

$$I_{admisible} > I_{nominal} \rightarrow 270,83 \text{ A} > 154 \text{ A}$$

4.2.4 TRANSFORMADOR DE SERVICIOS AUXILIARES

La intensidad requerida para la interconexión entre el transformador de servicios auxiliares y su correspondiente celda de media tensión que circulará por cada conductor será la siguiente:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{100 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 30 \text{ kV}} = 1,924 \text{ A}$$

Por lo tanto, el conductor seleccionado que cumple con las condiciones para realizar las interconexiones dispone de las siguientes características:

Material	Aluminio
Denominación del cable	AL HEPRZ1 (AS)
Tensión nominal	18/30 kV
Configuración.....	Un cable por fase
Resistencia eléctrica en c.a. a 105 °C y 50 Hz.....	0,168 Ω/km
Sección.....	240 mm ²
Diámetro total del cable.....	36 mm
Peso	1,600 kg/m
Carga de rotura	850 N/cm ²
Intensidad admisible según fabricante	345 A

Para la elección del conductor deberemos tener en cuenta las características en las que se instalarán estos cables, debido a que supondrán un aumento o disminución en la capacidad admisible del mismo. Estas características son:

Tipo de instalación.....	Instalación enterrada
Configuración del cable	Cables en interior de tubos enterrados
Temperatura del terreno	45°C
Resistividad térmica del terreno	2 K·m/W
Profundidad de enterramiento.....	1,50 m
Número de ternos distintos en la zanja	N/A
Separación entre cables	0 m

En base a estos condicionantes, el factor de minoración de la intensidad admisible del conductor es el siguiente:

$$k = 0,785$$

La intensidad admisible de este conductor en la configuración elegida será de 345 A, que minorada con el coeficiente anterior será de:

$$I_{adm} = I \cdot k = 345 \cdot 0,785 = 270,83 \text{ A}$$

Se demuestra que el conductor elegido es válido, ya que:

$$I_{admisible} > I_{nominal} \rightarrow 270,83 \text{ A} > 1,924 \text{ A}$$

4.3 CÁLCULO MECÁNICO DE EMBARRADOS RÍGIDOS

Existirán dos tipos de embarrados rígidos en 220 kV: las uniones entre los TI y los interruptores de las posiciones de línea y transformación y las barras principales.

4.3.1 POSICIONES DE LÍNEAS Y TRANSFORMACIÓN

4.3.1.1 DATOS DE DISEÑO

Los datos de diseño para el cálculo mecánico de embarrados son los siguientes:

Intensidad de cortocircuito de diseño	40 kA
Relación R/X del sistema	0,2
Duración del cortocircuito	0,5 s
Material	Aluminio
Aleación	6063-T6
Conductividad térmica	201 W/m·K
Coeficiente de dilatación lineal	0,023mm/m·K
Resistividad eléctrica a 20 °C	0,0325 $\mu\Omega\cdot\text{m}$
Coeficiente de temperatura de resistencia eléctrica a 20 °C	0,0035 K ⁻¹
Intensidad nominal a 30 °C	1546 A
Resistencia a la tracción mínima	215 N/mm ²
Límite de fluencia mínimo	160 N/mm ²
Módulo de elasticidad	70000 N/mm ²

Diámetro exterior/interior del conductor	63/47 mm
Espesor de la pared	8 mm
Sección nominal.....	1382 mm ²
Peso propio	3,73 kg/m
Momento de inercia.....	53,37 cm ⁴
Momento resistente	14,35 cm ³
Longitud del vano	4,50 m
Distancia entre fases	4,00 m
Anclajes	Fijo – Elástico
Zona.....	B
Velocidad del viento	140 km/h
Presión del viento.....	93,5 DaN/m ²

4.3.1.2 CÁLCULO ESTÁTICO DEL EMBARRADO

4.3.1.2.1 ESFUERZO POR CARGAS PERMANENTES Y VARIABLES

Los esfuerzos por peso propio y cable amortiguador serán:

$$F_{pp} = P_{pp} \cdot g = 3,73 \cdot 9,81 = 36,59 \text{ N/m}$$

$$F_{pa} = \frac{4}{3} F_{cable} = \frac{4}{3} \cdot 1,6 \cdot 9,81 = 20,93 \text{ N/m}$$

$$F_p = F_{pp} + F_{pa} = 36,59 + 20,93 = 57,52 \text{ N/m}$$

La sobrecarga debida al viento:

$$F_w = P_w \cdot \phi_{exteriortubo} = 935 \cdot 0,063 = 58,91 \text{ N/m}$$

La sobrecarga debida al hielo:

$$F_h = 0,18 \cdot \sqrt{D} \cdot 9,81 = 0,18 \cdot 63 \cdot 9,81 = 14,02 \text{ N/m}$$

En total:

$$F_{est} = \sqrt{F_w^2 + (F_p + F_h)^2} = \sqrt{58,91^2 + (57,52 + 14,02)^2} = 92,67 \text{ N/m}$$

Esto nos da un momento flector y una tensión máxima de las siguientes características:

$$M_{est} = \frac{F_{est} \times l^2}{8} = \frac{92,67 \cdot 4,50^2}{8} = 234,56 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con un coeficiente de seguridad de:

$$\text{Coeficiente de seguridad } (\sigma_{est}) = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_{est}} = \frac{160}{16,35} = 9,78$$

4.3.1.2.2 VALOR DE CRESTA DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

El valor de cresta de la corriente de cortocircuito en el caso de un cortocircuito trifásico equilibrado, según la norma UNE-EN 60909, viene definido por la siguiente expresión:

$$I_{p3} = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3}$$

Donde:

- I_{p3} es el valor de cresta de la corriente de cortocircuito mencionado;
- El factor κ es un coeficiente obtenido de las siguientes tablas y expresión, encontradas ambas en la norma anteriormente mencionada;

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}}$$

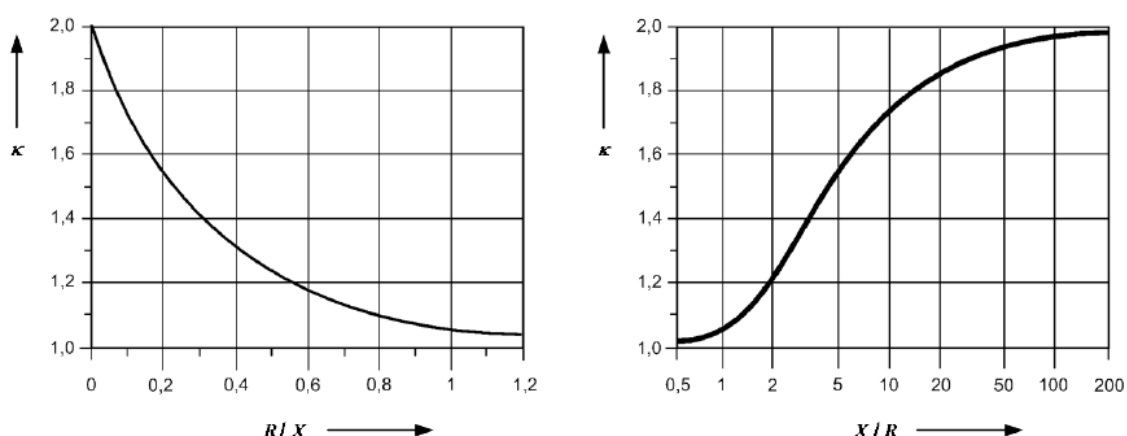


Ilustración 4. Factor κ para circuitos en serie como función de R/X o X/R

- I''_{k3} es la corriente simétrica inicial del cortocircuito trifásico en valor eficaz.

Por lo tanto, en nuestro caso:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot 0,2} = 1,558$$

$$I_{p3} = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3} = \sqrt{2} \cdot 1,558 \cdot 40000 = 88,12 \text{ kA}$$

4.3.1.2.3 ESFUERZO ESTÁTICO POR CORTOCIRCUITO

En un sistema trifásico, con los conductores principales dispuestos sobre el mismo plano con igual distancia entre ejes, la fuerza máxima que actúa sobre el conductor principal central durante un cortocircuito trifásico, según la Norma UNE 60865, se obtiene de la expresión:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m}$$

Donde:

- μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío y tiene un valor de $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A²;
- l es la máxima distancia entre ejes de soportes adyacentes. En este caso es igual a la longitud del vano;
- a_m es la distancia equivalente entre conductores principales. En este caso, dicho valor corresponde con la distancia media entre fases.

En nuestro caso,

$$a_m = 4 \text{ m}$$

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 88120^2 \cdot \frac{4,5}{4} = 1513,24 \text{ N}$$

Para el caso de una viga apoyada empotrada, como es el disponer de una pieza elástica en el extremo del tubo de Aluminio, la tensión de trabajo en el conductor viene dado por la expresión:

$$\sigma_{m3} = \frac{1}{8} \times \frac{\frac{F_{m3}}{l} \times l^2}{W} = \frac{1}{8} \times \frac{336,27 \times 4,5}{14,35} = 59,32 \text{ N/mm}^2$$

Esto nos da un coeficiente de seguridad en cortocircuito de:

$$\text{Coeficiente de seguridad (cortocircuito)} = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_{m3}} = \frac{160}{59,32} = 2,69$$

4.3.1.2.4 COMBINACIÓN DE ACCIONES: CORTOCIRCUITO, CARGAS PERMANENTES Y VARIABLES

La fórmula para el cálculo de las acciones es la siguiente:

$$F_H = \frac{F_{m3}}{l} + 1,5 \cdot 0,5 \cdot F_w = \frac{1513,24}{4,50} + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 58,91 = 380,45 \text{ N/m}$$




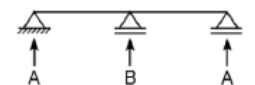
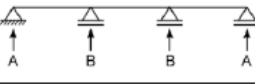
$$F_V = 1,35 \cdot F_p + 1,5 \cdot 0,5 \cdot F_{hielo} = 1,35 \cdot 57,52 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 14,02 = 88,16 \text{ N/m}$$

Y la resultante será de:

$$F_{com} = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} = \sqrt{380,45^2 + 88,16^2} = 390,54 \text{ N/m}$$

Esto nos da un momento flector y una tensión máxima de las siguientes características:

$$\sigma_{com} = \frac{M_{com}}{W} = \frac{988,54}{14,35} = 68,89 \text{ N/mm}^2$$

Tipo de viga y de soporte		Factor α	Factor β^*	Factor γ
Vigas de un solo vano	A y B: soportes simples	 A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: soporte empotrado B: soporte simple	 A: 0,625 B: 0,375	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	A y B: soportes empotrados	 A: 0,5 B: 0,5	$\frac{8}{16} = 0,5$	3,56
Vigas continua con soportes simples equidistantes	Dos vanos	 A: 0,375 B: 1,25	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	Tres o más vanos	 A: 0,4 B: 1,1	$\frac{8}{11} = 0,73$	3,56

* Se incluyen los efectos de plasticidad.

Ilustración 6. Factores para diferentes posiciones de apoyo de embarrados

En este caso, estos coeficientes tienen los valores siguientes:

$$\alpha = 0,5 \quad \beta = 1,0 \quad \gamma = 1,57$$

4.3.1.3.2 TENSIÓN MECÁNICA ADMISIBLE EN UN CONDUCTOR

Un conductor único se supone capaz de soportar fuerzas de cortocircuito cuando:

$$\sigma_d \leq q \cdot f_y$$

donde f_y es la tensión mecánica correspondiente al límite elástico, y el factor q es un parámetro que describe el aumento de la tensión mecánica admisible en un conductor debido a su comportamiento plástico fuera de sus apoyos, teniendo en cuenta la forma del conductor.

El factor q debe tomarse de la siguiente ilustración, la cual corresponde a la Tabla 4 de la Norma UNE-EN 60865-1.

En este caso, dicho coeficiente tiene el siguiente valor:

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2 \cdot t/d)^3}{1 - (1 - 2 \cdot t/d)^4} = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2 \cdot 8/63)^3}{1 - (1 - 2 \cdot 8/63)^4} = 1,44$$

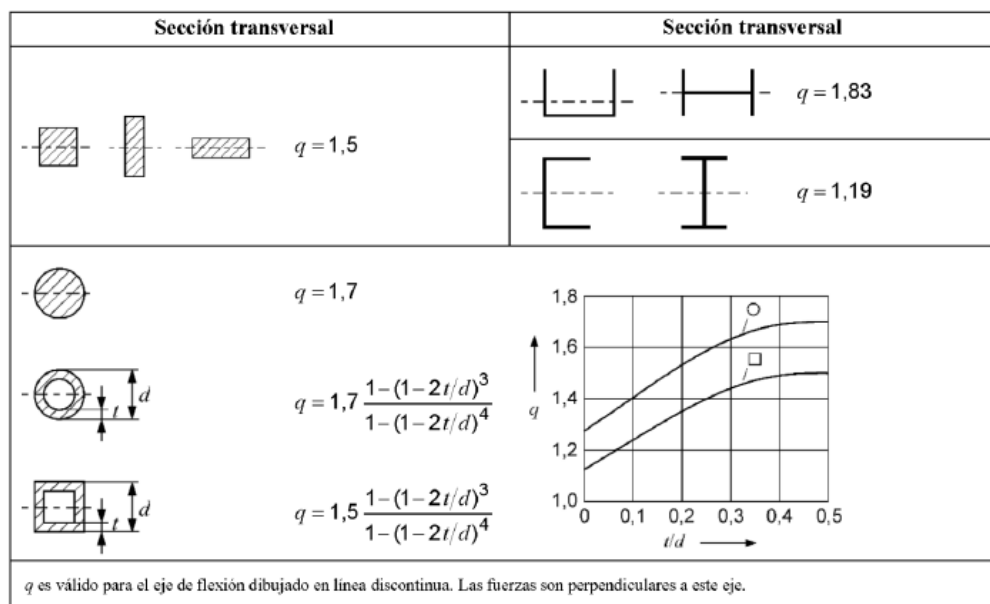


Ilustración 7. Factor q

4.3.1.3.3 CÁLCULO DE LAS FUERZAS EJERCIDAS SOBRE LOS SOPORTES DE LOS CONDUCTORES RÍGIDOS

La fuerza estática equivalente F_r sobre los soportes de los conductores rígidos debe calcularse a partir de:

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3}$$

Donde V_F y V_r son factores que tienen en cuenta los fenómenos dinámicos, y α es un factor dependiente del tipo y número de soportes. Los valores máximos posibles de V_F y V_r y a su vez de β , deberán ser obtenidos de la ilustración N°7 y N° 8 (Tabla 2 y 3 de la Norma antes citada).

4.3.1.3.4 CÁLCULO DE LA FRECUENCIA PROPIA

La frecuencia propia de un conductor puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación, según la Norma UNE-EN 60865:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}}$$

Donde:

- I es el momento de inercia de la sección del conductor;
- m es la masa unitaria del tubo, incluido cable amortiguador
- E es el módulo de Young del material;
- l es la longitud del vano;
- γ es el coeficiente del tubo y los apoyos encontrados en las ilustraciones anteriormente mencionadas.

En nuestro caso, esta frecuencia tendrá el siguiente valor:

$$f_c = \frac{1,57}{4,50^2} \cdot \sqrt{\frac{70 \cdot 10^9 \cdot 53,37 \cdot 10^{-7}}{\frac{57,52}{9,81}}} = 6,19 \text{ Hz}$$

4.3.1.3.5 CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DINÁMICOS

La relación entre la frecuencia de oscilación y la frecuencia nominal del sistema establece los valores de V_F , V_G y V_r , según las siguientes tablas, las cuales se corresponden con las del anexo 4 (A.4) y anexo 5 (A.5) de la Norma citada anteriormente.

f_{cm}/f	Factor V_F	
	Cortocircuito trifásico	Cortocircuito bifásico
<0,04	$0,232 + 3,52 e^{-1,45\kappa} + 0,166 \lg\left(f_{cm}/f\right)^a$	
0,04 ... 0,8	valor máximo de V_{F1} o V_{F2}	
	$V_{F1} = 0,839 + 3,52 e^{-1,45\kappa} + 0,6 \lg\left(f_{cm}/f\right)^a$	
	$V_{F2} = 2,38 + 6,00 \lg\left(f_{cm}/f\right)$	
0,8 ... 1,2	1,8	
1,2 ... 1,6	$1,23 + 7,2 \lg\left(f_{cm}/f\right)$	1,8
1,6 ... 2,4	2,7	1,8
2,4 ... 2,74	$8,59 - 15,5 \lg\left(f_{cm}/f\right)$	1,8
2,74 ... 3,0	$8,59 - 15,5 \lg\left(f_{cm}/f\right)$	
3,0 ... 6,0	$1,50 - 0,646 \lg\left(f_{cm}/f\right)$	
>6,0	1,0	

a Si $\kappa > 1,6$ debe utilizarse $\kappa = 1,6$.

Ilustración 8. Valores del coeficiente V_F

f_{cm}/f	Factor $V_{\sigma m}$
$<0,04$	$0,0929 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,0664 \lg(f_{cm}/f)^a$
$0,04 \dots 0,8$	mínimo valor de $V_{\sigma 1}$ o $V_{\sigma 2}$
	$V_{\sigma 1} = 0,756 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,54 \lg(f_{cm}/f)^a$
	$V_{\sigma 2} = 1,0$
$>0,8$	1
a Si $\kappa > 1,6$ debe utilizarse $\kappa = 1,6$.	

Ilustración 9. Valores del coeficiente V_{σ}

$$V_{rm} = \begin{cases} 1,8 & \text{para } f_{cm}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg(f_{cm}/f) & \text{para } 0,05 < f_{cm}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{para } f_{cm}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

$$V_{rs} = \begin{cases} 1,8 & \text{para } f_{cs}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg(f_{cs}/f) & \text{para } 0,05 < f_{cs}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{para } f_{cs}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

Ilustración 10. Valores del coeficiente V_r

En nuestro caso, la relación entre la frecuencia de oscilación y la frecuencia nominal del sistema es la siguiente:

$$\frac{f_c}{f} = \frac{6,19}{50} = 0,124$$

En estas condiciones, los coeficientes dinámicos tendrán los siguientes valores:

$$V_{\sigma} = 1,000 ; \quad V_r = 1,558 ; \quad V_f = 1,097$$

De esta manera, estamos en disposición de calcular las fuerzas y tensiones que se darán en nuestro conductor según los apartados anteriores, las cuales tendrán los siguientes valores:

$$\sigma_d = V_{\sigma} \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot W} = 1 \cdot 1,558 \cdot 1,00 \cdot \frac{1512,24 \cdot 4,50}{8 \cdot 14,35} = 92,42 \text{ N/mm}^2$$

$$q \cdot f_y = 1,44 \cdot 160 = 230,40 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_d \leq q \cdot f_y \rightarrow 92,42 \text{ N/mm}^2 \leq 230,40 \text{ N/mm}^2$$

En conjunto, la tensión producida en el tubo será la suma de los esfuerzos estáticos y dinámicos en el embarrado, de esta manera:

$$\sigma_{total} = \sqrt{(\sigma_w + \sigma_d)^2 + (\sigma_p + \sigma_h)^2} = \sqrt{(10,39 + 92,42)^2 + (10,15 + 14,02)^2} = 105,61 \text{ N/mm}^2$$

Con un coeficiente de seguridad de:

$$\text{Coeficiente de seguridad } (\sigma_{total}) = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_{total}} = \frac{160}{105,61} = 1,51$$

4.3.1.4 FLECHA EN EL TUBO

La flecha máxima permitida se rige por la siguiente ecuación:

$$f_{max} = \frac{a}{300} \cdot 100 = \frac{4,50}{300} \cdot 100 = 1,5 \text{ cm}$$

Donde:

- a es la longitud del vano en metros

La flecha máxima para un vano se obtiene de la expresión:

$$f = \frac{1}{185} \cdot \frac{(F_p + F_h) \cdot l^4}{E \cdot I} \cdot 100 = \frac{1}{185} \cdot \frac{(57,52 + 14,02) \cdot 4,50^4}{7000 \cdot 53,37} \cdot 10^4 = 0,424 \text{ cm}$$

Donde:

- F_p es la fuerza vertical por unidad de longitud considerada que en este caso es el peso del propio tubo, más el cable amortiguador;
- F_h es la fuerza vertical por unidad de longitud considerada que en este caso es el peso del manguito de hielo;
- l es la longitud del vano en metros;
- E es el Módulo de elasticidad del material en N/mm^2 ;
- I es el momento de inercia de la sección en cm^4 .

4.3.1.5 ELONGACIÓN DEL EMBARRADO

El tubo que forma el embarrado, por efectos térmicos se dilatará, de acuerdo con la expresión:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta = 4,50 \cdot 0,023 \cdot 50 = 5,175 \text{ mm}$$

Donde:

- l_0 es la longitud inicial del tubo (m);
- α es el coeficiente de dilatación lineal del tubo y que en este caso vale $0,023 \text{ mm/m}^\circ\text{C}$;
- $\Delta \theta$ es el incremento de temperatura entre la de montaje (35°) y la de servicio (85°C).

Dada la elongación del vano se instalarán piezas especiales que permitan absorber esta dilatación.

4.3.1.6 ESFUERZO TÉRMICO EN CORTOCIRCUITO

La intensidad térmica en cortocircuito viene dada según la Norma UNE-EN 60909-0 por la siguiente expresión:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{(m + n)}$$

Donde m y n son coeficientes térmicos de disipación, cuyos valores se pueden extraer de las siguientes figuras, que corresponden con las Figuras 19 y 20 de la Norma citada anteriormente:

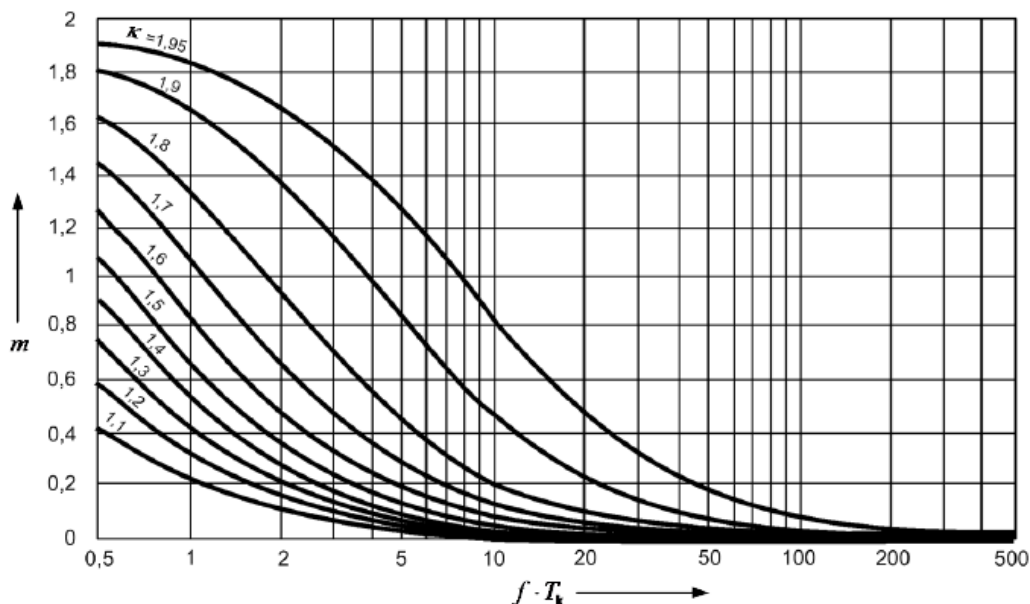


Ilustración 11. Factor m de disipación térmica

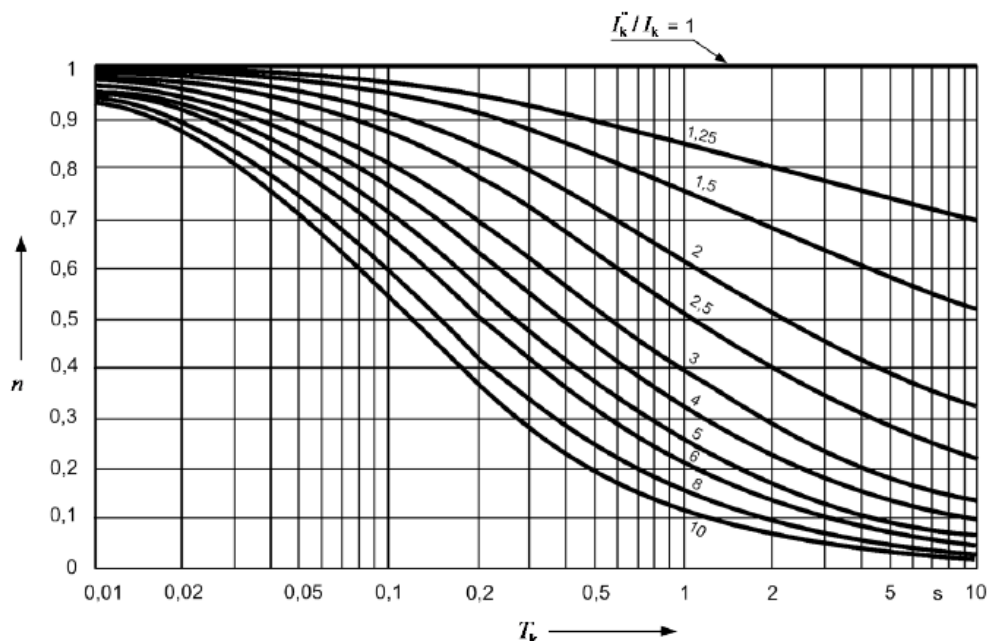


Ilustración 12. Factor n de disipación térmica

Para mayor exactitud, se da la fórmula que rige el valor del coeficiente m , incluido en el Anexo A de la normativa de referencia:

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4fT_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1]$$

No se facilita la fórmula del coeficiente n debido a la complejidad y magnitud de la misma, por tanto, se recomienda extraer los valores de la propia gráfica.

De esta manera, obtenemos los siguientes valores de los coeficientes, y seguidamente de la propia intensidad:

$$m = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \ln(1,558 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \ln(1,558 - 1)} - 1] = 0,034$$

$$n = 1,000$$

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{(m + n)} = 40 \cdot \sqrt{0,034 + 1,000} = 40,67 \text{ kA}$$

Este valor debe ser menor que la capacidad térmica del conductor, cuyo valor se puede calcular con la densidad de corriente en cortocircuito S_{thr} y la sección de este. Dicha densidad se puede extraer de la siguiente figura, que se corresponde con la figura 13b de la normativa de referencia:

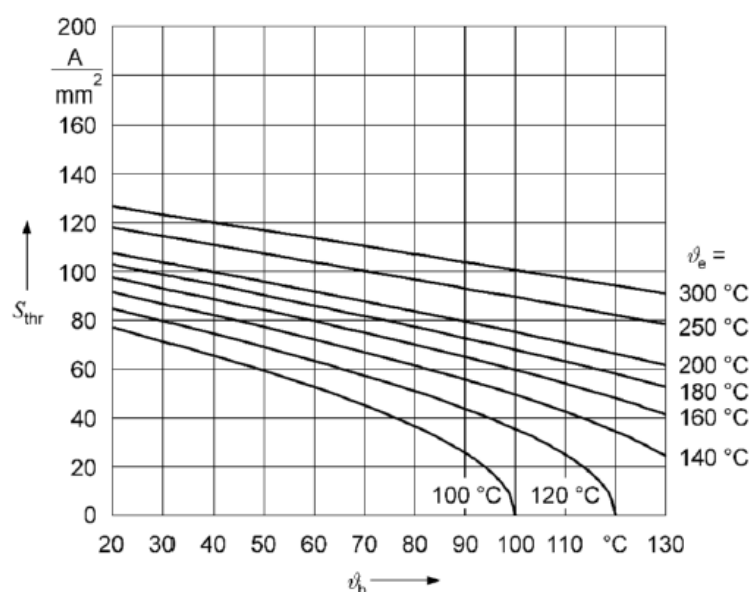


Ilustración 13. Valores de densidad de corriente en cortocircuito para aluminio, aleación de aluminio y ACSR

De esta manera la densidad admisible de corriente en cortocircuito del conductor será la siguiente:

$$S_{thr} = 82 \text{ A/mm}^2$$

Para el conductor actual, la capacidad térmica tendrá un valor de:

$$I_{adcc} = S \cdot S_{thr} = 1382 \cdot 82 = 113,32 \text{ kA}$$

Como podemos observar la corriente admisible en cortocircuito del cortocircuito en el conductor es muy superior a la corriente térmica de cortocircuito de la instalación.

$$I_{th} < I_{adcc} \rightarrow 35,22 \text{ kA} < 113,32 \text{ kA}$$

4.3.1.7 INTENSIDAD NOMINAL DE LAS BARRAS

La intensidad nominal teórica del tubo elegido, según fabricante es de 1546 A con 30 °C de temperatura ambiente y 65 °C de temperatura de trabajo del tubo.

Según DIN 43670, esta intensidad debe ser corregida con distintos factores en función de la composición del tubo, la altitud y la temperatura máxima de trabajo (Según ITC-RAT 05).

Así, deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- $k_1 = 0,925$ por la aleación elegida;
- $k_2 = 1,05$ para temperatura final de 85°C;
- $k_3 = 1$ por ser tubo;
- $k_4 = 0,98$ para instalación a menos de 1000 m.s.n.m.

Según la citada norma:

$$I_{maxcc} = I_n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 = 1546 \cdot 0,925 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 0,98 = 1751 \text{ A}$$

4.3.2 POSICIÓN DE BARRAS 220 KV

4.3.2.1 DATOS DE DISEÑO

Los datos de diseño para el cálculo mecánico de embarrados son los siguientes:

Intensidad de cortocircuito de diseño	40 kA
Relación R/X del sistema.....	0,2
Duración del cortocircuito	1 s
Material	Aluminio
Aleación.....	6063-T6
Conductividad térmica	201 W/m·K
Coeficiente de dilatación lineal	23,5 10 ⁻⁶ /K
Resistividad eléctrica a 20 °C	0,0325 μΩ·m
Coeficiente de temperatura de resistencia eléctrica a 20 °C	0,0035 K ⁻¹
Intensidad nominal a 80 °C	3890 A
Resistencia a la tracción mínima	215 N/mm ²

Límite de fluencia mínimo.....	160 N/mm ²
Módulo de elasticidad	69500 N/mm ²
Diámetro exterior/interior del conductor.....	150/134 mm
Espesor de la pared	8 mm
Sección nominal.....	3569 mm ²
Peso propio	9,636 kg/m
Momento de inercia.....	902,38 cm ⁴
Momento resistente	120,32 cm ³
Longitud del vano	13,50 m
Distancia entre fases	3,50 m
Anclajes	Fijo – Elástico
Zona.....	B
Velocidad del viento	140 km/h
Presión del viento	93,5 DaN/m ²
Los aisladores que se utilizarán por soportar el embarrado serán del siguiente tipo:	
Denominación.....	C10-1050
Carga de rotura a flexión	10000 N
Carga de rotura a torsión.....	4000 N
Altura del aislador	2300 mm
Altura de la pieza soporte.....	170 mm
Diámetro medio	310 mm

Una vez desarrollado el cálculo mecánico, tanto estático como dinámico, del embarrado rígido de las posiciones de línea y transformación, se muestran solamente los resultados del cálculo para la posición de barras del mismo nivel de tensión.

4.3.2.2 CÁLCULO ESTÁTICO DEL EMBARRADO

4.3.2.2.1 ESFUERZO POR CARGAS PERMANENTES Y VARIABLES

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Esfuerzo por peso propio	94,53 N/m
Esfuerzo por cable amortiguador	20,93 N/m
Combinación de esfuerzos por peso	115,46 N/m
Sobrecarga debido al viento	140,25 N/m
Sobrecarga debido al hielo	21,63 N/m
Combinación de esfuerzos por peso, viento y hielo	196,12 N/m
Momento debido al esfuerzo por peso, viento y hielo	4467,80 N·m
Tensión debida al esfuerzo por peso, viento y hielo	37,13 N/mm ²
Coefficiente de Seguridad	4,57

4.3.2.2.2 VALOR DE CRESTA DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Coefficiente κ	1,558
Valor de cresta de intensidad de cortocircuito	88,12 kA

4.3.2.2.3 ESFUERZO ESTÁTICO POR CORTOCIRCUITO

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Fuerza máxima sobre un conductor en cortocircuito trifásico	5188,23 N
Tensión máxima sobre el conductor	72,77 N/mm ²
Coefficiente de seguridad	2,33

4.3.2.2.4 COMBINACIÓN DE ACCIONES: CORTOCIRCUITO, CARGAS PERMANENTES Y VARIABLES

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Reacción horizontal en el cortocircuito	489,50 N
Reacción vertical en el cortocircuito	172,01 N
Resultante de las reacciones	518,87 N
Momento flector de la resultante	11820,49 N·m

Tensión máxima	98,24 N/mm ²
Coefficiente de seguridad	1,62

4.3.2.3 CÁLCULO DINÁMICO DEL EMBARRADO PRINCIPAL

4.3.2.3.1 CÁLCULO DE TENSIONES MECÁNICAS

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Coefficiente α	0,5
Coefficiente β	1
Coefficiente γ	1,57

4.3.2.3.2 TENSIÓN MECÁNICA ADMISIBLE EN UN CONDUCTOR

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Parámetro q	1,344

4.3.2.3.3 CÁLCULO DE LA FRECUENCIA PROPIA

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Frecuencia propia	1,99 Hz

4.3.2.3.4 CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DINÁMICOS

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Relación frecuencia nominal/frecuencia propia	0,040
V_{σ}	0,809
V_r	1,80
V_f	0,802
Tensión dinámica con efecto reenganche	105,97 N/mm ²
Tensión Total	139,48 N/mm ²
Coefficiente de seguridad	1,21

4.3.2.4 REACCIONES SOBRE AISLADORES SOPORTE

La fuerza producida en cada uno de los aisladores soporte de los conductores rígidos será:

$$F_{rd-A} = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3} = 0,802 \cdot 1,80 \cdot 0,5 \cdot 384,31 = 277,39 \text{ N/m}$$

El máximo esfuerzo en los vanos considerados se producirá en los aisladores intermedios. Para realizar los cálculos de este apartado, se aplica también superposición de esfuerzos y además se pondera cada esfuerzo producido con un coeficiente de 0,5 según Norma UNE-EN 60865.

Aplicando dicha superposición la fuerza resultante puede calcularse de la siguiente manera:

$$F_t = \sqrt{F_p^2 + (F_w + F_h + F_{rd-A})^2} \cdot l \cdot \alpha = \sqrt{115,46^2 + (140,25 + 21,63 + 277,39)^2} \cdot 13,5 \cdot 0,5 = 3065,79 \text{ N}$$

Siendo l la longitud de los vanos adyacentes idénticos y α el coeficiente de reparto para el soporte crítico en ambos vanos, y que en este caso es igual a 0,5.

Este esfuerzo se produce sobre el eje del tubo, que está situado una longitud por encima del aislador igual a la altura sobre el que va fijado. Dicho punto es en el que el fabricante garantiza los esfuerzos que son capaces de soportar dichos aisladores. En este caso sobre el eje del tubo se producirá:

$$F_{tcab} = \frac{F_t \cdot (L_{ais} + h_{pz})}{L_{ais}} = \frac{3065,79 \cdot (2300 + 170)}{2300} = 3292,39 \text{ N}$$

Considerando además la fuerza que ejerce el viento sobre la superficie total del aislador y haciendo un reparto de cargas para aplicar dicha fuerza en la cabeza del aislador se obtiene:

$$F_{vais} = L_{ais} \cdot D_{ais} \cdot P_v \cdot \alpha = 2,3 \cdot 0,315 \cdot 935 \cdot 0,5 = 338,70 \text{ N}$$

El esfuerzo total sobre la cabeza del aislador será de:

$$F_{total} = F_{tcab} + F_{vais} = 3292,39 + 338,7 = 3631,09 \text{ N}$$

Para el aislador elegido C10-1050 la carga a rotura de flexión es de 16000 N, valor superior al calculado, con el coeficiente de seguridad siguiente:

$$\text{Coeficiente de seguridad } (F_{total}) = \frac{\text{Carga de rotura a flexión}}{F_{total}} = \frac{10000}{3631,09} = 2,75$$

Con lo que se cumple con la seguridad requerida para su utilización, ya que el coeficiente de seguridad es mayor que 1,5, coeficiente mínimo exigido para los apoyos metálicos.

4.3.2.5 FLECHA EN EL TUBO

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Flecha máxima permitida	4,50 cm
Flecha máxima para un vano	3,92 cm

4.3.2.6 ELONGACIÓN DEL EMBARRADO

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Elongación del embarrado	15,6 mm

4.3.2.7 ESFUERZO TÉRMICO EN CORTOCIRCUITO

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Coefficiente m	0,017
Coefficiente n	1,000
S_{thr}	82 A/mm ²
Intensidad de cortocircuito	40,34 kA
Conclusión	Tubo Válido

4.3.2.8 INTENSIDAD NOMINAL DE LAS BARRAS

DESCRIPCIÓN	RESULTADO
Coefficiente por aleación	0,925
Coefficiente para temperatura final de 85°C	1,250
Coefficiente de forma	1,000
Coefficiente de altura	0,980
Intensidad nominal	3372 A

4.4 CÁLCULOS DE EFECTO CORONA

El efecto corona se produce por la rigidez dieléctrica del aire y del campo eléctrico creado en la superficie del conductor, provocando pérdidas de energía cuando este campo eléctrico supera la citada rigidez dieléctrica del aire.

Dicha rigidez depende de varios parámetros, los cuales son la temperatura, la presión barométrica y la humedad relativa. A su vez, el campo eléctrico en la superficie del conductor depende de la disposición de los conductores que componen el circuito, de la tensión del sistema y de la rugosidad del cable, entre otra serie de factores más complejos.

Se pasa ahora a calcular la existencia o no de efecto corona, y en el caso de haberla, se calcularán las pérdidas producidas.

4.4.1.1 CÁLCULO DE LA TENSION DISRUPTIVA

Para el cálculo de la tensión crítica disruptiva (U_c) a partir de la cual el efecto corona puede manifestarse, y aplicada a conductores cilíndricos, puede aplicarse la fórmula de Peek:

$$U_{c0} = m_c \cdot \delta \cdot E_{0f} \cdot r \cdot \ln \left(\frac{D}{r} \right)$$

Donde:

- m_c es un coeficiente de irregularidad del conductor que toma el valor de 1 para conductor cilíndrico y liso;
- r es el radio exterior del conductor en cm;
- D es la distancia media geométrica entre conductores en cm.

Dado que se encuentran situados en un mismo plano y partiendo de que están equidistantes entre si una distancia d , medida en cm:

$$D = \sqrt[3]{d \cdot d \cdot 2 \cdot d} = \sqrt[3]{2} \cdot d = \sqrt[3]{2} \cdot 350 = 441 \text{ cm}$$

- δ es la densidad del aire

La densidad del aire viene de la siguiente expresión:

$$\delta = 3,921 \cdot \frac{h}{273 + \varnothing}$$

Donde:

- h es la presión atmosférica en cm de mercurio, y la cual extraemos de la siguiente expresión, y siendo y la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra la subestación:

$$h = \frac{76}{10^{\frac{y}{18336}}} = \frac{76}{10^{\frac{653}{18336}}} = 70,02 \text{ cmHg}$$

- \varnothing es la temperatura del aire en °C.

Sustituyendo en la expresión la densidad del aire será igual a:

$$\delta = 3,921 \cdot \frac{h}{273 + \varnothing} = 3,921 \cdot \frac{70,02}{273 + 22,4} = 0,933 \text{ g/cm}^3$$

- E_{0f} es el valor eficaz de campo eléctrico crítico para la aparición del efecto corona. Para conductores paralelos el valor máximo de campo viene dado por:

$$E_0 = 30 \cdot m_c \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) = 30 \cdot 1 \cdot 0,946 \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{7,5 \cdot 0,933}} \right) = 31,61 \text{ kV/cm}$$

Por lo tanto, esta tensión critica disruptiva inicial será igual a:

$$U_{c0} = m_c \cdot \delta \cdot E_{0f} \cdot r \cdot \ln \left(\frac{D}{r} \right) = 1 \cdot 0,946 \cdot 31,61 \cdot 7,5 \cdot \ln \left(\frac{441}{7,5} \right) = 913,72 \text{ kV}$$

Esta tensión disruptiva está calculada para buen tiempo. Para el caso de tiempos de niebla, nieve o tempestad debe considerarse disminuida en un 20%, es decir, en este caso:

$$U_c = U_{c0} \cdot 0,80 = 913,72 \cdot 0,80 = 730,98 \text{ kV}$$

Por el hecho de estar en el mismo plano los conductores, la tensión disruptiva referida al conductor central debe ser disminuida en un 4% y aumentada en un 6% para los conductores laterales respectivamente.

Por lo tanto, el valor más desfavorable se produce en el conductor central, y su tensión crítica tiene un valor de:

$$U_{ccentral} = U_c \cdot 0,96 = 730,98 \cdot 0,96 = 701,74 \text{ kV}$$

Por otro lado, el valor más desfavorable se produce en los conductores de los extremos, y su tensión crítica tiene un valor de:

$$U_{cextremos} = U_c \cdot 1,06 = 730,98 \cdot 1,06 = 774,84 \text{ kV}$$

La tensión eficaz fase-tierra más desfavorable entre $U_{ccentral}$ y $U_{cextremos}$ será:

$$U_{cof-t} = \frac{U_{cextremos}}{\sqrt{3}} = 447,37 \text{ kV}$$

Realizando esta operación se obtiene que comparando con el valor más desfavorable:

$$U_m < U_{ccentral}$$

$$141,5 \text{ kV} < 447,37 \text{ kV}$$

Como se ve los valores obtenidos están muy alejados de la tensión eficaz entre fase y tierra de los conductores para este nivel de tensión (141,5 kV para 245 kV) por lo que no es de esperar que el efecto corona se produzca.

5 CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO EN SET GUADARRAMA 220 kV Y 30 kV

5.1 DATOS DE CORTOCIRCUITO EN EL PUNTO DE CONEXIÓN

El punto de conexión es en la SE Buenavista a 220kV.

Intensidad de cortocircuito trifásica en el nudo	19,9 kA
Potencia de cortocircuito trifásica en el nudo	7580 MVA
Intensidad de cortocircuito monofásica en el nudo	17,6 kA
Potencia de cortocircuito monofásica en el nudo	6724 MVA
Relación X/R	9,0

Tabla 5: Datos de cortocircuito en la subestación Buenavista

Los datos son obtenidos del Informe Anual de la Corriente de Cortocircuito en la red de transporte del Sistema Eléctrico Peninsular en el año 2019 de REE.

5.2 CONFIGURACIÓN DE RED

La configuración desde la subestación objeto del proyecto hasta el punto de conexión es la siguiente:

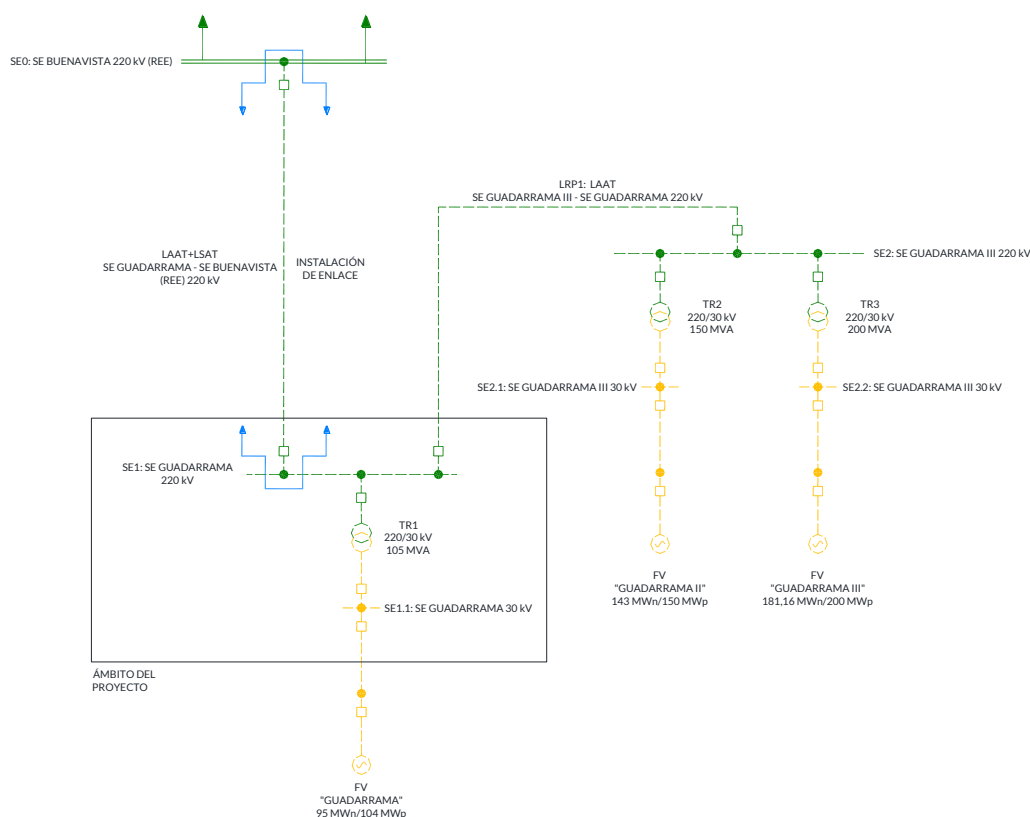


Ilustración 14. Configuración de red

5.3 DATOS PRELIMINARES

5.3.1 LAT SE GUADARRAMA - SE BUENAVISTA 220KV

5.3.1.1 TRAMO AEREO

- Denominación: LA-380 GULL 337-AL1/44-ST1A
- Material Aluminio- Acero
- Sección: 381 mm²
- Número de conductores: DUPLEX
- Longitud: 5,62 km
- Capacidad: 518,76 MVA
- Temperatura: 85 °C
- Resistencia: 1,909 Ω
- Reactancia: 8,6594 Ω
- Susceptancia: 61,000 S/km

5.3.1.2 TRAMO SUBTERRÁNEO

- Sección: 3x[1x2500]mm² Cu
- Longitud: de 6,42 km

5.3.2 LAAT SE GUADARRAMA III - SE GUADARRAMA

- Denominación: LA-380 GULL 337-AL1/44-ST1A
- Material Aluminio- Acero
- Sección: 381 mm²
- Número de conductores: DUPLEX
- Longitud: 25 km
- Capacidad: 259,38 MVA
- Temperatura: 85 °C
- Resistencia: 1,909 Ω
- Reactancia: 8,6594 Ω
- Susceptancia: 61,000 S/km

5.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Para el estudio se ha realizado se ha utilizado el método de cálculo que se indica en la norma IEC 60909. Para el estudio según esta norma se deben considerar los siguientes supuestos:

- Durante el tiempo de duración del cortocircuito no existe cambio en el tipo de cortocircuito, esto es, un cortocircuito trifásico permanece trifásico y un cortocircuito monofásico permanece monofásico durante todo el tiempo del cortocircuito.
- Durante el tiempo de duración del cortocircuito, no existen cambios topológicos en la red.
- La impedancia de los transformadores es referida a la posición nominal del cambiador de tomas. No obstante, el cálculo de corrientes de cortocircuito debe considerar un factor

de corrección que represente a la posición del cambiador de tomas que dé origen a la menor impedancia de cortocircuito.

- Las magnitudes de la resistencia del arco del cortocircuito y de la impedancia de falla se consideran despreciables.
- No se consideran: las capacitancias de las líneas, las admitancias shunt y las cargas estáticas (no-rotatorias), excepto las correspondientes a la red de secuencia cero del sistema.

Se evaluarán las corrientes de cortocircuito para los siguientes tipos de falta:

- Trifásica
- Bifásico a tierra
- Monofásica a tierra

La norma IEC 60909 define y presenta un procedimiento que utiliza las componentes simétricas.

Desarrolla el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas. Las primeras, las máximas, permiten determinar las características que hay que asignar a los materiales eléctricos. Las segundas, las mínimas, son necesarias para ajustar el calibre de las protecciones de sobreintensidad.

El procedimiento para el cálculo es el siguiente:

1. Cálculo de la tensión equivalente en el punto de defecto, igual a: $U_{eq} = c \cdot U_n / 3$

Se introduce un factor "c" de la tensión para tener en cuenta:

- Las variaciones de tensión en el espacio y en el tiempo
- Los cambios eventuales en las conexiones de los transformadores
- El comportamiento subtransitorio de los alternadores y de los motores.

Según los cálculos a efectuar y los márgenes de tensión considerados, los valores normativos de este factor de tensión están indicados en la siguiente tabla:

Tensión nominal U_n	Factor de tensión c para el cálculo de	
	I_{cc} máx.	I_{cc} mín.
BT		
230 - 400 V	1	0,95
Otros	1,05	1
AT		
1 a 230 kV	1,1	1

Valores del factor de tensión c (IEC 60909).

2. Determinación y suma de las impedancias equivalentes, directa, inversa y homopolar, aguas arriba del punto de defecto.

3. Cálculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas. En la práctica, según el tipo de defecto, las fórmulas a emplear para el cálculo de I_{cc} están indicadas en la tabla siguiente:

Tipo de de cortocircuito	$I_{k''}$ Caso general	Defecto alejado de los generadores
Trifásico (Z_t cualquiera)	$= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_d }$	$= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_d }$
En los dos casos, la corriente de cortocircuito sólo depende de Z_d . Generalmente Z_d se reemplaza por Z_k : impedancia de cortocircuito en el punto del defecto con $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$, donde R_k es la suma de las resistencias de una fase conectadas en serie, X_k es la suma de las reactancias de una fase conectadas en serie		
Bifásico aislado ($Z_t = \infty$)	$= \frac{c \cdot U_n}{ Z_d + Z_i }$	$= \frac{c \cdot U_n}{2 Z_d }$
Monofásico	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o }$	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ 2 Z_d + Z_o }$
Bifásico a tierra (Z_{cc} entre fases = 0)	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3} Z_i }{ Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_o + Z_d \cdot Z_o }$	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ Z_d + 2 Z_o }$

Siendo:

U_n = tensión eficaz compuesta de la red trifásica

$I_{k''}$ = corriente de cortocircuito en valor modular

Z_d, Z_i, Z_o = Impedancias simétricas

Z_{cc} = Impedancia de cortocircuito

Z_t = Impedancia de tierra

4. A partir del valor de I_{cc} ($I_{k''}$), se calculan otras magnitudes como I_{cc} de cresta, I_{cc} permanente o, incluso, I_{cc} permanente máxima.

5.5 IMPEDANCIA EQUIVALENTE DE LA RED EXISTENTE

La impedancia equivalente en el punto de conexión de SE Buenavista 220 kV, se obtiene con la siguiente expresión:

$$Z_{cc_{red}} = \frac{U_n^2}{S_{cc_{red}}}$$

Donde:

U_n : Tensión nominal de la red en kV

S_{cc} : Potencia de cortocircuito trifásica en MVA

Por la constitución de la red existente, la reactancia de la red supone la mayor parte de la impedancia de la red, considerándose:

$$X_{red} = 0,98 * Z_{red}$$

La resistencia de la red se puede determinar a partir de la relación X/R de la red según la siguiente relación:

$$\frac{X_{red}}{R_{red}} = 9,0$$

Resultando:

$Z_{Cred} = 6,385 \, \Omega$, $X_{red} = 6,257 \, \Omega$ y $R_{red} = 0,695 \, \Omega$.

5.6 RESULTADOS IMPEDANCIAS

Barra		Secuencia positiva [Ω]			Secuencia negativa [Ω]			Secuencia cero [Ω]		
ID	kV	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
Barra Guadarrama	220	1,85152	9,22023	9,40429	1,85152	9,22023	9,40429	1,98445	9,54639	9,75047
	30	0,21289	1,14702	1,16661	0,21289	1,14702	1,16661	112,82160	10,16646	113,27870
Celdas MT Guadarrama	30	0,21346	1,14766	1,16734	0,21346	1,14766	1,16734	112,82280	10,16846	113,28010
Barra Guadarrama III	220	5,10031	19,22438	19,88944	5,10031	19,22438	19,88944	1,28759	11,66874	11,73957
Barra 1 Guadarrama III	30	0,27532	1,23009	1,26053	0,27532	1,23009	1,26053	112,82160	10,16646	113,27870
Barra 2 Guadarrama III	30	0,30111	1,21803	1,25470	0,30111	1,21803	1,25470	112,82160	10,16646	113,27870
Barra 3 Guadarrama III	30	0,24175	1,00453	1,03321	0,24175	1,00453	1,03321	112,82160	10,16646	113,27870
Barra 4 Guadarrama III	30	0,26346	0,99436	1,02867	0,26346	0,99436	1,02867	112,82160	10,16646	113,27870
Celdas MT 1 Guad. II	30	0,27600	1,23101	1,26157	0,27600	1,23101	1,26157	112,82320	10,16912	113,28050
Celdas MT 2 Guad. II	30	0,30167	1,21867	1,25545	0,30167	1,21867	1,25545	112,82280	10,16846	113,28010
Celdas MT 1 Guad. III	30	0,24226	1,00522	1,03400	0,24226	1,00522	1,03400	112,82280	10,16846	113,28010
Celdas MT 2 Guad. III	30	0,26402	0,99499	1,02942	0,26402	0,99499	1,02942	112,82280	10,16846	113,28010
Buenavista	220	0,21346	1,14766	1,16734	0,21346	1,14766	1,16734	112,82280	10,16846	113,28010

Tabla 6. Cuadro de resultados de impedancias positivas, negativas y cero

5.7 RESULTADOS CORTOCIRCUITOS

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra				Falta Línea-a-Línea				*Línea-a-Línea-a-Tierra			
ID	kV	I" k	I _p	I _k	I" k	I _p	I _b	I _k	I" k	I _p	I _b	I _k	I" k	I _p	I _b	I _k
Barra Guadarrama	220	14,857	35,250	14,857	14,677	34,823	14,677	14,677	12,866	30,528	12,866	12,866	14,798	35,110	14,798	14,798
	30	16,332	42,399	16,332	0,502	1,302	0,502	0,502	14,144	36,718	14,144	14,144	14,265	37,033	14,265	14,265
Celdas MT Guadarrama	30	16,321	42,354	16,321	0,502	1,302	0,502	0,502	14,135	36,680	14,135	14,135	14,256	36,994	14,256	14,256
Barra Guadarrama III	220	7,025	16,557	7,025	8,152	19,214	8,152	8,152	6,084	14,339	6,084	6,084	8,078	19,040	8,078	8,078
Barra 1 Guadarrama III	30	15,115	38,378	15,115	0,501	1,272	0,501	0,501	13,090	33,237	13,090	13,090	13,210	33,541	13,210	13,210
Barra 2 Guadarrama III	30	15,185	38,368	15,185	0,501	1,266	0,501	0,501	13,151	33,228	13,151	13,151	13,269	33,528	13,269	13,269
Barra 3 Guadarrama III	30	18,440	46,368	18,440	0,502	1,261	0,502	0,502	15,970	40,156	15,970	15,970	16,089	40,456	16,089	16,089
Barra 4 Guadarrama III	30	18,522	46,341	18,522	0,501	1,254	0,501	0,501	16,040	40,132	16,040	16,040	16,158	40,428	16,158	16,158
Celdas MT 1 Guad. II	30	15,102	38,329	15,102	0,501	1,272	0,501	0,501	13,079	33,194	13,079	13,079	13,199	33,498	13,199	13,199
Celdas MT 2 Guad. II	30	15,176	38,332	15,176	0,501	1,265	0,501	0,501	13,143	33,196	13,143	13,143	13,262	33,496	13,262	13,262
Celdas MT 1 Guad. III	30	18,426	46,314	18,426	0,502	1,261	0,502	0,502	15,958	40,109	15,958	15,958	16,077	40,409	16,077	16,077
Celdas MT 2 Guad. III	30	18,508	46,287	18,508	0,501	1,254	0,501	0,501	16,028	40,086	16,028	16,028	16,147	40,382	16,147	16,147
Buenavista	220	20,468	49,181	20,468	19,914	47,849	19,914	19,914	17,726	42,592	17,726	17,726	20,401	49,020	20,401	20,401

Tabla 7. Cuadro de resultados de corrientes de cortocircuito

Todas las corrientes de falta en kA_{rms}. Corriente I_p calculada usando Método C.

* Corriente de falta LLG es la mayor de las corrientes de las dos líneas falladas.

6 CÁLCULO DE LA RED DE TIERRAS

6.1 RED DE TIERRAS INFERIORES

La red de tierras inferiores se diseñará según se indica en la Instrucción Técnica Complementaria ITC-RAT 13 del R.D. 337/2014.

Según la citada instrucción: *"Toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada en forma tal que, en cualquier punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, estas queden sometidas como máximo a las tensiones de paso y contacto (durante cualquier defecto en la instalación eléctrica o en la red unida a ella) que resulten de aplicación de las fórmulas que se recogen a continuación.*

Cuando se produce una falta a tierra, partes de la instalación se pueden poner en tensión, y en el caso de que una persona estuviese tocándolas, podría circular a través de él una corriente peligrosa. La norma UNE-IEC/TS 60479-1 da indicaciones sobre los efectos de la corriente que pasa a través del cuerpo humano en función de su magnitud y duración, estableciendo una relación entre los valores admisibles de la corriente que puede circular a través del cuerpo humano y su duración".

6.1.1 DATOS DE PARTIDA

Las principales características del terreno son las siguientes:

- Resistividad media de la capa superficial (grava): 3000 $\Omega \cdot m$
- Espesor de la grava superficial: 0,10 m
- Resistividad media del terreno: 100 $\Omega \cdot m^*$
- Profundidad de enterramiento del electrodo: 0,6 m

*Se estima teniendo en cuenta, que se espera que haya que aportar terreno para aumentar la capacidad portante del mismo.

Las principales características del electrodo son las siguientes:

- Tipo de conductor: Cobre desnudo clase 2, según UNE 60228
- Sección: 120 mm²
- Temperatura de fusión: 1084 °C
- Temperatura máxima admisible: 300 °C
- Descripción de las picas de tierra: acero recubiertas de cobre de Ø14,2x2000 mm

Los principales datos geométricos del electrodo son los siguientes:

- Forma: Rectangular
- Longitud del lado mayor de la malla (Lx): 97 m
- Longitud del lado menor de la malla (Ly): 49 m
- Separación media entre conductores (retícula): 4,75 m

Las principales características del sistema eléctrico son las siguientes:

- Tensión nominal: 220 kV
- Frecuencia nominal: 50 Hz
- Relación X/R: 5
- Tiempo de actuación de las protecciones: 0,5 s
- Intensidad máxima de defecto a tierra (3lo): 14800 A

6.1.2 CÁLCULOS

6.1.2.1 CÁLCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO MÁXIMAS ADMISIBLES EN LA INSTALACIÓN

Para un tiempo de actuación de las protecciones de 0,5 segundos, los valores admisibles de tensiones de paso y contacto aplicadas (U_{pa} , U_{ca}) son:

- $U_{ca} = 204 \text{ V}$
- $U_{pa} = 2.040 \text{ V}$

El coeficiente reductor es el siguiente:

$$C_s = 1 - 0,106 \cdot \left(\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + 0,106} \right) = 0,665$$

Tensión de Contacto Admisible:

$$U_{c,adm} = U_{ca} \cdot \left(1 + \frac{R_{a1}/2 + 1,5 \cdot \rho_s}{1000} \right) = 1019 \text{ V}$$

Tensión de Paso Admisible:

$$U_{p,adm} = 10U_{ca} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{a1} + 6 \cdot \rho_s}{1000} \right) = 34624 \text{ V}$$

Donde:

- C_s : Coeficiente reductor de la resistividad de la capa superficial
- h_s : Espesor de la capa superficial, en metros.
- R_{a1} : Resistencia equivalente del calzado.
- ρ : Resistividad del terreno natural
- ρ_s : Resistividad de la capa superficial