque permitido por lo que es necesario analizar con el valor del voltaje de malla a la máxima corriente de falla.

4.4 VOLTAJE DE MALLA

El máximo valor del voltaje de la malla producida por la corriente de falla a tierra en la barra de 69 kV es de:

E_{malla}= 159,74 volts.

E_{paso} = 154,44 volts

El voltaje de malla que se produce en la subestación únicamente alcanza al 18.32% del voltaje de toque permitido.

4.5 CONCLUSIONES

Los valores de voltaje de la malla son valores inferiores al voltaje de toque y paso permitidos, implica que el diseño cumple las exigencias técnicas de seguridad.

Al tener un amplio margen entre los valores de malla y paso con los valores permitidos, la malla puede soportar una mayor corriente de cortocircuito de hasta 8,62 kA de corriente de falla fase tierra en 69 kV y los voltajes de malla y paso alcanzan valores de : 872,05 y 843,09 voltios, inferiores al voltaje de toque permitido de **872,11** voltios; lo que permite disponer de una gran flexibilidad para que esta subestación en el futuro soporte incrementos de niveles de cortocircuitos por expansión del sistema o pueda conectarse a sistemas con auto generación.

4.6 BIBLIOGRAFIA

. NORMA 80 y 81 IEEE, 2013

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

APANTALLAMIENTO

5. INTRODUCCIÓN DE APANTALLAMIENTO

El crecimiento de la demanda y a fin de atender los requerimientos del sector industrial del cantón Shushufindi especialmente en la industria petrolera hace necesario la repotenciación de la subestación Shushufindi con una unidad adicional de transformación de 16/20 MVA.

Un punto fundamental en los sistemas de subtransmisión de energía es realizar un diseño apropiado del sistema de apantallamiento de los equipos de la subestación a fin de protegerlos de descargas atmosféricas que caigan en la zona y los dañen, para el diseño se utilizará la guía de apantallamiento establecida por la **IEEE en la norma 998-2012**.

6. MÉTODO DE CALCULO

El diseño estará realizado en base al modelo electro geométrico EGM establecido en la IEEE norma 998-2012 y de este modelo se utilizará la versión estándar de la norma con la cual se realizará los cálculos de los radios de las esferas rodantes con las cuales se apantalla la subestación.

7. REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO

Los niveles básicos de aislamiento BIL serán de 325 kV para 69 kV.

El promedio anual de días de tormenta o nivel ceráunico de acuerdo a lo establecido por INECEL tiene un valor de 20 rayos/Km²/año para esta zona, para el presente cálculo y en virtud de que este trabajo no se lo actualizado desde hace muchos años y en las condiciones cambiantes del tiempo se considerará un valor de 60 para dar mayor seguridad al diseño.

Para el apantallamiento se utilizará mástiles los mismos que son parte del suministro de las estructuras metálicas y los cables de guarda serán de acero galvanizado tipo high strength de 9 mm de diámetro, en el patio de 69 kV se instalaran los mástiles a una altura máxima de 16.2 m de altura que se tiene con las columnas del cuadro que se utilizaran en este proyecto.

Los conductores de fase de esta subestación son de aluminio tipo ASC o ACAR de 500 MCM de 20.60 mm de diámetro.

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

El porcentaje de posibles impactos no deseados por descargas atmosféricas debe ser menor al 1% de acuerdo a norma.

8. METODO DE CALCULO

El Método consiste en calcular las siguientes variables:

Impedancia del rayo bajo la corona

Corriente de choque permitida

Radio de la esfera rodante

Probabilidad de falla

8.1 Calculo de la impedancia de rayo bajo la corona

Para el cálculo de la impedancia del rayo bajo la corona se utilizan las siguientes formulas propuestas en la IEEE 998-2002

$$Z_s = 60 \cdot (\sqrt{\ln(2 \cdot h/R_c) \cdot \ln(2 \cdot h/r)})$$

R_c Radio de la corona en m

h altura de los conductores de la barra superior: 11.60 m.

r radio del conductor en m: 0,01030

R_c se calcula con la siguiente fórmula dada en IEEE 998-2002

$$R_c \cdot \ln((2 \cdot h)/R_c) - V_c/E_0 = 0$$

Donde:

h = altura de la barra

V_c = BIL, 325 para 69 KV

E_0 = Gradiente de corona limitante (valor recomendado 1500 kV/m)

$$R_c \cdot \ln(2 \cdot 11.60/R_c) - 325/1500 = 0 \text{ para } 69 \text{ kV}$$

Resolviendo por métodos numéricos las ecuaciones dadas se obtiene que para $R_c = 0,033061$ m para 69 kV.

Con estos valores de R_c para 69 kV, se calcula la impedancia del rayo bajo la corona y se obtienen los siguientes valores:

$$Z_s = 426,77 \, \Omega \text{ para } 69 \text{ kV}$$

8.2 Corriente de choque permitida

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

La corriente de choque permitida se calcula con la siguiente expresión:

$$I_g = 2.2 \cdot BIL / Z_s$$

$$I_g = 1,675 \text{ kA para } 69 \text{ kV}$$

8.3 Radio de la Esfera rodante S

El radio de la esfera rodante se calcula con la expresión standard de IEEE 998 que se detalla a continuación:

$$S = 8 \cdot k \cdot I_g^{0.65}$$

Siendo $k = 1$ para cable de guardia y 1.2 para cuando se usa mástil.

De esta expresión se tiene que

$$S = 11.19 \text{ para cable de guarda y } S = 13.43 \text{ para mástiles.}$$

8.4 Probabilidad de falla de blindaje

La probabilidad de que la corriente de choque se produzca y que sea mayor que esta se calcula con la siguiente expresión:

$$P(I_g) = 1 / (1 + (I / 24)^{2.6})$$

$$P(1,675) = 1 / (1 + (1,675 / 24)^{2.6})$$

$$P(I_g) = 0,999014 \text{ para } 69 \text{ kV}$$

Los valores de que se exceda esta corriente superan el 99.9 %, ya que normalmente los rayos están en el orden de 20 o 30 kA.

La probabilidad P_m de que la corriente sea menor a la corriente de choque será el riesgo de que ha fallado el blindaje y este valor será:

$$P_m = 1 - P(I_g)$$

$$P_m = 1 - 0,999014 = 0,0009856 \text{ en el patio de } 69 \text{ kV que en porcentaje representa el } 0,09 \%$$

Este valor cumple las condiciones del diseño ya que son menores al 1%.

| | | |
|---|--|---|
|  | MEMORIA ELECTRICA (MALLA DE TIERRA / APANTALLAMIENTO) |  |
| | SUC ESTUDIO TÉCNICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SHUSHUFINDI GD | |

9. Cálculo de la densidad de rayos a tierra GFD en la subestación

La densidad de rayos a tierra o GFD, este se calcula con la siguiente expresión:

$$GFD = 0.12 N_c$$

N_c = nivel cerámico de la zona que hemos establecido en 60 rayos/Km²/año

$$GFD = 0.12 * 60 \text{ rayos/Km}^2/\text{año}$$

$$GFD = 7.2 \text{ rayos/Km}^2/\text{año}$$

La subestación tiene un área de 2,497.44 m² que equivale a 0.0025 Km²

Por lo que la densidad de rayos en la subestación GFD(SE) sin blindaje será:

$$GFD(SE) = 7.2 * 0.0025 = 0.018 \text{ rayos/año}$$

Este valor se interpreta que sin blindaje en la subestación en 55,55 años caerá un rayo y por su valor de corriente dañará la subestación.

Con el apantallamiento electro geométrico que se ha diseñado la subestación el GFD(SEb) con blindaje será el valor calculado de 0.018 rayos/años multiplicado por el riesgo de falla de blindaje, se considera el valor de mayor riesgo que se produce es de una probabilidad de 0.00098 se asume de 0.001 y se obtiene:

$$GFD(SEb) = 0.018 \text{ rayos/año} * 0.001 = 0.000018 \text{ rayos/año}$$

Valor que es mucho menor al que recomienda la IEEE 998 que es de 0.005 rayos/año

El valor obtenido de apantallamiento alcanza el 0,36% del recomendado por la IEEE 998, por lo que no existirá falla del blindaje.

10. PLANOS DEL APANTALLAMIENTO

En el Anexos adjunto constan en planos SU-SE-23-PL-09 en el que se detalla el procedimiento gráfico realizado en ACAD para el apantallamiento de esta subestación y consta plano de diseño definitivo del sistema.