3 MEMORIA DE CÁLCULOS

3.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL INSTALADA

La determinación de la potencia total instalada viene dada por la suma de las potencias de cada uno de los receptores existentes en la instalación. Estos pueden verse en la siguiente Tabla 10:

PREVISION DE LA DEMANDA

INSTALACION	Unidades	Pot./Ud.(kW)	Pot.Total(kW)	Simultaneidad	Pot.Real(kW)	Factor de Pot.	S Real(kVA)
PRETRATAMIENTO:							
Motor peine grueso:	1	3,0	3,0	0,25	0,8	0,70	1,1
Motor peine pequeño:	1	3,0	3,0	0,25	0,8	0,70	1,1
Cintas transportadoras:	3	2,0	6,0	0,25	1,5	0,70	2,1
Motosoplantes:	2	4,0	8,0	0,90	7,2	0,80	9,0
Bombas de extracción de arenas:	2	1,0	2,0	0,50	1,0	0,70	1,4
Bombas de recirculación:	2	1,0	2,0	0,25	0,5	0,60	0,8
Prensa:	1	10,0	10,0	0,25	2,5	0,70	3,6
Medidor de caudal de salida:	1						
DEPÓSITO DE HOMOGENEIZACIÓN:							
Impulsores helicoidales:	4	4,0	16,0	0,90	14,4	0,80	18,0
Aireadores:	4	4,3	17,2	0,90	15,5	0,75	20,6
Válvulas de regulación del caudal:	2	0,5	1,0	0,25	0,3	0,60	0,4
Medidor de nivel del agua (presiómetro):	1						
DECANTACIÓN PRIMARIA Y TAMIZADO DE FANGO PRIMARIO:							
Rasquetas de fondo:	2	5,0	10,0	1,00	10,0	0,80	12,5
Bombas de fangos a tamiz:	2	2,5	5,0	0,90	4,5	0,70	6,4
Bombas de fangos a mezclador:	2	1,4	2,8	0,90	2,5	0,70	3,6
Cinta para productos de rechazo:	1	5,0	5,0	0,25	1,3	0,60	2,1
REACTOR DE DESNITRIFICACIÓN:							
Impulsores helicoidales:	4	6,4	25,6	1,00	25,6	0,70	36,6
REACTORES SECUNDARIOS:							
Turbinas:	8	35,0	280,0	1,00	280,0	0,80	350,0
Bombas de agua a desnitrificación:	2	3,6	7,2	1,00	7,2	0,70	10,3
DECANTADORES SECUNDARIOS:							
Rascadores de fondo y barrido de flotantes:	3	2,0	6,0	1,00	6,0	0,80	7,5
Bombas de impulsión de fangos a mezclador:	1	1,5	1,5	0,90	1,4	0,70	1,9
Bombas de impulsión de fangos a digestores:	2	11,0	22,0	0,85	18,7	0,80	23,4
Cintas tranportadoras de flotantes:	1	1,5	1,5	0,25	0,4	0,60	0,6
CLORACIÓN:							
Bomba:	1	4,7	4,7	0,90	4,2	0,70	6,0
MEZCLADO DE FANGOS:							
Mezclador de fangos:	1	4,5	4,5	0,90	4,1	0,80	5,1
Bomba de fangos a espesador:	1	1,1	1,1	0,90	1,0	0,70	1,4
ESPESADO DE FANGOS:							
Bomba de fangos a digestores:	2	3,1	6,2	0,50	3,1	0,65	4,8
DIGESTORES ANAEROBIOS:							
Bombas de recirculación:	2	10,1	20,2	0,85	17,2	0,80	21,5
ACONDICIONAMIENTO Y SECADO DE FANGOS:							
Bombas de extracción de fangos:	2	1,0	2,0	0,50	1,0	0,65	1,5
Motores deshidratadores de fangos:	2	4,5	9,0	0,50	4,5	0,80	5,6
Cintas transportadoras de fangos:	2	3,5	7,0	0,25	1,8	0,60	2,9
Bomba de polielectrolito:	1	1,3	1,3	0,50	0,7	0,70	0,9
VARIOS:							
Bomba de agua reutilizada:	1	8,0	8,0	0,25	2,0	0,75	2,7
Compresor de aire comprimido:	1	6,5	6,5	0,25	1,6	0,80	2,0
Edificio de explotación:	1	16,0	16,0	0,45	7,2	0,60	12,0
Iluminación:	1	18,1	18,1	0,80	14,5	0,60	24,1
TOTAL:	**70**	**8,1**	**539,4**	**0,86**	**464,6**	**0,77**	**601,5**

Tabla 10: Cuadro de Potencias.

3.2 LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN

3.2.1 Tramo aéreo de línea de media tensión

3.2.1.1 LISTADO DE PUNTOS DEL TERRENO

En la Tabla 11: se listan los puntos más significativos del perfil del terreno por donde se tiende el tramo de línea eléctrica aérea de media tensión:

			Coordenadas		
			Relativas		
Ref.	Ant.	Tipo	Distancia (m)	Angulo (ºC)	Altura (m)
1	0	Apoyo de entronque	0,0	0,0	0,0
2	1	Apoyo fin de línea	50,0	0,0	0,0

Tabla 11: Perfil del terreno

Se ha elegido el siguiente criterio para tomar diferencias relativas de altura: se consideran positivas cuando el siguiente punto está por encima del anterior, y negativas en caso de estar por debajo.

3.2.1.2 CÁLCULOS ELÉCTRICOS

En la Tabla 12: se muestran los cálculos eléctricos en cada uno de los tramos que componen la línea.

Tramo	Ref.	L (km)	Dgm (m)	X (Ω/Km)	R (Ω/Km)	δmáx (A/mm²)	In (A)	Δv (V)	Δv (%)	ΔP (kW)	ΔP (%)	Pmáx (kW)
1 - 2	LA-56	0,050	1,491	0,377	0,614	3,608	24,2	1,2891	0,009	54,1	0,009	5118,2

Tabla 12: Parámetros de cálculos eléctricos

L : Longitud del tramo en kilómetros.

Dgm: Distancia geométrica media entre fases en metros.

X: Reactancia en Ohmios por kilómetro.

R: Resistencia en Ohmios por kilómetro.

δmáx: Densidad de corriente máxima admisible por el conductor (A/mm²).

In: Intensidad nominal (A).

Δv (V): Caída de tensión en voltios.

Δv (%): Caída de tensión en porcentaje de la tensión nominal.

ΔP (kW): Pérdida de potencia en kilowatios.

ΔP (%): Pérdida de potencia en porcentaje de la potencia nominal.

Pmáx: potencia máxima admisible por el conductor en kW.

3.2.1.3 CONDUCTOR

Los conductores elegidos son de tipo aluminio-acero según la norma UNE 21018 con las siguientes características:

Designación	LA-56
Sección	54,600 mm2.
Diámetro	9,450 mm.
Peso	0,189 kg/m.
Carga de rotura	1670 kg.
Módulo de elasticidad	8100 kg/mm².
Coeficiente de dilatación lineal	19,100 ºC-1

El tendido de los conductores se realiza utilizando la tabla de tensiones y flechas que aparecen en la Tabla 13: , en el apartado 3.2.1.6.

Estas tablas han sido obtenidas de forma que la componente horizontal de la tensión en los conductores no sobrepase en ningún caso su carga de rotura dividida por un coeficiente de seguridad igual a 3,00.

Para obtener la tensión del conductor en otras condiciones de equilibrio diferentes (temperatura y sobrecarga), se ha empleado la "ecuación del cambio de condiciones" basada en la ecuación de la parábola, que tiene la forma:

$$T^2 \cdot (T + A) = B$$

donde:

$$A = \alpha \cdot (\theta - \theta_o) \cdot S \cdot E - T_o + \frac{a^2}{24} \cdot \frac{{p_o}^2}{{T_o}^2} \cdot S \cdot E$$

$$B = \frac{a^2 \cdot p^2}{24} \cdot S \cdot E$$

Siendo:

a: Longitud proyectada del vano de regulación (m).

T_o: Tensión horizontal en las condiciones iniciales (kg).

θ_o: Temperatura en las condiciones iniciales (°C).

p_o: Sobrecarga en las condiciones iniciales (kg/m).

T: Tensión horizontal en las condiciones finales (kg).

θ: Temperatura en las condiciones finales (°C).

p: Sobrecarga en las condiciones finales (kg/m).

S: Sección del neutro fiador (mm²).

E: Módulo de elasticidad del neutro fiador (kg/mm²).

α: Coeficiente de dilatación lineal del neutro fiador (m/°C).

3.2.1.4 TRACCIÓN MÁXIMA ADMISIBLE. CONDICIONES INICIALES

Para la determinación de las condiciones iniciales de temperatura θo, peso con sobrecarga po, y tracción horizontal del conductor To, se han aplicado las hipótesis que se detallan a continuación y se ha escogido la que produce tensiones más desfavorables en cada vano de regulación.

Hipótesis REGLAMENTARIA

Las condiciones de temperatura y sobrecarga aplicadas en esta hipótesis son las que se describen en el artículo 27.1 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, que dependen de la zona por donde se va a tender la línea:

ZONA A (hasta 500 m. de altitud): Peso propio más sobrecarga de viento de 60 kg/m² ó 50 Kg/m² según sea d ≤ 16mm ó d > 16mm, a la temperatura de –5°C.

ZONA B (desde 500 m. a 1000 m. de altitud): Peso propio más sobrecarga de hielo de 180x√d gr/m a la temperatura de –15°C.

ZONA C(a partir de 1000 m. de altitud): Peso propio más sobrecarga de hielo de 360x√d gr/m a la temperatura de –20°C.

Siendo d el diámetro del conductor en milímetros.

Hipótesis FENÓMENOS VIBRATORIOS (E.D.S.)

El E.D.S. (Every Day Stress) es la tensión a una temperatura de 15,0 °C, sin sobrecargas y dada en tanto por ciento respecto de la carga de rotura. Consideramos que el valor límite del E.D.S. para que no se produzcan efectos vibratorios (tense al límite estático-dinámico) es del 15,0%.

3.2.1.5 FLECHAS MÁXIMAS

Las flechas que se alcanza para la tensión correspondiente a las condiciones de equilibrio se ha calculado utilizando la ecuación de Truxá:

$$f = \frac{p \cdot a \cdot b}{8 \cdot T} \cdot \left(1 + \frac{a^2 \cdot p^2}{48 \cdot T^2} \right)$$

Siendo:

p: Peso del conductor por metro lineal en las condiciones consideradas (kg/m).

a: Longitud proyectada del vano (m).

b: Longitud real del vano (m).

$b = \sqrt{a^2 + h^2}$

h: Desnivel (m).

T: Componente horizontal de la tensión (kg).

El tendido de la línea se ha realizado utilizando la curva catenaria correspondiente a las condiciones de flecha máxima y manteniendo una distancia al terreno mínima de 6,00 m.

La flecha máxima de los conductors se determina mediante las hipótesis siguientes:

a) Hipótesis de temperatura: sometidos a la acción de su peso propio y a la temperatura máxima previsible, teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y las de servicio de la línea. Esta temperatura no será inferior a 50°C.

b) Hipótesis de hielo: sometidos a la acción de su peso propio y a la sobrecarga de hielo correspondiente a la zona, a la temperatura de 0°C.

3.2.1.6 TABLAS DE TENDIDO

VANO		-5ºC		0ºC + H		0ºC		5ºC		10ºC	
	V° Reg	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
1	50,00	313	0,19	275	0,21	275	0,21	240	0,25	208	0,28

15ºC		15ºC + V		20ºC		25ºC		30ºC		35ºC		40ºC	
T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
179	0,33	305	0,62	154	0,38	134	0,44	118	0,5	106	0,56	96	0,62

45ºC		50 °C		-5ºC + 1/2V		-5ºC + V		-15ºC + H		-20ºC + H			FLECHA
T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	ZONA	MÁXIMA
88	0,67	81	0,73	342	0,31	400	0,47	488	0,48	623	0,65	A	**0,73**

Tabla 13: Tabla de Tendido y Flecha.

3.2.1.7 AISLAMIENTO

Los aisladores utilizados son del tipo U40BS:

Designación	**Modelo E 40/100**
Paso	100 mm.
Línea de fuga	185 mm.
Tensión de perforación en aceite	110,0 kV.
Carga de rotura electromecánica	40,0 kN.
Peso neto aproximado	1,7 kg.
Número de aisladores	3

El número de elementos por cadena seleccionado permite que las tensiones de ensayo soportadas tanto a onda de choque como a frecuencia industrial superen el valor reglamentario fijado en el artículo 24 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión.

Desde el punto de vista mecánico y considerando los esfuerzos máximos a que han de están sometidos, resulta un coeficiente de seguridad mínimo de 2,69, que es superior al reglamentario.

3.2.1.8 DISTANCIAS DE SEGURIDAD

3.2.1.8.1 AL TERRENO

De acuerdo con el apartado 25.1 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, la distancia de los conductores al terreno deberá ser superior a:

$$dt = 5{,}3 + \frac{U}{150}$$

Con un valor mínimo de 6,0 m.

Siendo:

d_t: Distancia del conductor inferior al terreno en metros.

U: Tensión nominal de la línea (kV).

En el caso de la línea objeto de este proyecto la distancia mínima del conductor inferior al terreno es de 8,27 metros.

3.2.1.8.2 ENTRE CONDUSTORES

La distancia mínima de los conductores entre sí, y entre ellos y sus partes en tensión y masa, se obtienen mediante las expresiones contenidas en el artículo 25.2 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, es decir:

Separación mínima entre conductores:

$$dc = k \cdot \sqrt{F_{\max} + L_{cadena}} + \frac{U}{150}$$

Siendo:

d_c: Distancia entre conductores.

k: Coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento.

F_{max}: Flecha máxima (m).

L_{cadena}: Longitud en metros de la cadena de suspensión. En el caso de conductores fijados al apoyo por cadenas de amarre L_{cadena} = 0 m.

U: Tensión nominal de la línea (kV).

Dado el conductor empleado y la categoría de la línea, y aplicando el artículo 25.2 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, se obtiene un valor de k = 0,23. De esta forma la separación mínima entre conductores para cada vano, toma el valor de 0.33 m.

3.2.1.8.3 ENTRE CONDUCTORES Y PARTES METÁLICAS

Según el artículo 25.2 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, la separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos, no será inferior a:

$$dm = 0{,}1 + \frac{U}{150}$$

Con un valor mínimo de 0,2 m.

Siendo:

dm: Distancia entre conductores y partes metálicas.

U: Tensión nominal de la línea (kV).

3.2.1.9 DESVIACIÓN DE LAS CADENAS DE AISLADORES

La desviación de la cadena de aisladores es nula, ya que todas las cadenas de aisladores en cuestión son de amarre.

3.2.1.10 APOYOS

Los apoyos y crucetas utilizados son:

APOYO		VERTICAL POR FASE			HORIZONTAL TOTAL			TORSION (Hip. 4)		TIPO	TIPO	TORRE
Nº	FUNCION	Hip. 1	Hip. 2	H3/H4	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Fase	Protección	TORRE	CRUCETA	SELECCIONADA
1	AM	15		25	1.267			800		R.U.	S	**C-2000**
2	FL	15		25	1.267			800		R.U.	S	**C-2000**

Armados S y N				Armados T y B							
Cabeza	Crucetas		Cúpula	Crucetas			COMPROBACIÓN	DENOMINACIÓN	CÓDIGO	PESO
"b"	"a"	"c"	"h"	"a"-"d"	"b"	Ahorcam.	ESF.VERTICAL	TORRE	ARMADO	DE LA TORRE
1,2	1	1,25				OK	OK	**C-2000-14**	**S1120**	**669**
1,2	1	1,25				OK	OK	**C-2000-14**	**S1120**	**669**

Tabla 14: Apoyos y Crucetas.

3.2.1.11 CRITERIOS DE CÁLCULO

A continuación se exponen los criterios utilizados para el cálculo de los esfuerzos externos actuantes sobre los apoyos:

a) Esfuerzos del viento sobre conductores en dirección normal a la línea

$$n \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot d \cdot k_v \cdot \cos\left(\frac{180 - \alpha}{2}\right)$$

Siendo:

n: Número de conductores.

a_1 y a_2: Longitud proyectada del vano anterior y posterior (m).

d: Diámetro del conductor (mm).

k_v: Presión del viento: 0,06 si d ≤ 16 mm. ó 0,05 para d > 16 mm.

α: Ángulo interno formado por los dos tramos de la línea en el apoyo que se calcula (grados sexagesimales). En apoyos que no introduzcan cambios de dirección α = 180°.

b) Esfuerzos del viento sobre herrajes y aisladores en dirección normal a la línea

Se considera un esfuerzo de 7,0 kg. por cada cadena de aisladores, en función de sus características y superficie expuesta al viento.

c) Resultante de ángulo

Hipótesis de viento:

$$n \cdot 2 \cdot T_{-5°C+V} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Siendo:

n: Número de conductores.

α: Ángulo interno formado por los dos tramos de la línea en el apoyo que se calcula (grados sexagesimales).

$T_{-5°C+V}$: Componente horizontal de la tensión en las condiciones de temperatura igual a –5°C más sobrecarga de viento.

d) Desequilibrio de tracciones

100% de la tracción del conductor para los apoyos de inicio y fin de línea.

50% del tiro de conductores en apoyos de anclaje. Los apoyos de Ángulo se han considerado anclajes ya que llevan cadenas de aisladores de tipo amarre.

8% del tiro de conductores en apoyos de alineación con cadenas de suspensión.

e) Rotura de conductores

El esfuerzo de rotura de conductores se aplica a los apoyos de tipo anclaje, inicio y final de línea, y equivale a un esfuerzo igual a la componente horizontal de la tensión aplicada en el extremo de la cruceta.

f) Peso de conductores sobre las crucetas

$$p_{HIP.ZONA} \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} + T_{HIP.ZONA} \cdot \left(\frac{h_1}{a_1} - \frac{h_2}{a_2} \right)$$

Siendo:

a_1 y a_2: Longitud proyectada del vano anterior y posterior (m).

h_1 y h_2: Desnivel de vano anterior y posterior (m). Se consideran positivos si el apoyo de la derecha está más alto que el de la izquierda.

$p_{HIP.ZONA}$: Peso más sobrecarga correspondiente a la zona:

ZONA A: Sin sobrecarga.

ZONA B: Sobrecarga de hielo de 180x√d gr/m.

ZONA C: Sobrecarga de hielo de valor 360x√d gr/m.

$T_{HIP.ZONA}$: Componente horizontal de la tensión en las condiciones de temperatura y sobrecarga correspondientes según la zona:

ZONA A: -5°C sin sobrecarga.

ZONA B: -15°C más una sobrecarga de hielo de 180x√d gr/m.

ZONA C: -20°C más sobrecarga de hielo de valor 360x√d gr/m.

g) Peso de los aisladores sobre las crucetas

Se ha considerado un peso de 8,0 kg. por cada cadena de aisladores, en función del número de elementos y de las características de los herrajes.

3.2.1.12 APOYOS DE ENTRONQUE Y FIN DE LÍNEA

Esfuerzos resultantes en los apoyos de inicio y fin de línea.

Apoyo		Esfuerzo vertical total			Esfuerzo horizontal total			Torsión (Hip. 4ª)	
Nº	Función	Hip.1ª	Hip. 2ª	Hip. 3ª/4ª	Hip. 1ª	Hip. 2ª	Hip. 3ª	Fase	Protección
1	AM	44		75	1.267			800	
2	FL	44		75	1.267			800	

Tabla 15: Esfuerzos sobre los apoyos.

3.2.1.13 CIMENTACIONES

Las dimensiones de los cimientos se calculan de modo que se confía su estabilidad fundamentalmente a las reacciones horizontales del terreno (reacciones laterales de las paredes del cimiento), estableciendo como condición, según el artículo 31.2 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión que el ángulo de giro de la cimentación tome un valor cuya tangente sea inferior a 0,01 para alcanzar el equilibrio entre las acciones que tienden a producir un vuelco y las reacciones del terreno.

Los momentos estabilizadores producidos por las reacciones del terreno sobre los cimientos se han calculado usando las ecuaciones de Sulzberger:

$$Me = 139 \cdot C_2 \cdot b \cdot {h_c}^4 + a^2 \cdot b \cdot (h_c + db) \cdot 2200 \cdot \left(0'5 - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{1'1 \cdot \frac{h_c}{a} \cdot \frac{1}{10 \cdot C_2}} \right) \text{ en kg·m}$$

Se ha elegido un terreno de naturaleza Clasificación típica. Normal C2 = 10 kg/cm³, siendo C2 el coeficiente de compresibilidad del terreno a 2m de profundidad, para el que se ha elegido un valor de 10,00 kg/cm3.

Para cimentaciones de profundidad superior a hc > 2 metros se tomará C2 constante y se aplicará la siguiente ecuación:

$$Me = 278 \cdot C_2 \cdot b \cdot h_c^{\,3} + a^2 \cdot b \cdot (h_c + db) \cdot 2200 \cdot \left(0'5 - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{1'1 \cdot \frac{h_c}{a} \cdot \frac{1}{10 \cdot C_2}} \right) \text{ en kg·m}$$

Siendo:

C_2: Coeficiente de compresibilidad del terreno a la profundidad de 2 metros (kg/cm³).

h_c: Profundidad de cimentación (m).

db: Espesor del cimiento de hormigón que sobresale del terreno (m).

a: Lado del cimiento paralelo al esfuerzo nominal (m).

b: Lado del cimiento perpendicular al esfuerzo nominal (m).

Los momentos de vuelco han de calcularse con respecto al eje de giro del cimiento, cuya situación se supone a los 2/3 de la altura h_c del cimiento.

Los momentos de vuelco debidos al viento sobre la propia estructura del apoyo se calculan de acuerdo con lo establecido en el artículo 16 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión. En el caso particular de apoyos de celosía, el cálculo del esfuerzo del viento requiere el conocimiento de la superficie real expuesta al viento, por lo que el valor de dicho esfuerzo del viento se ha tomado de los datos facilitados por el fabricante.

En apoyos de tipo tronco-piramidal el punto de aplicación del esfuerzo del viento se calcula por la ecuación:

$$H = \frac{H}{3} \frac{d_b + 2 \cdot d_c}{d_b + d_c}$$

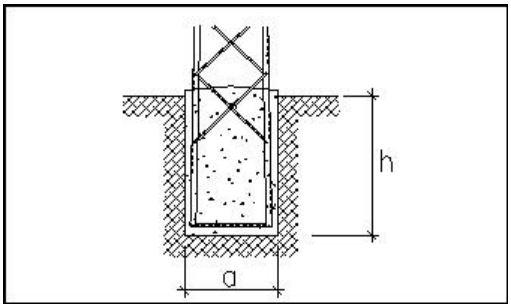
siendo H la altura libre total y d_b y d_c las anchuras en el empotramiento y en la cogolla, respectivamente.

El coeficiente de seguridad al vuelco será el cociente entre el momento estabilizador debido al cimiento y el momento de vuelco total, calculados en la forma que ha sido indicada. En las cimentaciones de apoyos se da la circunstancia de que el momento estabilizador es debido en su mayor parte a las reacciones horizontales del terreno sobre las paredes verticales del macizo. En tal caso debe cumplirse que la tangente del ángulo de desviación para que se llegue a las reacciones del terreno que determinan la estabilidad no debe ser superior a 0,01, condición que es tenida en cuenta en la ecuación de Sulzberger. En cuanto al coeficiente de seguridad, en tales circunstancias, se ha adoptado un valor mínimo de 1,20.

Se ha de señalar que, en aquellos casos en los que, por exigirse las condiciones de seguridad reforzada, el coeficiente de seguridad debe ser incrementado un 25 por ciento, lo que se ha hecho es incrementar un 25 por ciento los esfuerzos externos actuantes transmitidos por los conductores. Igualmente han de ser incrementados en un 25 por ciento los momentos de vuelco correspondientes a esfuerzos del viento sobre las estructuras de los apoyos.

Nº	Torre	Terreno	a	h	b	H	c	V(Exc.)	V(Horm.)
1	C-2000-14	Normal	1,1	2,15				2,60	2,84
2	C-2000-14	Normal	1,1	2,15				2,60	2,84

Tabla 16: Características de la Cimentación.



a: Dimensión de la cimentación según la cara (esfuerzo secundario).

h: Profundidad de la cimentación.

Figura 33: Detalle de Cimentación.

3.2.2 Tramo subterráneo de línea de media tensión

Esta línea de media tensión de alimentación al Centro de Transformación, viene determinada por las siguientes características principales:

- Tensión nominal de 15/(20) kV
- Línea subterránea
- Aislamiento seco termoestable.

Cables:

Se utilizan cables de aluminio, según recomendación de UNESA 3305 (Julio 1982) y lo indicado en el capítulo III de NT-IMBT 1400/0201/1, con las siguientes características:

- Sección: 150mm^2
- Aislamiento seco termoestable del tipo XLPE, polietileno reticulado.
- Nivel de aislamiento: 12 / 20 KV.
- Cubierta exterior: Capa de PVC

Todos los cables son unipolares con pantalla sobre el aislamiento formado por una corona de 16 mm^2 compuesta por hilos de Cu y contraespira de cinta de Cu, según recomendación UNESA 3305 (Julio 1982).

Secciones **(mm^2)**	R a 90º **(Ω/Km)**	**Capacidad (µF/Km)**	X **(Ω/Km)**	**I(A) XLPE**
1 x95	0,403	0,221	0,120	250
1 x 150	**0,262**	**0,256**	**0,112**	**315**
1 x240	0,161	0,318	0,105	415
1 x400	0,102	0,375	0,098	530

Tabla 17: Datos del cable.

El la Tabla 17: se representan las características del cable bajo las siguientes condiciones:

- Tres cables unipolares dispuestos en mazo.

- Enterrados a una profundidad de 1,2 metros en terrenos de resistencia térmica media, bajo tubo.
- Temperatura máxima en el cable de 90ºC.
- Temperatura máxima de terrenos 40ºC.

Para determinar la sección de los cables se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Intensidad máxima admisible por el cable.
- Caída de tensión.
- Intensidad máxima admisible durante un corto circuito.

Según ENDESA, la potencia de cortocircuito existente en el punto de la red de donde parte el cable subterráneo es de 500 MVA.

Con estos datos de partida, junto con los particulares de la acometida:

- Potencia máxima a transportar: 630 KVA
- Tensión nominal: 15 KV
- Longitud de línea: 20 m (10 m en la bajada por el poste + 10 m subterráneo)

Por la línea circula una corriente de:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}\cdot U} = \frac{630}{\sqrt{3}\cdot 15} = 24{,}25A$$

donde:

I = Intensidad (A)

S = potencia aparente (kVA)

U = tensión entre fases (kV)

Se emplea cable RHZ1 12/20 KV de Aluminio de 150 mm^2 de sección, que según las normas particulares de ENDESA es el cable de media tensión de mínima sección a utilizar en tramos subterráneos.

La densidad de corriente que circula por el cable, es:

$$\delta \max = \frac{I}{s} = \frac{24,25}{150} = 0,162 A/mm^2$$

donde:

$\delta \max$ = densidad de corriente (A/mm^2)

I = Intensidad (A)

s = sección del cable (mm^2)

Siendo válida la sección elegida en cuanto a la intensidad admisible en régimen permanente, ya que la máxima admisible para la sección elegida en régimen permanente enterrado a la profundidad de 120 cm, en terreno de resistividad térmica media de 100ºC cm/W y temperatura ambiente del terreno a dicha profundidad de 40ºC es de 277 A.

Siendo la densidad máxima admisible δ máx:

$$\delta \max = \frac{I}{S} = \frac{277}{150} = 1,85 A/mm^2 > 0,162 A/mm^2$$

Hay que comprobar que admite la corriente de cortocircuito.

Considerando que la S_{cc} según la ENDESA es de 500 MVA, se tiene, según norma UNE 21239:1994:

$$I_{cc} = \frac{Scc(MVA)}{U(kV)\cdot\sqrt{3}}$$

donde:

I_{cc} = Intensidad de corticircuito (kA)

U = tensión entre fases (kV)

Sustituyendo valores se obtiene:

$$I_{cc} = \frac{500MVA}{15kV \cdot \sqrt{3}} = 19{,}25kA$$

Para el cable elegido de aluminio sección 150 mm^2 la intensidad de cortocircuito admisible es de 19,8 kA, para una duración máxima del cortocircuito de 0,5 seg, que es el tiempo máximo de actuación de las protecciones. Por lo tanto para duración del cortocircuito igual o inferior a este tiempo, el cable admite la intensidad de cortocircuito.

La determinación de la sección en función de la caída de tensión se realizará mediante la fórmula:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot (r \cdot \cos\varphi + x \cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU = Caída de tensión en voltios

I = Intensidad en amperios

L = Longitud de la línea en kilómetros

r = Resistencia del cable en **Ω** / Km

x = Reactancia a frecuencia de 50 Hz en **Ω** / Km

Según Real Decreto 1995/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica, la diferencia de tensión máxima es de ± 7%. Según las normas particulares de ENDESA está caída de tensión se reduce al valor más restrictivo del 5%.

Sustituyendo valores en la ecuación anterior:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 24{,}25 \cdot 0{,}020 \cdot (0{,}262 \cdot 0{,}85 + 0{,}112 \cdot 0{,}526) = 0{,}2366V$$

La caída de tensión en % (ΔU(%)) vendrá dada por:

$$\Delta U(\%) = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 = \frac{0,2366}{15000} \cdot 100 = 0,00158\% < 5\%$$

3.3 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

3.3.1 INTENSIDADES NOMINALES

3.3.1.1 INTENSIDAD EN ALTA TENSIÓN.

La intensidad primaria en un sistema trifásico viene dada por la expresión:

$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_p} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 15} = 24{,}25A$$

donde:

I_p = Intensidad primaria, en A.

S = Potencia en kVA de los transformadores.

U_p = Tensión primaria, en kV.

La potencia total instalada en este centro de transformación es de 630 kVA, y la tensión de alimentación es de 15 kV, por lo que, la intensidad en el lado de alta es de 24,25 A.

3.3.1.2 INTENSIDAD EN BAJA TENSIÓN.

La intensidad en el secundario de un transformador trifásico viene dada por la siguiente expresión:

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{630.000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909{,}3A$$

donde:

I_s = Intensidad secundaria, en A.

S = Potencia del transformador, en VA

U_s = Tensión en el secundario, en V

El centro de transformación consta de un único transformador. La potencia es de 630 kVA y la tensión en el secundario es de 400 V, por lo que se tiene una intensidad nominal de hasta 909,3 A.

3.3.2 INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO

3.3.2.1 INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO EN EL LADO DE ALTA TENSIÓN

Se determina el valor de Intensidad de cortocircuito en el lado de alta según norma UNE 21239:1994:

$$/Z_Q/ = C_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}{}^2}{S''_{kQ}} = 1{,}10 \cdot \frac{15.000^2}{500 \cdot 10^6} = 0{,}495\Omega$$

$$I_{kQ\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot /Z_Q/}$$

donde:

Z_Q = Módulo de la impedancia de la red (Ω).

I_{kQmax} = Máxima Intensidad de cortocircuito permanente en el lado de media tensión, en kA.

S''_{kQ} = Potencia de cortocircuito de la red, en VA.

U_{nQ} = Tensión nominal en el lado de alta, en V.

C_{max} = Factor de tensión para corriente de cortocircuito máxima (según UNE 21239:1994).

sabiendo que: $\frac{R_Q}{Z_Q} = 0{,}2$

se obtiene: $Z_Q = 0{,}099 + j \cdot 0{,}485(\Omega)$

La tensión de alimentación al centro de transformación es de 15 kV, y la potencia de cortocircuito, según datos de la compañía, es de 500 MVA, por lo que, en caso de cortocircuito, sustituyendo valores en la expresión de I_{kQ}:

$$I_{kQ\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot / Z_Q /} = 1{,}10 \cdot \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 0{,}495} = 19{,}25 kA$$

El valor de cresta i_{pQ} de la intensidad de cortocircuito, en el lado de media tensión, viene dado por la expresión:

$$i_{pQ} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kQ}$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}099/0{,}485)} = 1{,}55$$

$$i_{pQ} = 1{,}55 \cdot \sqrt{2} \cdot 19{,}25 = 42{,}20 kA$$

El valor de I_{kQ} calculado es el valor de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el lado de media tensión (cortocircuito trifásico).

3.3.2.2 INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO EN EL LADO DE BAJA TENSIÓN

La intensidad de cortocircuito en el secundario de un transformador trifásico viene determinada por la siguiente expresión:

$$I_{k\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_Q'' + Z_T)}$$

donde:

Z_Q'' = Impedancia de la red referido al secundario del transformador (Ω).

Z_T = Impedancia del transformador (Ω).

I_{kmax} = Máxima Intensidad de cortocircuito permanente en el lado de baja tensión, en kA.

S = Potencia del transformador, en kVA.

U_{cc} = Tensión de cortocircuito del transformador, en %.

U_n = Tensión secundaria, en V.

El centro de transformación consta de un único transformador. La potencia es de 630 kVA y la tensión de cortocircuito del 4,0 %. La tensión en el secundario es de 400 V.

$$Z_Q'' = \frac{Z_Q}{r_t^2} = \frac{0{,}099 + j \cdot 0{,}485}{37{,}5^2} = 7{,}04 \cdot 10^{-5} + j \cdot 3{,}45 \cdot 10^{-4} (\Omega)$$

donde:

r_t =37,5 : relación de transformación del transformador.

$$/ Z_T / = U_{cc} \cdot \frac{U_n^2}{S} = 0{,}04 \cdot \frac{400^2}{630.000} = 0{,}01\Omega$$

sabiendo que: $\frac{R_T}{X_T} = 0{,}2$

se tiene: $Z_T = 1{,}96 \cdot 10^{-3} + j \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-3} (\Omega)$

Sustituyendo se obtiene que:

$$I_{k\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_Q'' + Z_T)} = 1{,}00 \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot (2{,}03 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0102)} = 4{,}334 - j \cdot 21{,}778 (kA)$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{kmax}/ = 22{,}205$ kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 1{,}96 \cdot 10^{-3} / 9{,}81 \cdot 10^{-3})} = 1{,}56$$

$$i_p = 1{,}56 \cdot \sqrt{2} \cdot 22{,}205 = 48{,}988 kA$$

El valor de I_{kmax} calculado es el valor de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el lado de baja tensión (cortocircuito trifásico).

3.3.3 DIMENSIONADO DEL EMBARRADO.

No es necesario realizar los cálculos teóricos ni las hipótesis de comportamiento de las celdas, pues éstas son sometidas a ensayos en fábrica que certifican los valores indicados en las placas de características.

Estos ensayos aseguran que por las barras de las celdas pueda circular la intensidad nominal máxima sin sobrepasar la densidad de corriente permitida para el material

Así mismo, los ensayos certifican el buen comportamiento de las celdas ante un posible cortocircuito, realizando la comprobación por solicitación térmica, y por solicitación electrodinámica.

Según cálculos justificados realizados en el apartado 3.3.2.1, un cortocircuito en las celdas de media tensión podría alcanzar valores de intensidad de cortocircuito de 19,25 kA eficaces y 42,20 kA cresta. Dadas estas condiciones, las celdas seleccionadas para este centro de transformación satisfacen las características exigidas:

- Intensidad nominal: ..... 400 A.
- Límite térmico 1 s..... 25 kA eficaces.
- Límite electrodinámico: ..... 50 kA cresta.

3.3.3.1 Comprobación por densidad de corriente.

La comprobación por densidad de corriente tiene por objeto verificar que el cable que constituye el embarrado es capaz de conducir la corriente nominal máxima sin sobrepasar la densidad de corriente máxima en régimen permanente. Dado que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas por Orma-SF_6 conforme a la normativa vigente, se garantiza lo indicado para la intensidad asignada de 400 A.

El embarrado está formado por tubos de cobre de diámetro exterior 24 mm y espesor 3mm, equivalente a una sección de 198 mm^2.

La densidad de corriente será por tanto de:

$$\delta = \frac{400}{198} = 2{,}02 A/mm^2$$

Según normativa DIN, a 35 ºC de temperatura ambiente y 65 ºC de temperatura de embarrado, de densidad de corriente máxima, para embarrado de tubo de diámetro 24 mm, es de 3,29 A/mm^2, por lo que se garantiza el correcto funcionamiento del embarrado.

3.3.3.2 Comprobación por solicitación electrodinámica.

Según la MIE-RAT 05, la resistencia mecánica de los cables deberá verificar, en caso de cortocircuito que:

$$\sigma_{máx} \geq \sigma = (I_{ccp}^2 \cdot L^2) / (60 \cdot d \cdot W)$$

siendo:

$\sigma_{máx}$ = Valor de la carga de rotura de tracción del material de los cables. Para cobre semiduro 2800 Kg / cm^2.

I_{ccp} = Intensidad permanente de cortocircuito trifásico, en kA (19,25 kA).

L = Separación longitudinal entre apoyos, en cm (37,5 cm).

d = Separación entre fases, en cm (20 cm).

W = Módulo resistente de los cables, en cm^3 (0,927 cm^3, para barra de 24 mm de diámetro).

Sustituyendo valores se obtiene un valor de:

$$\sigma = 468{,}45 \text{ Kg / cm}^2 < \sigma_{máx} = 2800 \text{ Kg / cm}^2.$$

por lo que existe un gran margen de seguridad (6 veces superior).

Dado que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas por Orma- SF_6, conforme a la normativa vigente, se garantiza el cumplimiento de la solicitación electrodinámica, quedando patente por la comprobación mediante el cálculo numérico anterior.

3.3.3.3 Comprobación por solicitación térmica a cortocircuito.

La sobrecarga máxima admisible en cortocircuito para el embarrado se determina mediante la expresión:

$$I_{th} = \alpha \cdot S \cdot \sqrt{(\Delta T / t)}$$

siendo:

I_{th} = Intensidad eficaz de cortocircuito, en A (25.000 A).

α = 13 para el Cu.

S = Sección del embarrado, en mm^2 (198 mm^2).

ΔT = Elevación o incremento máximo de temperatura, 150ºC para Cu.

t = Tiempo de duración del cortocircuito, en s.

Por la expresión anterior se tendrá que el tiempo máximo que podría soportar el embarrado la intensidad de cortocircuito es de:

$$t = \Delta T \cdot \left(\frac{\alpha \cdot S}{I_{th}} \right)^2 = 150 \cdot \left(\frac{13 \cdot 198}{25.000} \right)^2 = 1{,}59 s.$$

Por lo tanto, y según este criterio, el embarrado podría soportar una intensidad de 25 kA eficaces durante más de 1 segundo.

Puesto que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas por Orma- SF_6 conforme a la normativa vigente, y una vez comprobados los cálculos anteriores, se garantiza que:

$I_{th} \geq$ 19,25 kA durante 1 s.

3.3.4 SELECCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

3.3.4.1 Transformador de intensidad

1) Elección del nivel de aislamiento normalizado:

Según UNE 21-088-81 (1) tablas IIA y 1113 o CEI tablas RAJIB y IIC. Teniendo en cuenta que toda la red de media tensión de ENDESA, está prevista para su funcionamiento futuro a 20 kV, el nivel de aislamiento de la instalación es de 24KV.

2)Elección de la relación de transformación nominal:

X/5

3)Elección de clase de precisión:

Del libro "Transformadores" de E.Ras ApéndiceXII-3, se elige clase de precisión=0.5, que se utiliza para contadores normales, aparatos de medida y reguladores sensibles, y cumple las normas de ENDESA

4)Elección de la potencia nominal necesaria:

Del mismo libro Apéndice XII-2, se toma una potencia de 15 VA. Lo cual cumple con las normas de la ENDESA

5)Límite térmico:

Es el valor eficaz de la corriente primaria que soporta el transformador durante 1 seg sin calentamiento excesivo.

$I_{p,\ perm,c.c.} = 100/\varepsilon_{cc} * I_n = 100/4 * I_n$

De acuerdo con UNE 21080, el transformador es adecuado a este efecto si:

$I_{ter} \geq \sqrt{t} * 100/4 * I_n = 25\ I_n$

Figura en la placa de características, que en este caso vale 200 I_n. Cumpliendo así las normas de la ENDESA

3.3.4.2 Transformador de tensión

1) Se elige de igual forma que para T.I.

2) Relación de transformación nominal:

$$\frac{16.500/\sqrt{3} \div 22.000/\sqrt{3}}{110/\sqrt{3}}$$

De acuerdo a normas ENDESA

3)Elección de clase de precisión:

Análogamente a los transformadores de corriente, las normas:

- UNE-21-088-81(2) y CEI 186, distingue distintas clases de precisión para transformadores de medida.
- Del libro "Transformadores" de E.Ras ApéndiceXII-6,se elige clase de precisión = 0.5.
- De acuerdo con normas de la ENDESA

4)Elección de la potencia nominal necesaria:

Del mismo libro Apéndice XII-5, tomarnos una potencia de 75 VA.

Cumpliendo las normas de la ENDESA

5)Factor de tensión:

Según UNE-21-088-81(2) y CEI 186, se define como aquél factor por el que hay que multiplicar la tensión primaria nominal para la cual el transformador ha de cumplir aun con las prescripciones de calentamiento y de precisión correspondientes.

Se eligen los valores que responden a lo requerido a estos campos durante la práctica habitual, cumpliendo asimismo los requisitos de ENDESA

3.3.5 SELECCIÓN DE LAS PROTECCIONES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN

El transformador está protegido tanto en Alta tensión como en Baja tensión. En Alta tensión la protección la efectúan las celdas asociadas al transformador, y en Baja tensión la protección se incorpora en los cuadros de Baja tensión.

3.3.5.1 Protección del transformador

La protección del transformador en Alta tensión de este centro de transformación se realiza utilizando una celda de interruptor con fusibles combinados, siendo éstos los que efectúan la protección ante cortocircuitos. Estos fusibles son limitadores de corriente, produciéndose su fusión antes de que la corriente de cortocircuito haya alcanzado su valor máximo.

Los fusibles se seleccionan para:
- Permitir el paso de la punta de corriente producida en la conexión del transformador en vacío.
- Soportar la intensidad nominal en servicio continuo.

La intensidad nominal de los fusibles se escoge por tanto en función de la potencia, siendo de 24 kV de tensión nominal y 63 A de calibre.

Para la protección contra sobrecargas se instalará un relé electrónico con captadores de intensidad por fase, cuya señal alimenta a un disparador electromecánico liberando el dispositivo de retención del interruptor.

La seguridad del transformador está garantizada con un relé que integra las siguientes funciones de protección:
- Detección de emisión de gases del líquido dieléctrico, debida a la descomposición provocada por el calor o arco eléctrico que pudiera producirse en el interior de la cuba.
- Detección de un descenso accidental del nivel del dieléctrico (disparo).
- Detección de un aumento excesivo de la presión que se ejerce sobre la cuba (disparo).
- Lectura de la temperatura del líquido dieléctrico (contactos de alarma y disparo regulables).
- Visualización de líquido por medio de un pequeño flotador.

3.3.5.2 Protección en Baja Tensión.

En el circuito de baja tensión del transformador, se instala un Cuadro General de Baja Tensión, con 6 salidas. Se instalarán interruptores automáticos en todas las salidas, con una intensidad nominal igual al valor de la intensidad exigida a esa salida, y un poder de corte mayor o igual a la corriente de cortocircuito en el lado de baja tensión de 23,316 kA, calculada en el apartado 3.3.2.2.

La descarga del trafo al cuadro de Baja Tensión se realiza con cables RV 0,6/1kV 240 mm^2 Al unipolares instalados al aire cuya intensidad admisible a 40ºC de temperatura ambiente es de 420 A.

Para el trafo, cuya potencia es de 630 kVA y cuya intensidad en Baja Tensión es 909,3 A, que se ha calculado en el apartado 3.3.1.2, se emplean 3 cables por fase y 2 para el neutro, teniendo así una intensidad máxima admisible de 1.260 A, superior a la intensidad nominal del trafo.

3.3.6 DIMENSIONADO DE LA VENTILACIÓN DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Los cálculos del dimensionamiento de la ventilación del centro de transformación se realizan siguiendo el Método de Recomendación UNESA para Ventilación de los Centros de Transformación. Según este método el caudal de renovación de aire viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_a = \frac{P_t}{1{,}16 \cdot \theta_a}$$

donde:

Q_a es el caudal de aire en m^3/s

P_t son las pérdidas totales del transformador, en kW

θ_a es la diferencia de temperaturas entre el aire exterior y el aire de salida.

Las pérdidas totales del transformador son:

Trafo de 630 kVA : 6,50 kW de pérdidas a plena carga.

La diferencia de temperaturas, θ_a, es de 15 ºC.

Sustituyendo estos valores en la expresión de Q_a, se tiene:

$$Q_a = \frac{P_t}{1{,}16 \cdot \theta_a} = \frac{6{,}50}{1{,}16 \cdot 15} = 0{,}37 m^3/s$$

Mediante la siguiente expresión se calcula la velocidad de salida del aire adecuada para estas condiciones de funcionamiento:

$$V_S = 4{,}6 \cdot \frac{\sqrt{h}}{\theta_a}$$

Siendo:

V_S la velocidad de salida del aire, en m/s.

h la diferencia de alturas entre los centros de las rejillas de ventilación superior e inferior, que en este caso es de 1,5 m.

Sustituyendo valores, se tiene:

$$V_S = 4{,}6 \cdot \frac{\sqrt{h}}{\theta_a} = 4{,}6 \cdot \frac{\sqrt{1{,}5}}{15} = 0{,}38 m/s$$

El cálculo de la superficie mínima de la rejilla de ventilación de salida (S_2) viene dada por la expresión:

$$S_2 = \frac{Q_a}{V_S}$$

Que sustituyendo los valores anteriores en esta expresión se tiene:

$$S_2 = \frac{Q_a}{V_S} = \frac{0{,}37}{0{,}38} = 0{,}97 m^2$$

La superficie mínima de la rejilla de ventilación de entrada (S_1) viene dada por:

$$S_1 = 0{,}92 \cdot S_2 = 0{,}92 \cdot 0{,}97 = 0{,}89 m^2$$

3.3.6.1 Solución adoptada

El centro de transformación se encuadra en una caseta prefabricada de hormigón de características normalizadas. El edificio prefabricado, conforme Orma-mn, ha sufrido ensayos de homologación en cuanto al dimensionado de la ventilación del centro de transformación.

Cuenta con rejillas de ventilación de 1,122 m^2 de superficie (rejilla de entrada de aire y de salida de aire), con una diferencia de alturas de 1,5 m, cumpliéndose así con los requisitos, de las dimensiones mínimas de las rejillas, calculados.

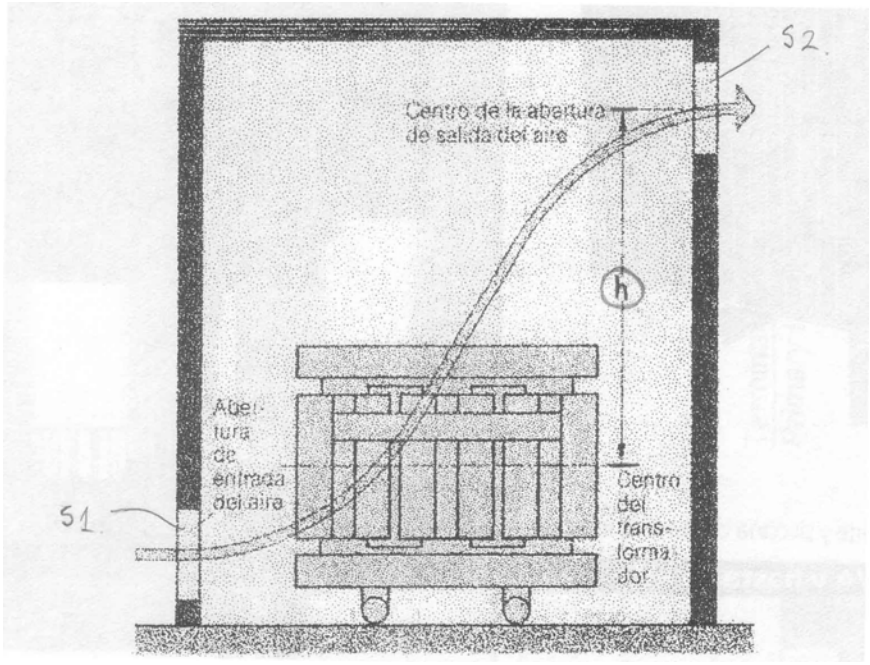


Figura 34: Esquema de Ventilación mediante rejillas.

3.3.7 DIMENSIONADO DEL POZO APAGAFUEGOS

El pozo de recogida de aceite es capaz de alojar la totalidad del volumen que contiene el transformador, y así es dimensionado por el fabricante al tratarse de un edificio prefabricado. Se trata de un foso de recogida de aceite con revestimiento resistente y estanco, con capacidad suficiente para albergar el volumen de aceite que pueda recibir, que en este caso el volumen total de aceite que contiene el transformador es de 540 l.

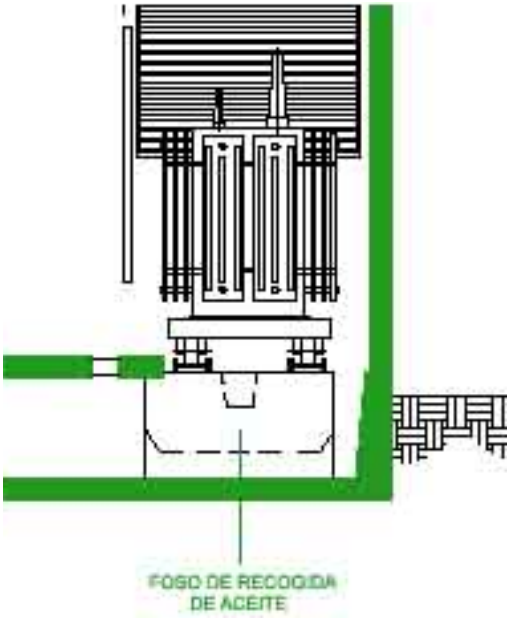


Figura 35: Foso de recogida de aceite.

3.3.8 CÁLCULO DE LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.

3.3.8.1 Investigación de las características del suelo.

La resistividad del terreno, sobre el que se ubica el Centro del Transformación, depende de la naturaleza de este.

Al tratarse de una instalación de tercera categoría (con intensidad de cortocircuito menor de 20 kA) se podrá estimar la resistividad del terreno mediante el método Wenner.

Este método consiste, a grandes rasgos, en la medida de una tensión e intensidad en cuatro picas colocadas en el terreno formando una línea a una profundidad determinada y separadas una distancia de "a" metros entre ellas. Dicha distancia viene dada por la relación a=(4/3)·h, donde h es la profundidad máxima de instalación de electrodo en metros.

El esquema se representa en la Figura 36:

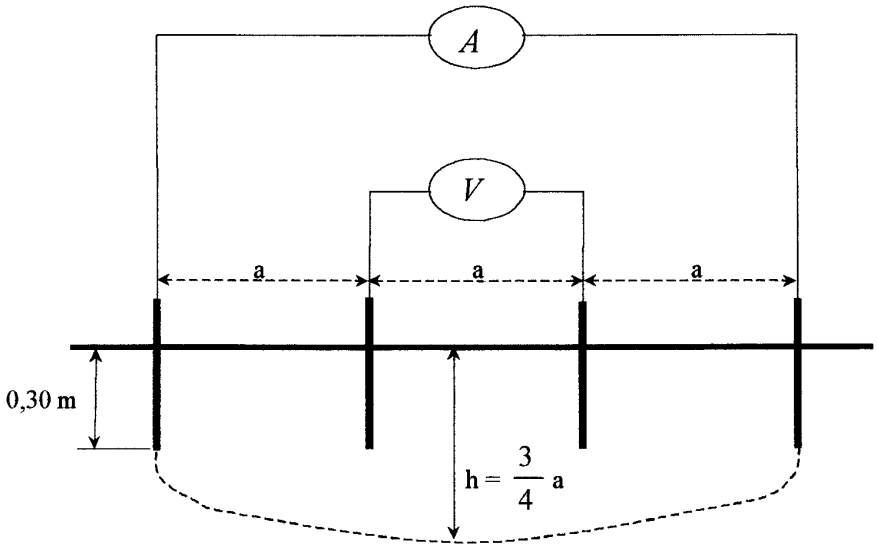


Figura 36: Medida de la resistividad del terreno.

El cálculo se llevará a cabo mediante la fórmula $\rho = 2\pi aV/I$, donde V e I son las medidas del Voltímetro y el Amperímetro respectivamente y ρ es la resistividad media del terreno en Ω·m.

En este caso se trata de un Centro de Transformación colocado sobre un terreno de resistividad media de: $\rho = 100\ \Omega \cdot m$

3.3.8.2 Parámetros característicos.

3.3.8.2.1 Tensión Nominal.

El suministro eléctrico de media tensión se llevará a cabo por parte de la compañía ENDESA, cuya tensión nominal en la red de distribución de media tensión de la zona es de 15 kV. No obstante, la ENDESA anuncia un cambio de tensión en toda su red a media plazo, tensión que se uniformizará al valor de 20 kV. Los cálculos del sistema de puesta a tierra se realizan con la tensión de 20 kV, tensión que soportará el sistema en el futuro, teniendo así un sistema de puesta a tierras más seguro en la actualidad, ya que el valor de 20 kV es más restrictivo.

El valor de la tensión nominal de la red de baja tensión viene fijado, en todos los casos en 400/230 V.

3.3.8.2.2 Intensidad máxima de cortocircuito a tierra.

La intensidad máxima de defecto a tierra viene limitada por el valor de 300 A, según normas de ENDESA

3.3.8.2.3 Tiempo máximo de desconexión en caso de defecto.

Tanto para los posibles cortocircuitos entre fases como a tierra, el tiempo especificado de desconexión que se considera es de 1 segundo como máximo.

3.3.8.2.4 Tensión de aislamiento de la instalación de baja tensión.

La tensión máxima de aislamiento soportada (tensión de aislamiento) por el cuadro de baja tensión así como los distintos dispositivos, aparamenta, etc. que constituyen el equipo de baja tensión del Centro de Transformación, a frecuencia industrial (50 Hz) es de V_{bt} = 10.000 V.

3.3.8.2.5 Resistencia de Puesta a Tierra del neutro de la Red.

El neutro de la Red puede estar dispuesto de las siguientes formas:

-Neutro Aislado.

-Neutro unido a Tierra.

En el caso de que el neutro de la red esté unido a tierra, éste puede estar unido directamente a tierra o a través de una impedancia, en cuyo caso se producirá una limitación de la corriente de falta en función del valor de la impedancia.

En este estudio se adopta una disposición de neutro conectado a tierra a través de una impedancia.

El valor de la resistencia de puesta a tierra del neutro de la red (R_n) se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$I_d = \frac{U}{\sqrt{3}\sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n{}^2}}$$

donde:

I_d = Intensidad máxima de defecto a tierra en el centro en consideración (A)

U = Tensión compuesta de servicio de la red de media tensión (V)

R_n = Resistencia de la puesta a tierra del neutro de la red (Ω)

R_t = Resistencia de la puesta a tierra de protección del centro (Ω)

X_n = Reactancia de la puesta a tierra del neutro de la red (Ω)

Sustituyendo el valor de X_n = 0 Ω, queda:

$$I_d = \frac{U}{\sqrt{3}\cdot(R_n + R_t)}$$

El valor de la máxima intensidad de defecto aparece en el caso de que la resistencia de puesta a tierra de protección del centro (R_t) sea nula, R_t=0 Ω. Además esta intensidad máxima de defecto viene fijada por la ENDESA por el valor de I_d = 300 A.

En este caso, sustituyendo estos valores se obtiene R_n :

$$300A = \frac{20.000}{\sqrt{3}\cdot(R_n + 0)}$$

$$R_n = 38{,}5\Omega$$

Según las normas particulares de ENDESA, la instalación de puesta a tierra del Centro de Transformación se ajusta a la MIE RAT 13, no adoptando ninguna otra prescripción particular. Por esta razón se recurre al método de instalación de unión del neutro a tierra a través de una impedancia.

3.3.8.3 Determinación de la máxima tensión de contacto

Para la determinación de la tensión máxima aplicable al cuerpo humano, en función del tiempo de la duración del defecto, se usa la Instrucción Técnica Complementaria MIE RAT-013:

Para $0,1 \leq t \leq 3$ segundos:

$$V_{CA} = \frac{k}{t^n}$$

siendo k y n constantes en función del tiempo:

$0,1 \leq t < 0,9$ segundos, k = 72 n=1
$0,9 \leq t < 3$ segundos, k = 78,5 n=0,18

Para $3 < t < 5$ segundos, $V_{CA} \leq 64$ V

Para $t > 5$ segundos, $V_{CA} \leq 50$ V

Tabla 18: Tensión máxima aplicable al cuerpo humano entre pies y manos en función de la duración de la falta.

V_{CA} = tensión máxima aplicable al cuerpo humano entre manos y pies.

Sustituyendo en la ecuación de la Tabla 18: el valor dado por la compañía suministradora de tiempo máximo de desconexión de 1 segundo :

t = 1 segundo, k = 78,5 n = 0,18

$$V_{CA} = \frac{k}{t^n} = \frac{78,5}{1^{0,18}} = 78,5V$$

3.3.8.4 Diseño preliminar de la instalación de puesta a tierra.

En este punto se elige una determinada configuración de electrodos para la instalación de puesta a tierra de protección siguiendo las recomendaciones del método UNESA, y posteriormente se analiza la validez de esta configuración en cuanto al cumplimiento de las condiciones y especificaciones del sistema.

En concreto, se debe verificar si se cumplen las tensiones de paso, tensiones de contacto, intensidad de defecto, tensión de aislamiento, etc., que se analizan con detalle en puntos posteriores.

Las dimensiones físicas en planta del habitáculo que alberga, y constituye en sí, el Centro de Transformación, es de 2,5 x 4,5 metros.

La intensidad máxima de defecto viene dada por las ecuaciones del apartado 3.3.8.2.5 y a su vez, sustituyendo los valores de R_n y X_n. La tensión de defecto, que será el producto de esta intensidad máxima de defecto por la resistencia de puesta a tierra de protección, debe cumplir que no supere el valor máximo de aislamiento que componen el Centro de Transformación (fijado en 10.000 V) por lo que se tiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas que proporciona la condición necesaria que debe cumplir R_t. A partir de este punto se puede elegir una configuración adecuada de electrodo que cumpla la condición citada para posteriormente comprobar que a su vez cumple todas las especificaciones necesarias para ser instalada en el Centro de Transformación en cuestión.

Sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$\left.\begin{aligned} I_d &= \frac{U}{\sqrt{3}\cdot(38{,}5 + R_t)} \\ V_{bt} &\geq V_d = R_t \cdot I_d \end{aligned}\right\}$$

Sustituyendo los valores se tiene:

$$10.000 \geq R_t \cdot \frac{20.000}{\sqrt{3}\cdot(38{,}5 + R_t)}$$

De aquí se puede calcular la condición que gobierna a R_t :

$$R_t \leq 248{,}8\Omega$$

Teniendo en cuenta las dimensiones del Centro de Transformación y siguiendo el catálogo de tipos de configuraciones de electrodos de tierra editado por UNESA, se elige, como primera opción para la tierra de protección, la disposición de electrodos correspondiente al código 50-30/5/42.

Dicho electrodo está formado por un cable de cobre desnudo de 50 mm^2 de sección formando un anillo cuadrado de 5x3m enterrado a 0,5 m de profundidad.

Este cuadrado de cable está conectado a 4 picas de acero cobreado de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro cada una, en cada uno de sus vértices y centro de los lados.

Se ha adoptado esta configuración debido a que sus dimensiones en planta coinciden con las del Centro de Transformación y además, dentro de las varias posibilidades de configuración de electrodos que se podrían elegir, es la más económica y simple dado que requiere de menor cantidad de material cable y está enterrada a una profundidad menor que las demás.

Las características del electrodo elegido son:

· Configuración seleccionada: 50-30/5/42.
· Geometría: Anillo.
· Dimensiones (m): 5x3.
· Profundidad del electrodo (m): 0.5.
· Número de picas: 4.
· Longitud de las picas (m): 2.

Los parámetros característicos del electrodo son:

· De la resistencia, k_r (Ω/Ωxm) = 0.093.
· De la tensión de paso, k_p (V/((Ωxm)A)) = 0.021.
· De la tensión de contacto exterior, k_c (V/((Ωxm)A)) = 0.0461.

En esta configuración se tiene que:

$$R_t = k_r \cdot \rho = 0{,}093 \cdot 100 = 9{,}3\Omega$$

Cumpliéndose así la condición de que: $R_t \leq 248{,}8\Omega$

Esta distribución de electrodo forma la puesta a tierra de protección del Centro de Transformación (deriva las corrientes de defecto de aislamiento a masa). A ella pueden ir conectados los siguientes elementos:

- Masas de aparamenta de Media Tensión y Baja Tensión.
- Chasis y bastidores de aparatos de maniobras.
- Envolventes de armarios de Media tensión y Baja Tensión.
- Puertas metálicas del local.
- Blindajes metálicos de los cables de Media Tensión.
- Carcasas o cubas de los transformadores.

Algunos de estos elementos, en concreto las puertas metálicas del local así como las rejillas que dan al exterior del Centro de Transformación, pueden estar conectados a tierra o no según determinados valores de la tensión de contacto, cuyo estudio se llevará a cabo en los apartados posteriores.

No obstante, puede haber otros elementos, como por ejemplo un mallazo electrosoldado bajo el suelo del Centro de Transformación, que podrán estar conectados a la tierra de protección con el fin de asegurar unas determinadas tensiones de paso, dentro de los valores admisibles. Estas consideraciones se hacen y justificarán en puntos posteriores.

Seguidamente se realizan los cálculos necesarios para el diseño de la instalación para posteriormente comprobar que se cumplen todas las condiciones necesarias referentes a Intensidad de defecto, tensiones de paso y de contacto, etc...

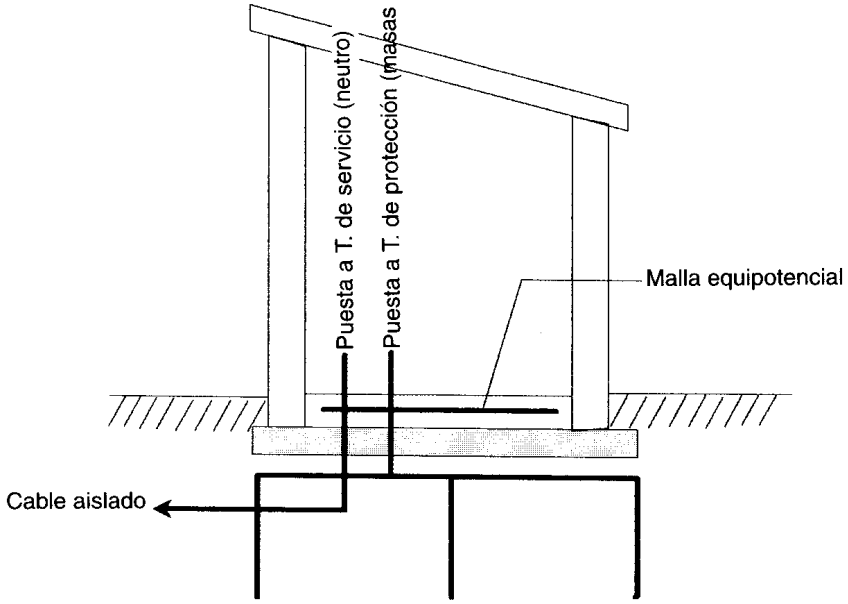


Figura 37: Esquema simple de la disposición de electrodo bajo el Centro de Transformación.

3.3.8.5 Intensidad máxima de defecto a tierra.

Para el cálculo de la intensidad máxima de defecto de la instalación se tiene que tener en cuenta que se trata de una instalación con puesta a tierra con neutro unido a tierra a través de una impedancia (resistencia de puesta a tierra del neutro de la red: $R_n = 38{,}5\ \Omega$).

La Red Eléctrica de media tensión se trata de una red aérea alternada con una red subterránea a partir del poste de entronque. Este tramo de línea enterrada es el que une la línea aérea, que llega al poste de entronque, con el Centro de Transformación. El tramo correspondiente a la red subterránea tiene una longitud de 10 m (desde el poste de entronque al centro de transformación). Dado que esta longitud es muy pequeña, comparándola con el tramo aéreo, y que el método UNESA solo considera el efecto de las líneas enterradas en redes mixtas aérea-cables subterráneos con dos o más tramos de cables subterráneos de longitud total mínima 3 km (cada uno de ellos más de 1 km), no se considera en los cálculos, este tramo subterráneo, suponiendo que la línea se trata de una línea aérea en toda su integridad.

La resistencia de puesta a tierra de protección del centro (R_t) es de 9,3 Ω.

Sustituyendo este valor de R_t y el de R_n = 38,5 Ω en la ecuación del apartado 3.3.8.2.5, se obtiene:

$$I_d' = \frac{U}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^{\,2}}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}\cdot(38{,}5 + 9{,}3)} = 241{,}6A$$

3.3.8.6 Tensión de paso en el exterior

La tensión de paso en el exterior es la parte de la tensión a tierra que puede ser puenteada por un ser humano entre los dos pies, considerándose el paso de una longitud de 1 m, en el exterior de Centro de Transformación.

Para el cálculo de la tensión de paso exterior hay que tener en cuenta la resistividad del terreno en el exterior así como el parámetro de tensión de paso del electrodo en estudio.

La tensión máxima de paso en el exterior se da cuando la intensidad de defecto sea máxima y viene dada por la fórmula siguiente:

$$V_p' = k_p \cdot \rho \cdot I_d' = 0{,}021 \cdot 100 \cdot 241{,}6 = 507{,}3V$$

donde V_p' es la tensión máxima de paso exterior, en V.

La tensión máxima de paso aplicable al cuerpo humano (V_{PA}) (entre pies separados 1 m) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$V_{PA} = 10 \cdot V_{CA}$$

Del apartado 3.3.8.3 se obtuvo que V_{CA} = 78,5 V.

Sustituyendo este valor en la ecuación anterior se obtiene:

$$V_{PA} = 10 \cdot 78{,}5 = 758V$$

La condición que se ha de cumplir, respecto a la tensión de paso exterior calculada en la instalación (V_p'), es que esta sea inferior a la tensión de paso máxima admisible por el cuerpo humano en la instalación (V_p), que viene dada por:

$$V_p = V_{PA} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \rho}{1.000}\right) = 785 \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 100}{1.000}\right) = 1.256V$$

Con lo que se comprueba que se cumple la condición:

$$V_p' = 507{,}3V \leq V_p = 1.256V$$

3.3.8.7 Tensión de paso y de contactos en el interior del centro de transformación.

El suelo del Centro de Transformación está formado por una losa de hormigón en cuyo interior se dispone un mallazo de redondos de acero de 4 mm de diámetro, formando una retícula de 0,20x0,20 m.

La razón de disponer el suelo de hormigón armado, con el mallazo, es únicamente por fines constructivos, ya que esta armadura evita las dilataciones del hormigón proporcionándole un comportamiento y características de mayor rigidez y resistencia a los esfuerzos.

Aprovechando la colocación de este mallazo en el suelo del Centro de Transformación, se conecta este mallazo a la red de tierra de protección en dos puntos opuestos creando así una superficie equipotencial en todo el interior del recinto, como se observa en la Figura 38:

Debido a esta disposición adoptada la tensión de paso en el interior será prácticamente nula, cumpliéndose así la condición de que la tensión de paso que pueda darse en el interior del Centro de Transformación sea inferior a la tensión de paso máxima admisible soportada por el cuerpo humano.

Para evitar que se produzca una tensión de contacto en el interior superior a la máxima admisible se recurre a la unión del mallazo, situado el pavimento del centro de transformación (como ya se ha descrito anteriormente), a la red de tierra de protección creando así una superficie equipotencial en todo el centro de transformación, con lo que se consigue reducir la tensión de contacto en el interior a un valor prácticamente nulo.

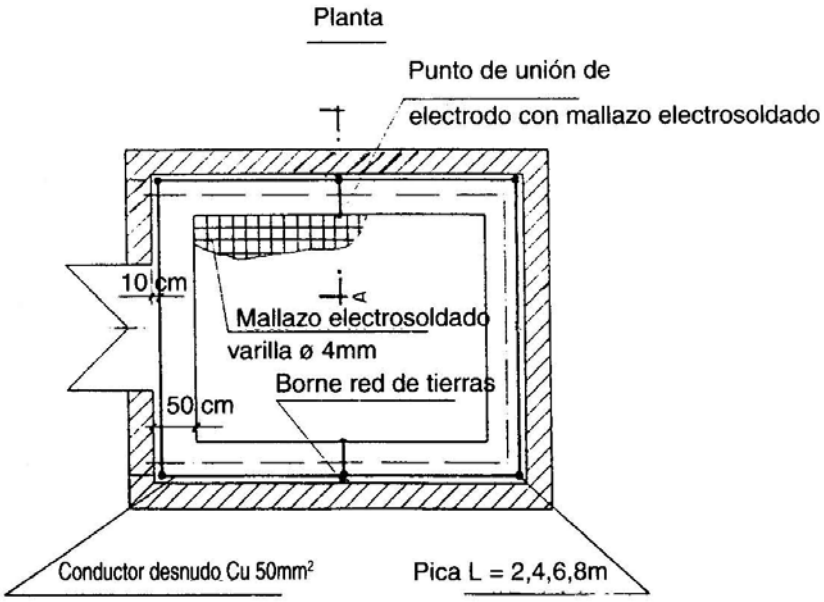


Figura 38: Detalle del mallazo eléctrosoldado en el suelo del centro de transformación.

3.3.8.8 Tensión de contacto en el exterior.

La tensión de contacto en el exterior puede estar causada con el contacto de una persona con alguna parte metálica del Centro de Transformación que de al exterior: puertas de acceso metálicas, ventanas, rejillas metálicas de ventilación, etc.

El valor de esta tensión de contacto (V'_c) tiene el valor de:

$$V'_c = k_c \cdot \rho \cdot I'_d = 0{,}0461 \cdot 100 \cdot 241{,}6 = 1.113{,}8V$$

La tensión máxima de contacto admisible por el ser humano en la instalación (V_c) viene dada por:

$$V_c = V_{CA} \cdot \left(1 + \frac{1{,}5 \cdot \rho_s}{1.000}\right) = 78{,}5 \cdot \left(1 + \frac{1{,}5 \cdot 3.000}{1.000}\right) = 431{,}75V$$

Nota: ρ_s es la resistividad del suelo de hormigón, ya que el exterior del Centro de Transformación cuenta con un acerado de hormigón de 1,00 m de anchura a lo largo de todo el perímetro de este.

La tensión de contacto en el exterior que puede darse en la instalación (V'_c) es superior a la tensión máxima admisible (V_c), por lo que se recurrirá a las siguientes medidas:

- Tanto puertas metálicas, rejillas o diferentes elementos metálicos que den al exterior en el Centro de Transformación están completamente aislados de las masas conductoras susceptibles a quedar sometidas a tensión debido a defectos o averías. Tomando esta medida se da una tensión de contacto exterior prácticamente nula, dando así cumplimiento a la condición de tensión de contacto exterior.

3.3.8.9 Tensión de paso de acceso.

En el espacio destinado al acceso del Centro de Transformación (puerta de acceso) se tiene que controlar la tensión de paso máxima admisible. Esta se denomina tensión de paso de acceso máxima admisible de la instalación ($V_{P(acc)}$) y se debe de cumplir que su valor sea superior a la tensión de paso de la instalación.

Esta tensión de paso de acceso máxima admisible viene caracterizada por estar afectada por la diferente resistividad del terreno en el interior y exterior del centro de transformación. Así, si una persona se dispone a acceder al centro de transformación, esta puede situar un pie en el exterior y otro en el interior del centro de transformación pisando cada uno de ellos una superficie de diferente resistividad.

El pie situado en el exterior estará apoyado sobre un suelo de resistividad ρ = 100 Ω·m, sin embargo el pie apoyado en el interior lo hará sobre un suelo de hormigón cuya resistividad es de ρ_s = 3.000 Ω·m.

Bajo estas condiciones la tensión de paso de acceso máxima admisible viene dada por la ecuación:

$$V_{P(acc)} = 10 \cdot V_{CA}\left[1 + \frac{3 \cdot \rho + 3 \cdot \rho_S}{1.000}\right] = 8.085{,}5V$$

La tensión de paso de acceso de la instalación, $V'_{P(acc)}$, viene gobernada por la misma ecuación que la tensión de contacto exterior (V_c'), y esta debe ser inferior al valor de $V_{P(acc)}$, dando así cumplimiento a esta condición:

$$V_{P(acc)} = 8.085{,}5V \geq V'_{P(acc)} = 1.113{,}8V$$

3.3.8.10 Tensión de defecto.

La tensión de defecto resulta del producto de la resistencia de puesta a tierra y la intensidad de defecto máxima de la instalación:

$$V_d' = R_t' \cdot I_d' = 9{,}3 \cdot 241{,}6 = 2.246{,}88V$$

Se debe cumplir la condición de que este valor de la tensión máxima de defecto sea inferior al nivel de aislamiento de los aparatos de maniobra y protección que, a frecuencia industrial, es de V_{bt} = 10.000V.

Se comprueba la condición:

$$V_d' = 2.246{,}88V \leq V_{bt} = 10.000V$$

3.3.8.11 Intensidad de defecto.

La intensidad de defecto (I_d' = 241,6 A) debe ser mayor que la intensidad umbral de disparo de las protecciones (I_a'), para garantizar que estas eliminarán el defecto en el tiempo establecido, en el caso de que este se produjera.

$$I_d' = 241{,}6A \geq I_a'$$

Por otro lado, la intensidad máxima de defecto viene fijada por la compañía suministradora por un valor de 300 A, con lo cual se consigue además la limitación de la intensidad de defecto con un valor inferior al límite fijado.

3.3.8.12 Separación de las tierras de protección y de servicio.

Para garantizar que el sistema de puesta a tierra de servicio no alcance tensiones elevadas, que podrían afectar a las instalaciones interiores, en el caso de que se diese la disipación de un defecto, se debe establecer una separación entre las tierras de protección y de servicio.

Esta separación de tierras se hace para garantizar que la máxima diferencia de potencial entre el neutro de baja tensión del transformador y una tierra lejana sea de 1.000 V (valor fijado por el Método UBESA de cálculo de puesta a tierra en centros de transformación). Este valor es inferior al fijado por el REBT en la ITC-BT-18, que establece 1.200 V, por lo que el estudio se inclina hacia el lado de la seguridad.

Esta separación física de ambos sistemas hace que, además de separados, sean independientes.

Como la tensión de defecto supera el valor límite fijado de 1.000 V se tienen que disponer tierras separadas.

$$V_d' = 2.246{,}88V \geq 1.000V$$

El valor de esta separación es función tanto de la resistividad del terreno como de la intensidad de defecto, viniendo dada por la fórmula:

$$D \geq \frac{\rho \cdot I_d}{2 \cdot \pi \cdot U}$$

siendo U = 1.000 V, para sistemas de distribución del tipo TT, ρ la resistividad del terreno e I_d la intensidad de defecto a tierra en el lado de alta tensión, facilitado por la compañía suministradora. Sustituyendo valores:

$$D \geq \frac{100 \cdot 300}{2 \cdot \pi \cdot 1.000} = 4{,}77m$$

Se adopta una separación de 5 m, superior al límite fijado de 4,77 m.

3.3.8.13 Tierra de Servicio.

3.3.8.14 Resistencia de puesta a tierra de servicio.

El sistema de puesta a tierra de servicio se compone, según configuraciones editadas por UNESA, de 2 picas en hilera unidas por un cable horizontal de sección 50 mm^2, con una separación entre picas de 3 m y una longitud de las picas de 2 m. Las picas son de 14 mm de diámetro. Este sistema de puesta a tierra se sitúa enterrado a una profundidad de 0,5 m, en el exterior del centro de transformación, y a una distancia mínima de 5,00 m del sistema de puesta a tierra de protección. Esta distribución puede apreciarse con claridad en el PLANO 10 PUESTAS A TIERRA DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN.

Esta configuración es la conocida como 5/22 de UNESA, cuyos valores característicos son:

· Geometría: Picas en hilera.

· Profundidad del electrodo (m): 0.5.

· Número de picas: 2.

· Longitud de las picas (m): 2.

· Separación entre picas (m): 3.

Parámetros característicos del electrodo:

· De la resistencia, k_r (Ω/Ωxm) = 0,201

· k_p (V/(Ωm)A) = 0,0392

Teniendo en cuenta que los sistemas de tierra de protección y de servicio están separados una distancia de 5 m, el sistema de tierra de servicio está conectado el neutro del transformador y la tierra de los secundarios de los transformadores de tensión y de intensidad de la celda de medida, a través de un cable de cobre 0,6/1 kV aislado y en disposición bajo tubo.

Según ITC-BT-18, en su punto 9, cualquier masa no puede dar lugar a una tensión de contacto superior a 24V.

Considerando la situación más desfavorable de que los interruptores diferenciales tengan una sensibilidad de 650 mA, la resistencia máxima del sistema de puesta a tierra es:

$$V_{ts} = R_{ts} \cdot I_d$$

Sustituyendo el valor de I_d = 0,65 A y teniendo en cuenta que el valor máximo de la tensión es de 24 V, se obtiene el valor máximo de la resistencia como:

$$R_{ts} \leq \frac{V_{ts}}{I_d} = \frac{24}{0{,}65} = 37\Omega$$

3.3.8.15 Cálculo de la resistencia del electrodo.

La resistencia del electrodo no puede superar el valor de 37Ω, para que se cumplan las especificaciones adoptadas en el apartado 3.3.8.14.

El valor de la resistencia del electrodo viene dado por la fórmula:

$$R_{ts} = k_r \cdot \rho$$

kr = 0,201 (Ω/Ωm)
ρ = 100 Ωm (resistividad del terreno)

Sustituyendo estos valores se obtiene:

$$R_{ts} = 20{,}1\Omega$$

cumpliendo con la especificación anterior.

3.4 ESTUDIO DE LA TARIFICACIÓN ELÉCTRICA.

En el siguiente apartado se analizan las diferentes formas de facturar la energía eléctrica y elegir la que suponga una menor repercusión económica. Esto puede suponer el realizar incorporaciones de elementos eléctricos, en función de la tarifa eléctrica a contratar.

3.4.1 HIPÓTESIS DE CÁLCULO.

Al desconocer cuál será el consumo de energía mensual y el pico de potencia demandada, se tienen que realizar una serie de hipótesis que permitan justificar la tarifa adoptada. Estas hipótesis tratan de asemejarse lo mayor posible a la realidad.

Teniendo en cuenta las demandas de potencias de los diferentes receptores eléctricos de la E.D.A.R. y la simultaneidad de funcionamiento de los mismos (representados en la tabla de previsión de demanda, Tabla 1:), se puede estimar un consumo simultáneo y constante de 464,6 kWh. Este consumo es supuesto constante a lo largo de todas las horas del día, y de todos los días del año, ya que la E.D.A.R. dispone de elementos, como los depósitos de homogenización, que permiten a la instalación funcionar de forma continua y estable, independientemente del caudal de agua de entrada.

3.4.2 TARIFA ÓPTIMA.

Según los datos de consumo supuestos se tiene una potencia contratada de 465 kW. Esto requiere la instalación, por parte de la ENDESA de un maxímetro.

Según los datos publicados en el B.O.E., en el REAL DECRETO 1802/2003, de 26 de diciembre de 2003, por el que se establece la tarifa eléctrica para el año 2004, los términos de potencia y de energía, en función de la tarifa eléctrica correspondientes, son los siguientes (se han elegido solo los tipos de tarifa acordes con las características de la instalación):

TARIFA		Término de Potencia: T_p (€/kW y mes)	Término energía: T_e (€/kWh)
TARIFICACIÓN EN BAJA TENSIÓN	3.0 General	1,407620	0,082402
	4.0 General de larga utilización	2,248456	0,075301
TARIFICACIÓN EN ALTA TENSIÓN	1.1 General, de corta utilización, no superior a 36 kV	1,949492	0,065274
	2.1 General, de media utilización, no superior a 36 kV	4,011095	0,059544
	3.1 General, de larga utilización, no superior a 36 kV	10,650501	0,047959

Tabla 19: Cuadro de Tarifas.

Teniendo en cuenta los datos de la tabla anterior se podrá calcular la tarificación mensual dependiendo de cada tarifa, y según las hipótesis anteriores. Los resultados quedan reflejados en la siguiente tabla:

TARIFA		Importe mensual estimado (€/mes)
TARIFICACIÓN EN BAJA TENSIÓN	3.0 General	28.242,7329
	4.0 General de larga utilización	26.256,3068
TARIFICACIÓN EN ALTA TENSIÓN	1.1 General, de corta utilización, no superior a 36 kV	22.760,249
	2.1 General, de media utilización, no superior a 36 kV	21.800,4904

	3.1 General, de larga utilización, no superior a 36 kV	**21.009,1562**

Tabla 20: Resultados numéricos.

Como puede observarse la tarifa más económica es la tipo 3.1, tarificación en alta tensión, de larga utilización, con tensión no superior a 36 kV.

3.5 BATERÍA DE CONDENSADORES.

El consumo de potencia activa total simultáneo estimado de la instalación es de P = 465 kW, con un factor de potencia de cosφ = 0,77.

Esto supone una potencia reactiva total consumida por la instalación de:

$$Q_{consumida} = P \cdot \frac{sen\varphi}{\cos\varphi} = 465 \cdot \frac{0,638}{0,77} = 385,3kVAr$$

Se desea obtener un factor de potencia de valor próximo a 1. Esto supone un consumo total de energía reactiva cercano a 0.

Por lo tanto la potencia de la batería de condensadores a instalar será próxima, y a la alza, a la energía reactiva consumida calculada:

$$Q_{batería} = Q_{consumida} = 385,3kVAr$$

Por lo que se instalará una batería de condensadores de 390 kVAr.

3.5.1 Solución adoptada.

Se coloca una batería de condensadores de potencia próxima y superior a la calculada. En concreto es de 390 kVAr, del tipo Rectimac 2 estandar 400 V de Merlín Gerin, con regulación automática e interruptor automático, del tipo NS C801N de la serie Compact, incorporado. La conexión de los condensadores se realiza de forma automática.

Con la instalación de esta batería de condensadores se corregirá el factor de potencia al valor de la unidad.

3.5.2 Análisis de rentabilidad.

Para el análisis de rentabilidad se hacen una serie de hipótesis, en cuanto al consumo de energía, como pueden ser:

- Consumo de energía medio: 334.800 KWh/mes.
- Potencia contratada: $P_c = 465$ KW.

Se muestra a continuación la factura de la energía eléctrica mensual, según la tarifa óptima (3.1) calculada en el apartado 3.4.2 y las hipótesis de cálculo señaladas, sin tener la batería de condensadores instalada:

- Potencia facturada (P_f): $P_c = P_f = 465$ KW
- Facturación de potencia:

$$F_p = P_f \cdot T_p = 465(KW) \cdot 10{,}650501(€/\text{KW y mes}) = 4.952{,}48€$$

- Facturación de energía:

$$F_e = E \cdot T_e = 334.800(KWh) \cdot 0{,}047959(€/\text{KWh}) = 16.056{,}67€$$

- Facturación básica: $FB = F_p + F_e = 21.009{,}16€$
- Complementos:
  - Discriminación horaria: No hay (CH = 0).
  - Potencia reactiva:

$$\cos\varphi = 0{,}77$$

$$K_r = \frac{17}{\cos^2\varphi} - 21 = 7{,}673\%$$

$$K_r \cdot FB = 1.612€$$

$$Sub1 = FB + CH + K_r \cdot FB = 22.621{,}19€$$

- Impuesto de la electricidad: $IE = Sub1 \cdot 1{,}05113 \cdot (4{,}864\%) = 1.156{,}55€$
- Alquiler de equipos:
  - Contador de energía activa: 1,53€
  - Contador de energía reactiva: 1,71€
  - Contador de discriminación horaria: 0€ (no hay)
  - Contactor: 0€ (no hay)
  - Servicio reloj conmutador: 0€ (no hay)

  - Total AE: 3,24 €
- $Sub2 = Sub1 + IE + AE = 22.621{,}19 + 1.156{,}55 + 3{,}24 = 23.781€$
- IVA (16%): 3.804,96€
- TOTAL: $Sub2 + IVA = 27.585{,}95€$

Ahora se efectúa el cálculo de la factura de la energía eléctrica mensual, una vez instalada la batería de condensadores de 390 KVAr:

- Potencia facturada (P_f): $P_c = P_f = 465$ KW
- Facturación de potencia:

  $F_p = P_f \cdot T_p = 465(KW) \cdot 10{,}650501(€/\text{KW y mes}) = 4.952{,}48€$
- Facturación de energía:

  $F_e = E \cdot T_e = 334.800(KWh) \cdot 0{,}047959(€/\text{KWh}) = 16.056{,}67€$
- Facturación básica: $FB = F_p + F_e = 21.009{,}16€$
- Complementos:
  - Discriminación horaria: No hay (CH = 0).
  - Potencia reactiva:

    $\cos\varphi = 1$

    $K_r = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = -3\%$

    $K_r \cdot FB = -630{,}28€$

    $Sub1 = FB + CH + K_r \cdot FB = 20.378{,}88€$
- Impuesto de la electricidad: $IE = Sub1 \cdot 1{,}05113 \cdot (4{,}864\%) = 1.041{,}91€$
- Alquiler de equipos:
  - Contador de energía activa: 1,53€
  - Contador de energía reactiva: 1,71€
  - Contador de discriminación horaria: 0€ (no hay)
  - Contactor: 0€ (no hay)
  - Servicio reloj conmutador: 0€ (no hay)
  - Total AE: 3,24 €
- $Sub2 = Sub1 + IE + AE = 20.378{,}88 + 1.041{,}91 + 3{,}24 = 21.424{,}03€$

- IVA (16%): 3.427,84€
- TOTAL: $Sub2 + IVA = 24.851{,}87€$

La diferencia entre la factura mensual sin batería de condensadores y la factura mensual con batería de condensadores es:

$$\Delta = 27.585{,}95 - 24.851{,}87 = 2.734{,}08€$$

Teniendo en cuenta que la inversión inicial para instalar la batería de condensadores elegida es de 11.269,00 €, el periodo de amortización de esta batería de condensadores es:

$$Amortización = \frac{11.269{,}00€}{2.734{,}08€ / mes} = 4{,}12 meses$$

Por lo que se considera viable la instalación de la batería de condensadores, desde el punto de vista económico.

3.6 GRUPO ELECTRÓGENO.

En el presente estudio se consideran los equipos de proceso necesarios para permitir el funcionamiento de la planta en condiciones de emergencia; el alumbrado y las tomas de corriente necesarias para permitir las tareas de operación, mantenimiento y reparación de los equipos que pudiesen ser necesarias. Los servicios que se consideran deben ser alimentados en estado de emergencia y la suma de sus potencias es la siguiente:

DEMANDA DE POTENCIA EN ESTADO DE EMERGENCIA

INSTALACIÓN	Unidades	Pot./Ud.(kW)	Pot.Total(kW)	Simultaneidad	Pot.Real(kW)	Factor de Pot.	S Real(kVA)
PRETRATAMIENTO:							
Motor peine grueso:	1	3,0	3,0	0,25	0,8	0,70	1,1
Motor peine pequeño:	1	3,0	3,0	0,25	0,8	0,70	1,1
Cintas transportadoras:	3	2,0	6,0	0,25	1,5	0,70	2,1
Motosoplantes:	2	4,0	8,0	0,90	7,2	0,80	9,0
Bombas de extracción de arenas:	2	1,0	2,0	0,50	1,0	0,70	1,4
Bombas de recirculación:	2	1,0	2,0	0,25	0,5	0,60	0,8
Prensa:	1	10,0	10,0	0,25	2,5	0,70	3,6
Medidor de caudal de salida:	1						
DEPOSITO DE HOMOGENEIZACION:							
Impulsores helicoidales:	4	4,0	16,0	0,90	14,4	0,80	18,0
Aireadores:	4	4,3	17,2	0,90	15,5	0,75	20,6
Válvulas de regulación del caudal:	2	0,5	1,0	0,25	0,3	0,60	0,4
Medidor de nivel del agua (presiómetro):	1						
DECANTACIÓN PRIMARIA Y TAMIZADO DE FANGO PRIMARIO:							
Rasquetas de fondo:	2	5,0	10,0	1,00	10,0	0,80	12,5
Bombas de fangos a tamiz:	2	2,5	5,0	0,90	4,5	0,70	6,4
Bombas de fangos a mezclador:	2	1,4	2,8	0,90	2,5	0,70	3,6
Cinta para productos de rechazo:	1	5,0	5,0	0,25	1,3	0,60	2,1
REACTOR DE DESNITRIFICACIÓN:							
Impulsores helicoidales:	4	6,4	25,6	1,00	25,6	0,70	36,6
REACTORES SECUNDARIOS:							
Turbinas:							
Bombas de agua a desnitrificación:	2	3,6	7,2	1,00	7,2	0,70	10,3
DECANTADORES SECUNDARIOS:							
Rascadores de fondo y barrido de flotantes:	3	2,0	6,0	1,00	6,0	0,80	7,5
Bombas de impulsión de fangos a mezclador:	1	1,5	1,5	0,90	1,4	0,70	1,9
Bombas de impulsión de fangos a digestores:	2	11,0	22,0	0,85	18,7	0,80	23,4
Cintas tranportadoras de flotantes:	1	1,5	1,5	0,25	0,4	0,60	0,6
CLORACIÓN:							
Bomba:	1	4,7	4,7	0,90	4,2	0,70	6,0
MEZCLADO DE FANGOS:							
Mezclador de fangos:	1	4,5	4,5	0,90	4,1	0,80	5,1
Bomba de fangos a espesador:	1	1,1	1,1	0,90	1,0	0,70	1,4
ESPESADO DE FANGOS:							
Bomba de fangos a digestores:	2	3,1	6,2	0,50	3,1	0,65	4,8
DIGESTORES ANAEROBIOS:							
Bombas de recirculación:	2	10,1	20,2	0,85	17,2	0,80	21,5
ACONDICIONAMIENTO Y SECADO DE FANGOS:							
Bombas de extracción de fangos:	2	1,0	2,0	0,50	1,0	0,65	1,5
Motores deshidratadores de fangos:	2	4,5	9,0	0,50	4,5	0,80	5,6
Cintas transportadoras de fangos:	2	3,5	7,0	0,25	1,8	0,60	2,9
Bomba de polielectrolito:	1	1,3	1,3	0,50	0,7	0,70	0,9
VARIOS:							
Bomba de agua reutilizada:	1	8,0	8,0	0,25	2,0	0,75	2,7
Compresor de aire comprimido:	1	6,5	6,5	0,25	1,6	0,80	2,0
Edificio de explotación:	1	16,0	16,0	0,45	7,2	0,60	12,0
Iluminación:	1	18,1	18,1	0,80	14,5	0,60	24,1
TOTAL:	**62**	**3,9**	**259,4**	**0,71**	**184,6**	**0,73**	**252,3**

Tabla 21: Cuadro de Potencias en funcionamiento de emergencia

La potencia total demandada en estado de emergencia asciende a 252,3 kVA (184,6 kW con un factor de potencia de 0,73), pero teniendo en cuenta que el factor de potencia queda corregido a un valor de 1 gracias a la instalación de la batería de condensadores, la potencia corregida es de:

$$S_{grupo} = \frac{P}{F.P.} = \frac{184,6kW}{1} = 184,6kVA$$

La potencia total demanda por la instalación, en estado de emergencia será de 184,6 kVA, quedando así justificado el empleo de un grupo electrógeno de 200 kVA de potencia, a 400 V de tensión entre fases. La adopción de un grupo de tales características está basada en la elección del equipo de características mínimas técnicas necesarias para satisfacer la demanda energética de la instalación en estado de emergencia.

3.6.1 Cálculo de los cables de salida del grupo electrógeno.

Las líneas de baja tensión, de salida del grupo electrógeno, se dirigen hacia en cuadro general de baja tensión ubicado en el centro de transformación. Estos cables tendrán una longitud de 9 m, e irán de forma enterrada bajo tubo.

La intensidad nominal a la salida del grupo electrógeno viene dada por la siguiente expresión:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

donde:

I_n = Intensidad nominal, en A.

S = Potencia del grupo electrógeno, en VA

U_n = Tensión nominal entre fases, en V

Sustituyendo valores se obtiene:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{200.000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 288{,}68A$$

Se elige un cable de 3x150/70 mm^2 de Cobre, aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV, cuya intensidad máxima admisible bajo las condiciones de instalación expuestas es de 302 A, superior a la intensidad nominal.

La máxima caída de tensión que se produce en este tramo viene dada por:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm^2)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega \cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega \cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega \cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

SECCIÓN (mm2)	χ' (Ohm·mm2/m)	
	Cu	Al
1,5	0,00016	
2,5	0,00032	
4	0,00051	
6	0,00115	
10	0,00118	
16	0,00197	0,02199
25	0,00229	0,02202
35	0,00335	0,02322
50	0,00638	0,02755
70	0,00705	0,02726
95	0,00864	0,02875
120	0,01090	0,03053
150	0,01408	0,03429
185	0,01562	0,03520
240	0,02014	0,03862
300	0,02418	0,04439
400	0,03477	0,05401

Tabla 22: Valores de la reactancia de los cables en $\Omega \cdot mm^2/m$.

Sustituyendo valores se obtiene la caída de tensión en este tramo:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3} \cdot 268{,}68}{150} \cdot 9{,}00 \cdot (0{,}023 \cdot 1 + 0{,}01408 \cdot 0) = 0{,}64V$$

3.7 LÍNEAS GENERALES DE ALIMENTACIÓN EN BAJA TENSIÓN.

3.7.1 POTENCIAS DEMANDADAS.

Se calcula la potencia real de un tramo sumando la potencia instalada de los receptores que alimenta, y aplicando la simultaneidad adecuada y los coeficientes impuestos por el REBT. Entre estos últimos cabe destacar:

- Factor de **1'8** a aplicar en tramos que alimentan a puntos de luz con lámparas o tubos de descarga. (Instrucción **ITC-BT-09**, apartado 3 e Instrucción **ITC-BT 44**, apartado 3.1del **REBT**).
- Factor de **1'25** a aplicar en tramos que alimentan a uno o varios motores, y que afecta a la potencia del mayor de ellos. (Instrucción **ITC-BT-47**, apartado. 3 del **REBT**).

En la Tabla 1: se puede apreciar con detalle las potencias de los receptores de la instalación.

3.7.2 CÁLCULO DE INTENSIDADES.

Se determina la intensidad de circulación en los cables por aplicación de las siguientes expresiones:

- *Distribución monofásica:*

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fase y neutro (V)

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

- *Distribución trifásica:*

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

3.7.3 CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CABLE.

Para determinar la sección de los cables se utilizan tres métodos de cálculo distintos:

- Cálculo por intensidad máxima admisible.
- Cálculo por limitación de la caída de tensión.
- Cálculo por solicitación térmica en cortocircuito.

3.7.3.1 CÁLCULO DE LA SECCIÓN POR INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE.

Se aplica para el cálculo por intensidad máxima admisible lo expuesto en la norma **UNE 20.460-94/5-523.** La intensidad máxima que debe circular por un cable, para que éste no se deteriore, viene marcada por las tablas **52-C1** a **52-C14**, y **52-N1**. En función del método de instalación adoptado de la tabla **52-B2**, se determina el método de referencia según **52-B1**, que en función del tipo de cable se indica en la tabla de intensidades máximas que se ha de utilizar.

La intensidad máxima admisible se ve afectada por una serie de factores como son la temperatura ambiente, la agrupación de varios cables, la exposición al sol, etc. que generalmente reducen su valor. Se halla el factor por temperatura ambiente a partir de las tablas **52-D1** y **52-N2**. El factor por agrupamiento, de las tablas **52-E1**, **52-N3**, **52-N4 A** y **52-N4 B**. Si el cable está expuesto al sol, o bien, se trata de un cable con aislamiento mineral, desnudo y accesible, se aplica directamente un Factor de **0,9**. Si se trata de una instalación enterrada bajo tubo, se aplica un factor de **0,8** a los valores de la tabla **52-N1**.

Para determinar la intensidad máxima admisible del cable, se busca en la tabla la intensidad máxima admisible para la sección determinada, y se multiplica por el producto de los factores correctores. Para el cálculo de la sección por intensidad máxima admisible se busca en la tabla la sección correspondiente al cable de intensidad máxima admisible inmediatamente superior al valor de intensidad nominal de circulación por el cable, calculada.

3.7.3.2 CÁLCULO POR LIMITACIÓN DE LA CAIDA DE TENSIÓN.

Según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2, del REBT, el caso de la instalación eléctrica de la E.D.A.R. se trata de una instalación de un solo usuario alimentada directamente mediante un transformador propio. En este caso se considera el origen de la instalación la salida en baja tensión del transformador.

Este método de instalación permite limitar la caída de tensión en toda la instalación, desde el origen de la instalación hasta las bornas de conexión del receptor, a 4,50% para receptores de alumbrado y 6,50% para los demás usos, según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2.

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utilizan las siguientes fórmulas:

- *Distribución monofásica:*

$$\Delta U_m = \frac{2 \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_m = Caída de tensión simple, del tramo en V

S = Sección del cable (mm²)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega \cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega \cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega \cdot mm^2/m$ (este dato es

dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

- *Distribución trifásica:*

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm²)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega \cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega \cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega \cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

3.7.3.3 CÁLCULO POR SOLICITACIÓN TÉRMICA EN CORTOCIRCUITO.

De acuerdo con la Norma UNE 21.145 (Guía sobre la aplicación de los límites de temperatura de cortocircuito de los cables eléctricos de tensión nominal no superior a 0,6/1 kV), el valor máximo de la temperatura alcanzado por el conductor de un cable durante un cortocircuito de duración no superior a 5 segundos, en contacto con un aislamiento XLPE, es de 250ºC, y la fórmula de calentamiento adiabático aplicable a un cable de cobre o aluminio aislado con este material es:

$$I_k^{\,2} \cdot t = K^2 \cdot S^2$$

con K^2 = 20.473, para cables de cobre, y K^2 = 8.927, para cables de aluminio.

donde:

I_k es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito que permanece después de desaparecer los fenómenos transitorios iniciales (A)

t = tiempo de duración del cortocircuito en segundos (tiempo de actuación de las protecciones)

K = parámetro del cable (K^2 = 20.473, para cables de cobre, y K^2 = 8.927, para cables de aluminio, según UNE 21.145, para cables con aislamiento XLPE)

S = sección del cable (mm^2)

De esta ecuación se puede sacar la mínima sección del cable, para que aguante la intensidad máxima de cortocircuito:

$$S > \sqrt{\frac{I_k^{\,2} \cdot t}{K^2}}$$

3.7.4 DEMANDA DE POTENCIA.

Potencia instalada: se considera la potencia instalada como la suma de los consumos de todos los receptores de la instalación. En este caso, y según desglose detallado, asciende a **539,40 kW**.

A continuación se muestra la distribución de la potencia instalada en cada cuadro secundario de mando y protección:

- CARGA CUADRO 1 ..... 70.700,00 w
- CARGA CUADRO 2 ..... 26.300,00 w
- CARGA CUADRO 3 ..... 36.300,00 w
- CARGA CUADRO 4 ..... 54.800,00 w
- CARGA CUADRO 5 ..... 41.300,00 w
- REACTORES(1) ..... 140.000,00 w
- REACTORES(2) ..... 140.000,00 w
- CARGA EDIFICIO DE EXPLOTACIÓN ..... 30.000,00 w

Total ..... 539.400,00 w

3.7.5 CÁLCULOS DETALLADOS POR CIRCUITOS.

3.7.5.1 Circuito 1(1).

Datos de partida:

- Todos los tramos del circuito suman una longitud de 50,00 m.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito suman una potencia instalada de **140.000 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son 4 motores trifásicos, con arranque estrella-triángulo, de 35 kW cada uno, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 1(1) es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia (cualquiera de ellos, ya que los 4 motores son iguales), más la intensidad a plena carga del resto de motores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

La potencia total del circuito 1(1) viene dada por la suma del 125% de la potencia de un motor más la suma de las potencias del resto de los motores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1{,}25 \cdot 35{,}00 + (3 \cdot 35{,}00) = 148{,}75 kW$$

La intensidad nominal del circuito 1(1) es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{148.750}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 268{,}38 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{268{,}38}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 376{,}93 A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 240 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=430 A), **3x240/120mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 180 mm de diámetro**, tiene una intensidad máxima admisible de 306 A > I = 268,38 A.

Cálculo por Caída de tensión:

La caída de tensión acumulada más desfavorable del circuito se produce en su punto terminal a 50,00 metros de la cabecera del mismo. Dado que el circuito en cuestión se trata del circuito de alimentación de 4 motores, el límite del valor de la caída de tensión será de un 6,50% en las bornas de conexión a cada motor (según ITC-BT-19, en su punto 2.2.2.)

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm^2)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega\cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega\cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega\cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 1(1):

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 268{,}38\cdot 50{,}00}{240}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}8 + 0{,}03862\cdot 0{,}6) = 5{,}033V$$

Lo que supone un 1,26% de caída de tensión.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 1(1) y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido. Los puntos a estudiar son puntos representativos como la salida de baja tensión del transformador, el embarrado del cuadro general de baja tensión, y el punto de inicio y fin del circuito 1(1). Este estudio se lleva a cabo con aplicación de la Norma UNE 21.239-1994.

Las corrientes de cortocircuito en el lado de alta y baja tensión del transformador, fueron calculadas en los apartados 3.3.2.1 y 3.3.2.2, respectivamente, resultando valores de: I_{kQmax} = 19,25 kA e $I_{kmax} = I_{kmaxA}$ = 23,316 kA (la salida de baja tensión del transformador se denomina punto A).

Seguidamente se calcula la intensidad de cortocircuito en el embarrado del cuadro general de baja tensión (punto B):

$$Z_{AB} = R_{AB} + j \cdot X_{AB}$$

donde:

$$R_{AB} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{AB} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

En este caso se tiene, en el tramo de conexión de las bornas del trafo con el cuadro general de baja tensión, un tramo de 2 m de longitud formado por una terna de cables de 3x(3x240) / 2x240 mm^2 de Aluminio. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{AB} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34)\cdot 2}{3\cdot 240} = 8{,}17\cdot 10^{-5}\,\Omega$$

$$r = 1{,}14\cdot\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14\cdot\sqrt{\frac{3\cdot 240}{\pi}} = 17{,}26mm$$

$$X_{AB} = L\cdot 6{,}28\cdot 10^{-5}\cdot(\frac{0{,}25}{n} + \ln\frac{d}{r}) = 2\cdot 6{,}28\cdot 10^{-5}\cdot(\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}1}{17{,}26\cdot 10^{-3}})) = 2{,}52\cdot 10^{-4}\,\Omega$$

$$Z_{AB} = 8{,}17\cdot 10^{-5} + j\cdot 2{,}52\cdot 10^{-4}\,\Omega$$

$$Z_B = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} = 2{,}11\cdot 10^{-3} + j\cdot 0{,}0104\Omega$$

$$I_{kB\max} = \frac{C_{\max}\cdot U_n}{\sqrt{3}\cdot Z_B} = \frac{1{,}00\cdot 400}{\sqrt{3}\cdot(2{,}11\cdot 10^{-3} + j\cdot 0{,}0104)} = 4.327{,}10 - j\cdot 21.327{,}88A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{kBmax}/$ = 21,76 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi\cdot\sqrt{2}\cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98\cdot e^{(-3\cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98\cdot e^{(-3\cdot 2{,}11\cdot 10^{-3}/0{,}0104)} = 1{,}55$$

$$i_p = 1{,}55\cdot\sqrt{2}\cdot 21{,}76 = 47{,}70kA$$

El valor de I_{kBmax} calculado es el valor de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el lado de baja tensión (cortocircuito trifásico).

Una vez conocido el valor de I_{kBmax} se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 1(1). Para comprobar esta condición se aplica

$$S = 240mm^2 > \sqrt{\frac{I_{kB\max}{}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{21.760^2 \cdot 0{,}06}{8.927}} = 56{,}41mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones.

Se comprueba que este cable cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

3.7.5.2 Circuito 1(2).

Datos de partida:

- Todos los tramos del circuito suman una longitud de 50,00 m.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito suman una potencia instalada de **140.000 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son 4 motores trifásicos, con arranque estrella-triángulo, de 35 kW cada uno, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 1(2) es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia (cualquiera de ellos, ya que los 4 motores son iguales), más la intensidad a plena carga del resto de motores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

La potencia total del circuito 1(2) viene dada por la suma del 125% de la potencia de un motor más la suma de las potencias del resto de los motores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1{,}25 \cdot 35{,}00 + (3 \cdot 35{,}00) = 148{,}75 kW$$

La intensidad nominal del circuito 1(2) es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{148.750}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 268{,}38 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{268{,}38}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 376{,}93 A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 240 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=430 A), **3x240/120mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 180 mm de diámetro**, tiene una intensidad máxima admisible de 306 A > I = 268,38 A.

Cálculo por Caída de tensión:

La caída de tensión acumulada más desfavorable del circuito se produce en su punto terminal a 50,00 metros de la cabecera del mismo. Dado que el circuito en cuestión se trata del circuito de alimentación de 4 motores, el límite del valor de la caída de tensión será de un 6,50% en las bornas de conexión a cada motor (según ITC-BT-19, en su punto 2.2.2.)

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm²)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega\cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega\cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega\cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 1(2):

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 268{,}38\cdot 50{,}00}{240}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}8 + 0{,}03862\cdot 0{,}6) = 5{,}033V$$

Lo que supone un 1,26% de caída de tensión.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 1(2) y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido.

Conocido el valor de intensidad de cortocircuito I_{kmaxB}, calculado en el apartado 3.7.5.1 se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 1(2). Para comprobar esta condición se aplica

$$S = 240mm^2 > \sqrt{\frac{I_{kB\max}{}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{21.760^2 \cdot 0{,}06}{8.927}} = 56{,}41mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones. Se comprueba que este cable cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

3.7.5.3 Circuito 2.

Datos de partida:

- El circuito 2 es el circuito general de alimentación de los cuadros secundarios 1 y 2. A 72 m del origen de este circuito se divide en dos tramos de las mismas características que el tramo inicial:
    - Circuito 2(1), de 82 m de longitud, de alimentación del cuadro secundario 1.
    - Circuito 2(2), de 32 m de longitud, de alimentación del cuadro secundario 2.

  Esta distribución puede apreciarse con detalle en el PLANO 15, DISTRIBUCIÓN DE LOS CIRCUITOS 1(1), 1(2), 2, 3, 4 Y 5 Y UBICACIÓN DE LOS CUADROS SECUNDARIOS 1, 2, 3, 4, 5 Y EDIFICIO DE EXPLOTACIÓN.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.
- Al ser los tramos de igual sección, el límite por intensidad máxima admisible se encuentra en el tramo inicial, que es el que soporta mayor intensidad.
- El cálculo por caída de tensión se divide en tres partes: el tramo inicial y los dos tramos finales, sumando las caídas de tensión hasta obtener esta en los puntos finales, los cuadros secundarios de mando y protección 1 y 2.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito 2 suman una potencia instalada de **97.000 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son del tipo motores y receptores de alumbrado exterior, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 2 es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga del resto de motores y receptores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

- Motor de mayor potencia:

  El motor de mayor potencia conectado a este circuito es un motor de 10,0 kW, motor de prensa.

- Resto de receptores:

  El resto de receptores alimentados por este circuito suman una potencia de 87,00 kW.

La potencia total del circuito 2 viene dada por la suma del 125% de la potencia asociada al motor de mayor potencia más la suma de las potencias del resto de los receptores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 = 1{,}25 \cdot 10{,}00 + 87{,}00 = 99{,}50 kW$$

La intensidad nominal del circuito 2 es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{99.500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}76} = 188{,}97 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de

Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{188{,}97}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 265{,}40A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 120 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=295 A), 3x120/70mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 160 mm de diámetro, tiene una intensidad máxima admisible de 210 A > I = 188,97 A.

Cálculo por Caída de tensión:

- Tramo inicial:

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm²)

r' = resistividad del material cable (0,023 Ω·mm^2/m, para el Cobre, 0,036 Ω·mm^2/m para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega \cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el tramo inicial del circuito 2:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3} \cdot 188{,}97 \cdot 72}{120} \cdot (0{,}036 \cdot 0{,}76 + 0{,}03053 \cdot 0{,}65) = 9{,}27V$$

Lo que supone un 2,32% de caída de tensión.

- **Tramo del Circuito 2(1), alimentación de Cuadro Secundario 1:**

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 2(1):

El cuadro secundario 1 cuenta con una serie de receptores con una potencia total de 74,7 kW y un factor de potencia de 0,76. El receptor de mayor potencia es un motor de 10,0 kW. La potencia del circuito 2(1) se obtiene según:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 = 1{,}25 \cdot 10{,}00 + 64{,}70 = 77{,}20kW$$

La intensidad nominal del circuito 2(1) viene dada por:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{77.200}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}76} = 146{,}62A$$

La caída de tensión es este tramo viene dada por:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 146{,}62\cdot 82}{120}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}76 + 0{,}03053\cdot 0{,}65) = 8{,}19V$$

Sumando esta caída de tensión al tramo inicial se tiene un total de 17,46 V, lo que supone un 4,37% de caída de tensión.

Los receptores asociados al cuadro secundario 1 son del tipo motor y alumbrado. La máxima caída de tensión asociada a receptores de alumbrado es de 4,50 %, medida desde la salida de baja tensión del tranformador, según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2. Como la caída de tensión calculada está próxima al límite fijado, y los receptores de alumbrado están alimentados mediante líneas que parten del cuadro secundario 1, en las que se produce otra caída de tensión, se considera necesario el aumento de la sección de la línea de alimentación a este cuadro secundario en la medida en que el valor de la caída de tensión en este no supere el 3,50 %. Por ello se hace necesario un nuevo cálculo, en función de la caída de tensión, de los conductores del circuito 2.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto **3x150/70 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.**

Tramo inicial:

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi)$$

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el tramo inicial del circuito 2:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 188{,}97\cdot 72}{150}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}76 + 0{,}03429\cdot 0{,}65) = 7{,}80V$$

Lo que supone un 1,95% de caída de tensión.

- **Tramo del Circuito 2(1), alimentación de Cuadro Secundario 1:**

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 2(1):

La caída de tensión es este tramo viene dada por:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 146{,}62\cdot 82}{150}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}76 + 0{,}03429\cdot 0{,}65) = 6{,}89V$$

Sumando esta caída de tensión al tramo inicial se tiene un total de 14,69 V, lo que supone un 3,67% de caída de tensión.

- **Tramo del Circuito 2(2), alimentación de Cuadro Secundario 2:**

El cuadro secundario 2 cuenta con una serie de receptores con una potencia total de 26,3 kW y un factor de potencia de 0,76. El receptor de mayor potencia es un motor de 5,0 kW. La potencia de cálculo asociada al tramo circuito 2(2) es:

$$P = 1{,}25\cdot P_1 + P_2 = 1{,}25\cdot 5{,}00 + 21{,}30 = 27{,}55kW$$

La intensidad nominal del circuito 2(2) viene dada por:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\cdot U\cdot\cos\varphi} = \frac{27.550}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}76} = 52{,}32A$$

La caída de tensión es este tramo viene dada por:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 52{,}32\cdot 32}{150}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}76 + 0{,}03429\cdot 0{,}65) = 0{,}96V$$

Sumando esta caída de tensión al tramo inicial se tiene un total de 8,76 V, lo que supone un 2,19% de caída de tensión.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 2 y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido.

Conocido el valor de intensidad de cortocircuito I_{kmaxB}, calculado en el apartado 3.7.5.1 se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 2. Para comprobar esta condición se aplica:

$$S = 150mm^2 > \sqrt{\frac{I_{kB\max}{}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{21.760^2 \cdot 0{,}06}{8.927}} = 56{,}41mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones. Se comprueba que este cable cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

3.7.5.4 Circuito 3.

Datos de partida:

- Todos los tramos del circuito suman una longitud de 50,00 m.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito 3 suman una potencia instalada de **36.300 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son del tipo motores y receptores de alumbrado exterior, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 3 es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga del resto de motores y receptores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

- Motor de mayor potencia:

  El motor de mayor potencia conectado a este circuito es un motor de 6,40 kW, motor de impulsor helicoidal.

- Resto de receptores:

  El resto de receptores alimentados por este circuito suman una potencia de 29,90 kW.

La potencia total de cálculo asociada al circuito 3 viene dada por la suma del 125% de la potencia asociada al motor de mayor potencia más la suma de las potencias del resto de los receptores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 = 1{,}25 \cdot 6{,}40 + 29{,}90 = 37{,}90 kW$$

La intensidad nominal del circuito 3 es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{37.900}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}70} = 78{,}15 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{78{,}15}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 109{,}76 A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 25 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=125 A), 3x25/16mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 90 mm de diámetro, tiene una intensidad máxima admisible de 89 A > I = 78,15 A.

Cálculo por Caída de tensión:

La caída de tensión acumulada más desfavorable del circuito se produce en su punto terminal a 50,00 metros de la cabecera del mismo.

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm^2)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega\cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega\cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega\cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 3:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 78{,}15\cdot 50{,}00}{25}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}7 + 0{,}02202\cdot 0{,}71) = 11{,}054V$$

Lo que supone un 2,76% de caída de tensión.

Los receptores asociados al cuadro secundario 3, alimentados por el circuito 3, son del tipo motor y alumbrado. La máxima caída de tensión asociada a receptores de alumbrado es de 4,50 %, medida desde la salida de baja tensión del tranformador, según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2. Como los receptores de alumbrado están alimentados mediante líneas que parten del cuadro secundario 3, en las que se produce otra caída de tensión, se considera necesario el aumento de la sección de la línea de alimentación a estos cuadros secundarios en la medida en que el valor de la caída de tensión en estos no supere el 2,00 %, dado que las líneas de alimentación de los equipos de alumbrado son lo suficientemente largas como para que se produzcan en ellas una caída de tensión importante. Por ello se hace necesario un nuevo cálculo, en función de la caída de tensión, de los conductores del circuito 3.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x35/16 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 3:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 78{,}15\cdot 50{,}00}{35}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}7 + 0{,}02322\cdot 0{,}71) = 8{,}061V$$

Lo que supone un 2,02% de caída de tensión.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x50/25 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 3:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 78{,}15\cdot 50{,}00}{50}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}7 + 0{,}02755\cdot 0{,}71) = 6{,}06V$$

Lo que supone un 1,51% de caída de tensión. Adoptando este conductor, según el cálculo por caída de tensión.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 3 y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido.

Conocido el valor de intensidad de cortocircuito I_{kmaxB}, calculado en el apartado 3.7.5.1 se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 3. Para comprobar esta condición se aplica

$$S = 50mm^2 < \sqrt{\frac{{I_{kB\max}}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{21.760^2 \cdot 0,06}{8.927}} = 56,41mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones. Se comprueba que este cable no cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

Este cable no sería capaz de soportar una intensidad de cortocircuito del valor indicado durante 60 ms, por lo que habrá que recurrir a la elección de un conductor de sección inmediatamente superior, y además, superior a 59,24 mm^2 de Aluminio. Este cable es el **3x70/35 mm^2 Al RV 0,6/1 kV, bajo tubo de PVC de 125 mm de diámetro enterrado**, cuya intensidad máxima admisible en estas condiciones es 156,64 A > I = 78,15 A.

Se procede de nuevo al cálculo de caída de tensión en el tramo:

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 3:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3} \cdot 78,15 \cdot 50,00}{70} \cdot (0,036 \cdot 0,7 + 0,02726 \cdot 0,71) = 4,31V$$

Lo que supone un 1,08% de caída de tensión. Adoptando este conductor, según el cálculo por caída de tensión.

3.7.5.5 Circuito 4.

Datos de partida:

- Todos los tramos del circuito suman una longitud de 70,00 m.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito 4 suman una potencia instalada de **84.800 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son del tipo motores, receptores de alumbrado exterior y el Edificio de Explotación, con receptores de alumbrado y fuerza, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 4 es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga del resto de motores y receptores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

- Motor de mayor potencia:

  El motor de mayor potencia conectado a este circuito es un motor de 10,10 kW, motor de bomba de recirculación.

- Resto de receptores:

  El resto de receptores alimentados por este circuito suman una potencia de 74,70 kW.

La potencia total de cálculo asociada al circuito 4 viene dada por la suma del 125% de la potencia asociada al motor de mayor potencia más la suma de las potencias del resto de los receptores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 = 1{,}25 \cdot 10{,}10 + 74{,}70 = 87{,}33 kW$$

La intensidad nominal del circuito 4 es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{87.330}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}77} = 163{,}70 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{163{,}70}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 229{,}92 A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 95 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=260 A), 3x95/50mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 140 mm de diámetro, tiene una intensidad máxima admisible de 185,12 A > I = 163,70 A.

Cálculo por Caída de tensión:

La caída de tensión acumulada más desfavorable del circuito se produce en su punto terminal, a la entrada del cuadro secundario 4, a 70,00 metros de la cabecera del mismo.

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm^2)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega\cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega\cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega\cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 4:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 163{,}70\cdot 70{,}00}{95}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}77 + 0{,}02875\cdot 0{,}64) = 9{,}64V$$

Lo que supone un 2,41% de caída de tensión.

Los receptores asociados al cuadro secundario 4, son del tipo motor, alumbrado exterior y alimentación del Edificio de Explotación. La máxima caída de tensión asociada a receptores de alumbrado es de 4,50 %, medida desde la salida de baja tensión del tranformador, según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2. Como los receptores de alumbrado están alimentados mediante líneas que parten del cuadro secundario 4, en las que se produce otra caída de tensión, se considera necesario el aumento de la sección de la línea de alimentación a estos cuadros secundarios en la medida en que el valor de la caída de tensión en estos no supere el 2,00 %, dado que las líneas de alimentación de los equipos de alumbrado son lo suficientemente largas como para que se produzcan en ellas una caída de tensión importante. Por ello se hace necesario un nuevo cálculo, en función de la caída de tensión, de los conductores del circuito 4.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x120/70 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 4:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 163{,}70\cdot 70{,}00}{120}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}77 + 0{,}03053\cdot 0{,}64) = 7{,}82V$$

Lo que supone un 1,95% de caída de tensión.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 4 y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido.

Conocido el valor de intensidad de cortocircuito I_{kmaxB}, calculado en el apartado 3.7.5.1 se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 3. Para comprobar esta condición se aplica

$$S = 120mm^2 > \sqrt{\frac{I_{kB\max}{}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{21.760^2 \cdot 0{,}06}{8.927}} = 56{,}41mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones. Se comprueba que este cable cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

El cable calculado es el **3x120/70 mm^2 Al RV 0,6/1 kV, bajo tubo de PVC de 160 mm de diámetro enterrado**, cuya intensidad máxima admisible en estas condiciones es 210,04 A > I = 163,70 A.

3.7.5.6 Circuito 4 (Edificio de Explotación).

Datos de partida:

- Todos los tramos del circuito suman una longitud de 32,00 m.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito 4(E.E.) suman una potencia instalada de **30.000 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son del tipo receptores de alumbrado exterior y receptores del Edificio de Explotación, con receptores de alumbrado y fuerza, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 4(E.E.) es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga del resto de motores y receptores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

- Motor de mayor potencia:

  El motor de mayor potencia conectado a este circuito es un motor de 5,00 kW, motor de aire acondicionado.

- Resto de receptores:

  El resto de receptores alimentados por este circuito suman una potencia de 25,00 kW.

La potencia total de cálculo asociada al circuito 4(E.E.) viene dada por la suma del 125% de la potencia asociada al motor de mayor potencia más la suma de las potencias del resto de los receptores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 = 1{,}25 \cdot 5{,}00 + 25{,}00 = 31{,}25 kW$$

La intensidad nominal del circuito 4(E.E.) es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{31.250}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}80} = 56{,}38 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{56{,}38}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 79{,}20A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 16 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=97 A), 3x16/10mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 63 mm de diámetro, tiene una intensidad máxima admisible de 69,06 A > I = 56,38 A.

Cálculo por Caída de tensión:

La caída de tensión acumulada más desfavorable del circuito se produce en su punto terminal, a la entrada del cuadro secundario del Edificio de Explotación, a 32,00 metros de la cabecera del cuadro secundario 4.

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{S} \cdot (r' \cdot \cos\varphi + \chi' \cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm^2)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega \cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega \cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega \cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 4(E.E.):

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 56{,}38\cdot 32{,}00}{16}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}80 + 0{,}02199\cdot 0{,}60) = 8{,}20V$$

Lo que supone un 2,05% de caída de tensión, en este tramo. Sumando esta caída de tensión a la calculada en el circuito 4 se tiene una caída de tensión total, en la entrada del cuadro secundario del Edificio de Explotación de: 7,82 V + 8,20 V = 16,02 V, lo que supone un 4,01 %.

Los receptores asociados al cuadro secundario de Edificio de Explotación, son del tipo motor, alumbrado y demás receptores del Edificio de Explotación. La máxima caída de tensión asociada a receptores de alumbrado es de 4,50 %, medida desde la salida de baja tensión del tranformador, según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2. Como los receptores de alumbrado están alimentados mediante líneas que parten del cuadro secundario de Edificio de Explotación, en las que se produce otra caída de tensión, se considera necesario el aumento de la sección de la línea de alimentación de este cuadro secundario en la medida en que el valor de la caída de tensión en este no supere el 1,00 %. Por ello se hace necesario un nuevo cálculo, en función de la caída de tensión, de los conductores del circuito 4(E.E.).

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x25/16 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 4(E.E.):

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 56{,}38\cdot 32{,}00}{25}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}80 + 0{,}02202\cdot 0{,}60) = 5{,}25V$$

Que sumado a la caída de tensión del circuito 4 (7,82 V) supone un 3,27% de caída de tensión.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x35/16 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 4(E.E.):

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 56{,}38\cdot 32{,}00}{35}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}80 + 0{,}02322\cdot 0{,}60) = 3{,}82V$$

Que sumado a la caída de tensión del circuito 4 (7,82 V) supone un 2,77% de caída de tensión. Por lo que se determina del cálculo un cable de **3x35/16 mm2 de Al RV 0,6/1 kV, bajo tubo de PVC de 90 mm de diámetro, enterrado**. La intensidad máxima edmisible de este cable en estas condiciones es de 106,80 A > I = 56,38 A.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 4(E.E.) y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido. Para realizar el estudio del comportamiento del cable ante una intensidad de cortocircuito se tiene que calcular el valor de la máxima intensidad de cortocircuito que se pueda producir en este cable, es decir, se tiene que proceder a calcular la máxima intensidad de cortocircuito en el cuadro secundario 4, desde donde parte el circuito 4(E.E.). Este punto se denominará Punto 4. Este estudio se lleva a cabo con aplicación de la Norma UNE 21.239-1994.

Del apartado 3.7.5.1 se tiene que la impedancia en el punto B (Cuadro general de baja tensión) es:

$$Z_B = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} = 2{,}11\cdot 10^{-3} + j\cdot 0{,}0104\Omega$$

Seguidamente se calcula la impedancia del tramo del circuito 4 (Z_{B4}):

$$Z_{B4} = R_{B4} + j\cdot X_{B4}$$

donde:

$$R_{B4} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B4} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

En este caso se tiene, en el tramo de circuito 4, un tramo de 70 m de longitud formado por un cable de 3x120/70 mm^2 de Aluminio. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B4} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 70}{120} = 0{,}01716\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{120}{\pi}} = 7{,}046mm$$

$$X_{B4} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 70 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{7{,}046 \cdot 10^{-3}})) = 2{,}64 \cdot 10^{-3}\Omega$$

$$Z_{B4} = 0{,}01716 + j \cdot 2{,}64 \cdot 10^{-3}\Omega$$

$$Z_4 = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B4} = (2{,}11 \cdot 10^{-3} + 0{,}01716) + j \cdot (0{,}0104 + 2{,}64 \cdot 10^{-3}) = 0{,}01927 + j \cdot 0{,}01304\Omega$$

$$I_{k4\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_4} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0{,}01927 + j \cdot 0{,}01304)} = 8.225{,}91 - j \cdot 5.562{,}67 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k4max}/$ = 9,93 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}01927 / 0{,}01304)} = 1{,}032$$

$$i_p = 1{,}032 \cdot \sqrt{2} \cdot 9{,}93 = 14{,}49 kA$$

El valor de I_{k4max} calculado es el valor de cortocircuito permanente máximo que podrá darse (cortocircuito trifásico).

Una vez conocido el valor de I_{k4max} se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 4(E.E.). Para comprobar esta condición se aplica

$$S = 35 mm^2 > \sqrt{\frac{{I_{k4\max}}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{9.930^2 \cdot 0{,}06}{8.927}} = 25{,}74 mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones.

Se comprueba que este cable cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

3.7.5.7 Circuito 5.

Datos de partida:

- Todos los tramos del circuito suman una longitud de 193,00 m.
- El cable empleado y su instalación siguen la referencia RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo.
- Los cables están distribuidos en 3F+N con 1 cable por fase.
- La tensión entre hilos activos es de 400 V.

Potencias:

- Todos los receptores alimentados por el circuito 5 suman una potencia instalada de **41.300 W**.
- Los receptores que alimenta este circuito son del tipo motores y receptores de alumbrado exterior, por lo que la intensidad mínima prevista en el circuito 5 es la suma del 125% de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga del resto de motores y receptores (según ITC-BT-47, punto 3.2, REBT).

Cálculo por Intensidad Máxima Admisible:

En función de la potencia de cálculo, y utilizando la fórmula siguiente, se obtiene la intensidad de cálculo, o máxima prevista, que resulta ser:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

siendo:

U = Tensión entre fases (V).

P = Potencia (W)

I = Intensidad de corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

- Motor de mayor potencia:

  El motor de mayor potencia conectado a este circuito es un motor de 11,00 kW, motor de bomba de impulsión de fangos.

- Resto de receptores:

  El resto de receptores alimentados por este circuito suman una potencia de 30,30 kW.

La potencia total de cálculo asociada al circuito 5 viene dada por la suma del 125% de la potencia asociada al motor de mayor potencia más la suma de las potencias del resto de los receptores:

$$P = 1{,}25 \cdot P_1 + P_2 = 1{,}25 \cdot 11{,}00 + 30{,}30 = 44{,}05 kW$$

La intensidad nominal del circuito 5 es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{44.500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}78} = 81{,}51 A$$

En función de la intensidad total calculada, del tipo de cable elegido (cables unipolares de Aluminio con aislamiento XLPE, RV 0,6/1 kV) y del método de instalación empleado (cables bajo tubo enterrado) se determina la sección de los cables por intensidad máxima admisible, debiendo cumplir la condición de que la intensidad de circulación por estos cables es menor a la intensidad máxima admisible de los mismos.

Según la tabla 52-N1, col.3 Al y los factores correctores que la norma UNE 20.460 especifica para este tipo de configuración de cable y montaje (0,80 por ir bajo tubo, 0,89 considerando la temperatura del terreno de 40ºC (caso más desfavorable)), la intensidad máxima admisible del circuito para la sección determinada debe ser superior a la intensidad de circulación entre los factores correctores:

$$I_{\max adm} > \frac{I}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = \frac{81{,}51}{0{,}8 \cdot 0{,}89} = 114{,}49 A$$

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07 del REBT, el cable con intensidad máxima admisible superior a la calculada es el de sección 25 mm^2 de Aluminio (I_{maxadm}=125 A), 3x25/16mm^2 Al RV 0,6/1 kV, que bajo tubo enterrado de 90 mm de diámetro, tiene una intensidad máxima admisible de 89 A > I = 81,51 A.

Cálculo por Caída de tensión:

La caída de tensión acumulada más desfavorable del circuito se produce en su punto terminal a 193,00 metros de la cabecera del mismo.

Para ejecutar el cálculo de las caídas de tensión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi)$$

siendo:

ΔU_T = Caída de tensión compuesta, del tramo en V

S = Sección del cable (mm^2)

r' = resistividad del material cable (0,023 $\Omega\cdot mm^2/m$, para el Cobre, 0,036 $\Omega\cdot mm^2/m$ para el Aluminio, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE)

χ' = valor de la reactancia del cable en $\Omega\cdot mm^2/m$ (este dato es dependiente de la sección del conductor y viene dado, a temperatura máxima de servicio permanente, 90ºC para XLPE, por la Tabla 22:)

L = Longitud del tramo en m

I = Intensidad nominal (A)

φ = ángulo de desfase entre tensión e intensidad

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 3:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 81{,}51\cdot 193{,}00}{25}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}78 + 0{,}02202\cdot 0{,}63) = 45{,}72V$$

Lo que supone un 11,43% de caída de tensión.

Los receptores asociados al cuadro secundario 5, alimentados por el circuito 5, son del tipo motor y alumbrado exterior. La máxima caída de tensión asociada a receptores de alumbrado es de 4,50 %, medida desde la salida de baja tensión del tranformador, según la ITC-BT-19, en su punto 2.2.2. Como los receptores de alumbrado están alimentados mediante líneas que parten del cuadro secundario 5, en las que se produce otra caída de tensión, se considera necesario el aumento de la sección de la línea de alimentación a este cuadro secundario en la medida en que el valor de la caída de tensión en este no supere el 3,30 %, dado que las líneas de alimentación de los equipos de alumbrado son lo suficientemente largas como para que se produzcan en ellas una caída de tensión importante. Por ello se hace necesario un nuevo cálculo, en función de la caída de tensión, de los conductores del circuito 5.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x70/35 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 5:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 81{,}51\cdot 193{,}00}{70}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}78 + 0{,}02726\cdot 0{,}63) = 17{,}62V$$

Lo que supone un 4,40% de caída de tensión.

Se realizan de nuevo los cálculos con un conductor de sección superior, en concreto 3x95/50 mm^2 Al RV 0,6/1 kV.

Sustituyendo valores se obtiene el valor de la caída de tensión en el circuito 5:

$$\Delta U_T = \frac{\sqrt{3}\cdot I\cdot L}{S}\cdot(r'\cdot\cos\varphi + \chi'\cdot sen\varphi) = \frac{\sqrt{3}\cdot 81{,}51\cdot 193{,}00}{95}\cdot(0{,}036\cdot 0{,}78 + 0{,}02875\cdot 0{,}63) = 13{,}25V$$

Lo que supone un 3,30% de caída de tensión.

Cálculo por Intensidad máxima de cortocircuito:

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el circuito 5 y se comprueba si los valores calculados son soportados por el cable elegido.

Conocido el valor de intensidad de cortocircuito I_{kmaxB}, calculado en el apartado 3.7.5.1 se procede a comprobar que se cumple la solicitación térmica ante un cortocircuito por parte del cable elegido en el circuito 5. Para comprobar esta condición se aplica

$$S = 95mm^2 > \sqrt{\frac{I_{kB\max}{}^2 \cdot t}{K^2}} = \sqrt{\frac{21.760^2 \cdot 0{,}06}{8.927}} = 56{,}41mm^2$$

Siendo la duración de duración de la falta 60 ms, tiempo de actuación de las protecciones. Se comprueba que este cable cumple con la condición de solicitación térmica ante cortocircuito.

Se comprueba que este cable sería capaz de soportar una intensidad de cortocircuito del valor indicado durante 60 ms, por lo que se adopta el valor calculado. Este cable es el **3x95/50 mm^2 Al RV 0,6/1 kV, bajo tubo de PVC de 140 mm de diámetro enterrado**, cuya intensidad máxima admisible en estas condiciones es 185,12 A > I = 81,51 A.

3.7.5.8 CUADROS RESUMEN DE LÍNEAS GENERALES DE ALIMENTACIÓN.

Circuito	Método de Instalación	L_{tot}	L_{cdt}	U_n	P_{cal}	I_n	I_{max}	Sección	Cdt
CIRCUITO 1(1)	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	50	50	400	140,00	268,38	306,00	(3×240/120)mm²Al RV 0,6/1kV bajo tubo=180mm	1,26
CIRCUITO 1(2)	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	50	50	400	140,00	268,38	306,00	(3×240/120)mm²Al RV 0,6/1kV bajo tubo=180mm	1,26
CIRCUITO 2	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	72	72	400	97,00	188,97	235,00	(3×150/70)mm²Al RV 0,6/1kV bajo tubo=180mm	1,95
CIRCUITO 2(1)	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	82	154	400	74,70	146,62	235,00	(3×150/70)mm²Al RV 0,6/1kV bajo tubo=180mm	3,67
CIRCUITO 2(2)	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	32	104	400	26,30	52,32	235,00	(3×150/70)mm²Al RV 0,6/1kV bajo tubo=180mm	2,19
CIRCUITO 3	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	50	50	400	36,30	78,15	156,64	(3×70/35)mm²Al bajo tubo=125mm	1,08
CIRC UITO 4	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	70	70	400	84,80	163,70	210,04	(3×120/70)mm²Al bajo tubo=160mm	1,95
CIRCUITO 4 (EDIF. EXPL.)	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	32	32	400	30,00	56,38	106,80	(3×35/16)mm²Al bajo tubo=90mm	2,77
CIRCUITO 5	RV 0,6/1 kV Al Enterrado bajo tubo	193	193	400	41,30	81,51	185,12	(3×95/50)mm²Al RV 0,6/1kV bajo tubo=140mm	3,30

Tabla 23: Cuadro resumen de las Líneas Generales de Alimentación.

donde:

L_{tot} = Longitud total del circuito, en metros.

L_{cdt} = Longitud hasta el receptor con la caída de tensión más desfavorable, en metros.

U_n = Tensión de línea, en voltios.

P_{cal} = Potencia del circuito, en kW.

I_n = Intensidad de cálculo, en amperios.

$I_{máx}$ = Intensidad máxima admisible, en amperios.

Sección = Sección elegida.

Cdt = Caída de tensión acumulada en el receptor más desfavorable (%).

3.7.6 LÍNEAS DE ALIMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS.

En la Tabla 24: se muestra el cuadro resumen de los cálculos eléctricos de las líneas de alimentación de los equipos.

CUADRO 1						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO DE PEINE GRUESO	18,59	3.750	6,77	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,92
CIRCUITO DE PEINE PEQUEÑO	16,02	3.750	6,77	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,89
CIRCUITO DE CINTA TRANSPORTADORA 1	12,55	2.500	4,51	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,78
CIRCUITO DE CINTA TRANSPORTADORA 2	11,23	2.500	4,51	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,77
CIRCUITO DE CINTA TRANSPORTADORA 3	24,75	2.500	4,51	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,90
CIRCUITO DE MOTOSOPLANTE 1	9,78	5.000	9,02	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,85
CIRCUITO DE MOTOSOPLANTE 2	5,75	5.000	9,02	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,78
CIRCUITO DE BOMBA DE EXTRACCIÓN DE ARENAS 1	18,28	1.250	2,26	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,75
CIRCUITO DE BOMBA DE EXTRACCIÓN DE ARENAS 2	10,6	1.250	2,26	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,72
CIRCUITO DE BOMBA DE RECIRCULACIÓN 1	18,67	1.250	2,26	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,76
CIRCUITO DE BOMBA DE RECIRCULACIÓN 2	16,37	1.250	2,26	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,74
CIRCUITO DE PRENSA	12,63	12.500	22,55	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,06
CIRCUITO DE	20,96	5.000	9,02		(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,05

IMPULSOR HELICOIDAL 1				34		
CIRCUITO DE IMPULSOR HELICOIDAL 2	31,81	5.000	9,02	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,25
CIRCUITO DE IMPULSOR HELICOIDAL 3	19,62	5.000	9,02	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,03
CIRCUITO DE IMPULSOR HELICOIDAL 4	29,7	5.000	9,02	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,21
CIRCUITO DE AIREADOR 1	21,83	5.375	9,7	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,10
CIRCUITO DE AIREADOR 2	32,67	5.375	9,7	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,31
CIRCUITO DE AIREADOR 3	20,48	5.375	9,7	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,07
CIRCUITO DE AIREADOR 4	30,55	5.375	9,7	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	4,27
CIRCUITO DE VÁLVULA DE REGULACIÓN 1	36,82	625	1,13	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,75
CIRCUITO DE VÁLVULA DE REGULACIÓN 2	36,93	625	1,13	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,75

CUADRO 2						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**In (A)**	**Imax (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO DE RASQUETAS DE FONDO 1	27,62	6.250	11,28	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,62
CIRCUITO DE RASQUETAS DE FONDO 2	27,79	6.250	11,28	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,62
CIRCUITO DE BOMBAS DE FANGO A	27,81	3.125	5,64	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,41

TAMIZ 1						
CIRCUITO DE BOMBAS DE FANGO A TAMIZ 2	27,8	3.125	5,64	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,41
CIRCUITO DE BOMBAS DE FANGO A MEZCLADOR 1	29,24	1.750	3,16	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,32
CIRCUITO DE BOMBAS DE FANGO A MEZCLADOR 2	28,13	1.750	3,16	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,31
CIRCUITO DE CINTA PARA PRODUCTOS DE RECHAZO	19,87	6.250	11,28	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,50

CUADRO 3

Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO DE TURBINA 1	41,96	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,10
CIRCUITO DE TURBINA 2	29,87	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,86
CIRCUITO DE TURBINA 3	42,31	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,10
CIRCUITO DE TURBINA 4	29,92	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,86
CIRCUITO DE TURBINA 5	39,88	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,05
CIRCUITO DE TURBINA 6	28,20	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,82
CIRCUITO DE TURBINA 7	39,96	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,06
CIRCUITO DE TURBINA 8	27,46	43.750	78,93	131	(4×35)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,81
CIRCUITO DE IMPULSOR HELICOIDAL 1	49,03	8.000	14,43	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,05
CIRCUITO DE	39,49	8.000	14,43		(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,87

IMPULSOR HELICOIDAL 2				44		
CIRCUITO DE IMPULSOR HELICOIDAL 3	38,04	8.000	14,43	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,84
CIRCUITO DE IMPULSOR HELICOIDAL 4	49,43	8.000	14,43	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,06
CIRCUITO DE BOMBAS DE AGUA A DESNITRIFICACIÓN 1	37,41	4.500	8,12	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,50
CIRCUITO DE BOMBAS DE AGUA A DESNITRIFICACIÓN 2	39,01	4.500	8,12	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	1,52

CUADRO 4

Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO DE MEZCLADOR DE FANGOS	23,12	5.625	10,15	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,27
CIRCUITO DE BOMBA DE FANGOS A ESPESADOR	30,82	1.375	2,48	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,06
CIRCUITO DE BOMBA DE FANGOS A DIGESTORES 1	34,53	3.875	6,99	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,28
CIRCUITO DE BOMBA DE FANGOS A DIGESTORES 2	31,96	3.875	6,99	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,26
CIRCUITO DE BOMBA DE RECIRCULACIÓN 1	24,38	12.625	22,78	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,72
CIRCUITO DE BOMBA	30,63	12.625	22,78		(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,91

DE RECIRCULACIÓN 2				44		
CIRCUITO DE BOMBA DE EXTRACCIÓN DE FANGOS 1	21,02	1.250	2,26	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,02
CIRCUITO DE BOMBA DE EXTRACCIÓN DE FANGOS 2	27,16	1.250	2,26	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,03
CIRCUITO DE MOTOR DESHIDRATADOR DE FANGOS 1	23,47	5.625	10,15	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,28
CIRCUITO DE MOTOR DESHIDRATADOR DE FANGOS 1	28,59	5.625	10,15	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,35
CIRCUITO DE CINTA TRANSPORTADORA DE FANGOS 1	32,04	4.375	7,89	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,30
CIRCUITO DE CINTA TRANSPORTADORA DE FANGOS 2	25,85	4.375	7,89	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,23
CIRCUITO DE BOMBA DE POLIELECTROLITO	17,31	1.625	2,93	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	2,02

CUADRO 5

Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO DE RASCADOR DE FONDOS Y BARRIDO DE FLOTANTES 1	58,33	2.500	4,51	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,83
CIRCUITO DE RASCADOR DE FONDOS Y BARRIDO DE FLOTANTES 2	47,06	2.500	4,51	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,73
CIRCUITO DE RASCADOR DE FONDOS Y BARRIDO	59,57	2.500	4,51	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,84

DE FLOTANTES 3						
CIRCUITO DE BOMBA DE IMPULSIÓN DE FANGOS A MEZCLADOR	18,96	1.875	3,38	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,43
CIRCUITO DE BOMBA DE IMPULSIÓN DE FANGOS A DIGESTORES 1	52,67	13.750	24,81	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	5,10
CIRCUITO DE BOMBA DE IMPULSIÓN DE FANGOS A DIGESTORES 2	51,01	13.750	24,81	44	(4×6)+TT×6mm²Cu RV 0,6/1 kV.	5,04
CIRCUITO DE CINTA TRANSPORTADORA DE FLOTANTES 1	41,77	1.875	3,38	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,59
CIRCUITO DE BOMBA	25,46	5.875	10,6	34	(4×4)+TT×4mm²Cu RV 0,6/1 kV.	3,85

Tabla 24: Cuadro resumen de las Líneas de alimentación de los equipos.

donde:

L es la longitud del circuito, en metros.

P es la potencia de cálculo, en W.

I_n es la intensidad nominal (A).

I_{max} es la intensidad máxima admisible por el cable (A).

La caída de tensión acumulada en el receptor más desfavorable (%).

La tensión en todos los casos es trifásica, 400 V entre fases.

TT es el cable de protección.

3.7.7 CUADRO RESUMEN DE LAS LÍNEAS DE ALIMENTACIÓN DEL ALUMBRADO EXTERIOR.

En la Tabla 25: se muestra el cuadro resumen de los cálculos eléctricos de las líneas de alimentación del alumbrado exterior.

CUADRO 1						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO FOCO 1	8,00	2.016	15,58	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	º
CIRCUITO DE FAROLA 1, 2 Y 3	115,46	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	4,48
CIRCUITO DE FAROLA 4 Y 5	102,51	302	2,34	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	4,15

CUADRO 2						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO FOCO 2	9,47	1.512	11,69	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,41
CIRCUITO DE FAROLA 6 Y 7	87,78	302	2,34	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,60
CIRCUITO DE FAROLA 8, 9 Y 10	127,50	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	3,09

CUADRO 3						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO FOCO 3	80,81	1.008	7,79	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,34
CIRCUITO FOCO 4	18,41	1.008	7,79	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	1,37
CIRCUITO FOCO 5	18,41	1.008	7,79	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	1,37
CIRCUITO FOCO 6	78,29	1.008	7,79	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,30

CIRCUITO DE FAROLA 11, 12 Y 13	87,06	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	1,69
CIRCUITO DE FAROLA 14 Y 15	54,86	302	2,34	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	1,34

CUADRO 4						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO FOCO 7	40,83	1.008	7,79	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,59
CIRCUITO FOCO 8	10,32	1.512	11,69	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,19
CIRCUITO DE FAROLA 16, 17 Y 18	131,84	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,88
CIRCUITO DE FAROLA 19, 20 Y 21	83,88	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,54
CIRCUITO DE FAROLA 22, 23 Y 24	130,12	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	2,87

CUADRO 5						
Circuito	**L (m)**	**P (W)**	**I_n (A)**	**I_{max} (A)**	**Cable**	**Caída de tensión (%)**
CIRCUITO FOCO 9	9,56	2.016	15,58	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cº RV 0,6/1 kV	3,60
CIRCUITO DE FAROLA 25, 26 Y 27	169,00	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	4,49
CIRCUITO DE FAROLA 28, 29 Y 30	92,95	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	3,95
CIRCUITO DE FAROLA 31, 32, 33, 34, 35 Y 36	170,82	907	2,34	51,3	(4×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	4,10

CIRCUITO DE FAROLA 37, 38 Y 39	131,21	454	3,51	51,3	(2×6)+TT×16mm²Cu RV 0,6/1 kV	4,22

Tabla 25: Cuadro resumen de las Líneas de alimentación del alumbrado exterior.

donde:

L es la longitud del circuito, en metros.

P es la potencia de cálculo, en W.

I_n es la intensidad nominal (A).

I_{max} es la intensidad máxima admisible por el cable (A).

La caída de tensión acumulada en el receptor más desfavorable (%).

TT es el cable de protección.

3.7.8 CÁLCULO DE INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en la instalación. Los puntos a estudiar son puntos representativos como la salida de baja tensión del transformador, el embarrado del cuadro general de baja tensión, y el punto de inicio y final de las líneas generales de alimentación. Los valores de intensidades de cortocircuito servirán de base para la elección de los dispositivos de protección de las líneas, por lo que se procede al cálculo del máximo valor de intensidad de cortocircuito (valor máximo en régimen permanente para un cortocircuito trifásico) y al valor mínimo (valor mínimo en régimen permanente para un cortocircuito monofásico).

Se determinan los valores de Intensidad de cortocircuito según norma UNE 21239:1994.

3.7.8.1 Intensidades de cortocircuito en el lado de media tensión del transformador

El cálculo del valor de intensidad de cortocircuito en el lado de media tensión del transformador se ha realizado en el apartado 3.3.2.1, resultando los siguientes valores:

$$/ Z_Q / = C_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}{}^2}{S''_{kQ}} = 1{,}10 \cdot \frac{15.000^2}{500 \cdot 10^6} = 0{,}495\Omega$$

$$I_{kQ\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot / Z_Q /}$$

donde:

Z_Q = Módulo de la impedancia de la red (Ω).

I_{kQmax} = Máxima Intensidad de cortocircuito permanente en el lado de media tensión, en kA.

S''_{kQ} = Potencia de cortocircuito de la red, en VA.

U_{nQ} = Tensión nominal en el lado de alta, en V.

C_{max} = Factor de tensión para corriente de cortocircuito máxima (según UNE 21239:1994).

sabiendo que: $\frac{R_Q}{Z_Q} = 0{,}2$

se obtiene: $Z_Q = 0{,}099 + j{\cdot}0{,}485(\Omega)$

La tensión de alimentación al centro de transformación es de 15 kV, y la potencia de cortocircuito, según datos de la compañía, es de 500 MVA, por lo que, en caso de cortocircuito, sustituyendo valores en la expresión de I_{kQ}:

$$I_{kQ\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot / Z_Q /} = 1{,}10 \cdot \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 0{,}495} = 19{,}25kA$$

El valor de cresta i_{pQ} de la intensidad de cortocircuito, en el lado de media tensión, viene dado por la expresión:

$$i_{pQ} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kQ}$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}099/0{,}485)} = 1{,}55$$

$$i_{pQ} = 1{,}55 \cdot \sqrt{2} \cdot 19{,}25 = 42{,}20kA$$

El valor de I_{kQ} calculado es el valor de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el lado de media tensión (cortocircuito trifásico).

3.7.8.2 Intensidades de cortocircuito en el lado de baja tensión del transformador

La intensidad de cortocircuito en el secundario de un transformador trifásico viene determinada por la siguiente expresión:

$$I_{k\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_Q'' + Z_T)}$$

donde:

Z_Q'' = Impedancia de la red referido al secundario del transformador (Ω).

Z_T = Impedancia del transformador (Ω).

I_{kmax} = Máxima Intensidad de cortocircuito permanente en el lado de baja tensión, en kA.

S = Potencia del transformador, en kVA.

U_{cc} = Tensión de cortocircuito del transformador, en %.

U_n = Tensión secundaria, en V.

El centro de transformación consta de un único transformador. La potencia es de 630 kVA y la tensión de cortocircuito del 4,0 %. La tensión en el secundario es de 400 V.

$$Z_Q'' = \frac{Z_Q}{r_t^2} = \frac{0{,}099 + j \cdot 0{,}485}{37{,}5^2} = 7{,}04 \cdot 10^{-5} + j \cdot 3{,}45 \cdot 10^{-4} (\Omega)$$

donde:

r_t =37,5 : relación de transformación del transformador.

$$/ Z_T / = U_{cc} \cdot \frac{U_n^2}{S} = 0{,}04 \cdot \frac{400^2}{630.000} = 0{,}01 \Omega$$

sabiendo que: $\frac{R_T}{X_T} = 0{,}2$

se tiene: $Z_T = 1{,}96 \cdot 10^{-3} + j \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-3} (\Omega)$

Sustituyendo se obtiene que:

$$I_{k\max} = C_{\max} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_Q'' + Z_T)} = 1{,}00 \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot (2{,}03 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0102)} = 4{,}334 - j \cdot 21{,}778 (kA)$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{kmax}/$ = 22,205 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 1{,}96 \cdot 10^{-3} / 9{,}81 \cdot 10^{-3})} = 1{,}56$$

$$i_p = 1{,}56 \cdot \sqrt{2} \cdot 22{,}205 = 47{,}988 kA$$

El valor de I_{kmax} calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el lado de baja tensión (cortocircuito trifásico). A continuación se procede al cálculo de cortocircuito mínimo que podrá darse en el lado de baja tensión, que se da aplicando las condiciones de $C_{min.}$, considerando I_{kmin} como la intensidad de un cortocircuito bifásico Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k\min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \cdot I_k = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{0{,}95}{1{,}00} \cdot 22{,}205 = 18{,}27 kA$$

3.7.8.3 Intensidades de cortocircuito en el embarrado general del cuadro de baja tensión

En el presente apartado se lleva a cabo el estudio de las corrientes de cortocircuito que pueden darse en el embarrado del cuadro general de baja tensión. Este estudio se lleva a cabo con aplicación de la Norma UNE 21.239-1994.

Las corrientes de cortocircuito en el lado de alta y baja tensión del transformador, fueron calculadas en los apartados 3.7.8.1, 3.7.8.2, respectivamente, resultando valores de: I_{kQmax} = 19,25 kA e I_{kmaxA} = 22,205 kA, I_{kminA} = 18,270 kA (la salida de baja tensión del transformador se denomina punto A).

Seguidamente se calcula la intensidad de cortocircuito en el embarrado del cuadro general de baja tensión (punto B):

$$Z_{AB} = R_{AB} + j \cdot X_{AB}$$

donde:

$$R_{AB} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{AB} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

En este caso se tiene, en el tramo de conexión de las bornas del trafo con el cuadro general de baja tensión, un tramo de 2 m de longitud formado por una terna de cables de 3x(3x240) / 2x240 mm^2 de Aluminio. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{AB} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34)\cdot 2}{3\cdot 240} = 8{,}17\cdot 10^{-5}\,\Omega$$

$$r = 1{,}14\cdot\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14\cdot\sqrt{\frac{3\cdot 240}{\pi}} = 17{,}26 mm$$

$$X_{AB} = L\cdot 6{,}28\cdot 10^{-5}\cdot(\frac{0{,}25}{n} + \ln\frac{d}{r}) = 2\cdot 6{,}28\cdot 10^{-5}\cdot(\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}1}{17{,}26\cdot 10^{-3}})) = 2{,}52\cdot 10^{-4}\,\Omega$$

$$Z_{AB} = 8{,}17\cdot 10^{-5} + j\cdot 2{,}52\cdot 10^{-4}\,\Omega$$

$$Z_B = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} = 2{,}11\cdot 10^{-3} + j\cdot 0{,}0104\Omega$$

$$I_{kB\max} = \frac{C_{\max}\cdot U_n}{\sqrt{3}\cdot Z_B} = \frac{1{,}00\cdot 400}{\sqrt{3}\cdot(2{,}11\cdot 10^{-3} + j\cdot 0{,}0104)} = 4.327{,}10 - j\cdot 21.327{,}88 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{kBmax}/$ = 21,76 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi\cdot\sqrt{2}\cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 2{,}11 \cdot 10^{-3} / 0{,}0104)} = 1{,}55$$

$$i_p = 1{,}55 \cdot \sqrt{2} \cdot 21{,}76 = 47{,}70 kA$$

El valor de I_{kBmax} calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el embarrado del cuadro general de baja tensión (cortocircuito trifásico).

A continuación se procede al cálculo de cortocircuito mínimo que podrá darse en el embarrado del cuadro general de baja tensión, que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC, cortocircuito bifásico. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{kB\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_B} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_B}$$

donde:

Z'_B se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_B = 1{,}24 \cdot 2{,}11 \cdot 10^{-3} = 2{,}616 \cdot 10^{-3} \Omega$$

El valor de X_B no varía, por lo que queda:

$$Z'_B = 2{,}616 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0104 \Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{kB\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_B} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (2{,}616 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0104)} = 4.321{,}96 - j \cdot 17.182{,}09 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{kBmin}/$ = 17,72 kA.

3.7.8.4 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 1(1)

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 1(1) son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 1(1) (punto 1(1)) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B1(1)} = R_{B1(1)} + j \cdot X_{B1(1)}$$

donde:

$$R_{B1(1)} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B1(1)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

El circuito 1(1) está formado por unos cables de 50 m de longitud de características: 3x240/120 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B1(1)} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 50}{240} = 6{,}127 \cdot 10^{-3}\,\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{240}{\pi}} = 9{,}964 mm$$

$$X_{B1(1)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 50 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{9{,}964 \cdot 10^{-3}})) = 7{,}963 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{B1(1)} = 6{,}127 \cdot 10^{-3} + j \cdot 7{,}963 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{1(1)} = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B1(1)} = 8{,}237 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0112 \Omega$$

$$I_{k1(1)\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{1(1)}} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (8{,}237 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0112)} = 9.841{,}54 - j \cdot 13.381{,}72 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k1(1)max}/$ = 16,61 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 8{,}237 \cdot 10^{-3} / 0{,}0112)} = 1{,}128$$

$$i_p = 1{,}128 \cdot \sqrt{2} \cdot 16{,}61 = 26{,}50 kA$$

El valor de $I_{k1(1)max}$ calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el final del circuito 1(1) (punto 1(1)) (cortocircuito trifásico).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 1(1), que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k1(1)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_{1(1)}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{1(1)}}$$

donde:

$Z'_{1(1)}$ se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_{1(1)} = 1{,}24 \cdot 8{,}237 \cdot 10^{-3} = 0{,}01021\Omega$$

El valor de $X_{1(1)}$ no varía, por lo que queda:

$$Z'_{1(1)} = 0{,}01021 + j \cdot 0{,}0104\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k1(1)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{1(1)}} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}01021 + j \cdot 0{,}0104)} = 9.133{,}06 - j \cdot 9.303{,}02 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k1(1)min}/$ = 13,04 kA.

3.7.8.5 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 1(2)

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 1(2) son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 1(2) (punto 1(2)) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B1(2)} = R_{B1(2)} + j \cdot X_{B1(2)}$$

donde:

$$R_{B1(2)} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B1(2)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

El circuito 1(2) está formado por unos cables de 50 m de longitud de características: 3x240/120 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B1(2)} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 50}{240} = 6{,}127 \cdot 10^{-3}\,\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{240}{\pi}} = 9{,}964 mm$$

$$X_{Bl(2)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 50 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{9{,}964 \cdot 10^{-3}})) = 7{,}963 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{Bl(2)} = 6{,}127 \cdot 10^{-3} + j \cdot 7{,}963 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{l(2)} = Z''_{Q} + Z_T + Z_{AB} + Z_{Bl(2)} = 8{,}237 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0112 \Omega$$

$$I_{kl(2)\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{l(2)}} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (8{,}237 \cdot 10^{-3} + j \cdot 0{,}0112)} = 9.841{,}54 - j \cdot 13.381{,}72 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k1(2)max}/$ = 16,61 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 8{,}237 \cdot 10^{-3} / 0{,}0112)} = 1{,}128$$

$$i_p = 1{,}128 \cdot \sqrt{2} \cdot 16{,}61 = 26{,}50 kA$$

El valor de $I_{k1(2)max}$ calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse al final del circuito 1(2) (punto 1(2) (cortocircuito trifásico). A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 1(2), que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC, considerando este valor de intensidad de cortocircuito mínima la de un cortocircuito bifásico. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k1(2)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_{1(2)}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{1(2)}}$$

donde:

$Z'_{1(2)}$ se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_{1(2)} = 1{,}24 \cdot 8{,}237 \cdot 10^{-3} = 0{,}01021\Omega$$

El valor de $X_{1(2)}$ no varía, por lo que queda:

$$Z'_{1(2)} = 0{,}01021 + j \cdot 0{,}0104\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k1(2)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{1(2)}} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}01021 + j \cdot 0{,}0104)} = 9.133{,}06 - j \cdot 9.303{,}02 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k1(2)min}/$ = 13,04 kA.

3.7.8.6 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 2

3.7.8.6.1 Circuito 2(1)

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 2 son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 2(1) (punto 2(1)) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B2(1)} = R_{B2(1)} + j \cdot X_{B2(1)}$$

donde:

$$R_{B2(1)} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B2(1)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

El circuito 2 está formado por unos cables de 154 m de longitud de características: 3x150/70 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B2(1)} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34)\cdot 154}{150} = 0{,}0302\Omega$$

$$r = 1{,}14\cdot\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14\cdot\sqrt{\frac{150}{\pi}} = 7{,}877mm$$

$$X_{B2(1)} = L\cdot 6{,}28\cdot 10^{-5}\cdot(\frac{0{,}25}{n} + \ln\frac{d}{r}) = 154\cdot 6{,}28\cdot 10^{-5}\cdot(\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{7{,}877\cdot 10^{-3}})) = 4{,}726\cdot 10^{-3}\Omega$$

$$Z_{B2(1)} = 0{,}0302 + j\cdot 4{,}726\cdot 10^{-3}\Omega$$

$$Z_{2(1)} = Z''_{Q} + Z_T + Z_{AB} + Z_{B2(1)} = 0{,}03231 + j\cdot 0{,}0151\Omega$$

$$I_{k2(1)\max} = \frac{C_{\max}\cdot U_n}{\sqrt{3}\cdot Z_2} = \frac{1{,}00\cdot 400}{\sqrt{3}\cdot(0{,}03231 + j\cdot 0{,}0151)} = 5.866{,}34 - j\cdot 2.741{,}62A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k2(1)max}/$ = 6,48 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi\cdot\sqrt{2}\cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98\cdot e^{(-3\cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98\cdot e^{(-3\cdot 0{,}03231/0{,}0151)} = 1{,}0216$$

$$i_p = 1{,}0216\cdot\sqrt{2}\cdot 6{,}48 = 9{,}36kA$$

El valor de $I_{k2(1)max}$ calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el punto final del circuito 2(1) (punto 2(1), en el cuadro 1) (cortocircuito trifásico).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 2(1), que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k2(1)\min} = \frac{C_{\min}\cdot U_n}{\sqrt{3}\cdot Z'_{2(1)}}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min}\cdot U_n}{2\cdot Z'_{2(1)}}$$

donde:

$Z'_{2(1)}$ se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20}\cdot(1+\alpha\cdot(t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20}\cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_{2(1)} = 1{,}24\cdot 0{,}0302 = 0{,}0375\Omega$$

El valor de $X_{2(1)}$ no varía, por lo que queda:

$$Z'_{2(1)} = 0{,}03956 + j\cdot 0{,}0151\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k2(1)\min} = \frac{C_{\min}\cdot U_n}{2\cdot Z'_{2(1)}} = \frac{0{,}95\cdot 400}{2\cdot(0{,}03956 + j\cdot 0{,}0151)} = 4.192{,}07 - j\cdot 1.600{,}10A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k2(1)min}/$ = 4,49 kA.

3.7.8.6.2 Circuito 2(2)

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 2 son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 2(2) (punto 2(2)) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B2(2)} = R_{B2(2)} + j \cdot X_{B2(2)}$$

donde:

$$R_{B2(2)} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B2(2)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

El circuito 2 está formado por unos cables de 104 m de longitud de características: 3x150/70 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B2(2)} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 104}{150} = 0{,}0204\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{150}{\pi}} = 7{,}877 mm$$

$$X_{B2(2)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 104 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{7{,}877 \cdot 10^{-3}})) = 3{,}192 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{B2(2)} = 0{,}0204 + j \cdot 3{,}192 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{2(2)} = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B2(2)} = 0{,}02251 + j \cdot 0{,}0136 \Omega$$

$$I_{k2(2)\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_2} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0{,}02251 + j \cdot 0{,}0136)} = 7.515{,}92 - j \cdot 4.540{,}95 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k2(2)max}/$ = 8,78 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}02251/0{,}0136)} = 1{,}027$$

$$i_p = 1{,}027 \cdot \sqrt{2} \cdot 8{,}78 = 12{,}75 kA$$

El valor de $I_{k2(2)max}$ calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el punto final del circuito 2(2) (punto 2(2), en el cuadro 2) (cortocircuito trifásico).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 2(2), que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k2(2)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_{2(2)}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{2(2)}}$$

donde:

$Z'_{2(2)}$ se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_{2(2)} = 1{,}24 \cdot 0{,}0204 = 0{,}02530\Omega$$

El valor de $X_{2(2)}$ no varía, por lo que queda:

$$Z'_{2(2)} = 0{,}02741 + j \cdot 0{,}0136\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k2(2)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{2(2)}} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}02741 + j \cdot 0{,}0136)} = 5.562{,}40 - j \cdot 2.759{,}89 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k2(2)min}/$ = 6,21 kA.

3.7.8.7 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 3

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 3 son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 3 (punto 3) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B3} = R_{B3} + j \cdot X_{B3}$$

donde:

$$R_{B3} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B3} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

El circuito 3 está formado por unos cables de 50 m de longitud de características: 3x70/35 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B3} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 50}{70} = 0{,}021\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{70}{\pi}} = 5{,}381 mm$$

$$X_{B3} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 50 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{5{,}381 \cdot 10^{-3}})) = 2{,}731 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{B3} = 0{,}021 + j \cdot 2{,}731 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_3 = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B3} = 0{,}02311 + j \cdot 0{,}0131 \Omega$$

$$I_{k3\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_3} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0{,}02311 + j \cdot 0{,}0131)} = 7.562{,}93 - j \cdot 4.287{,}08 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k3max}/$ = 8,69 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}02311/0{,}0131)} = 1{,}025$$

$$i_p = 1{,}025 \cdot \sqrt{2} \cdot 8{,}69 = 12{,}60 kA$$

El valor de I_{k3max} calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el punto final del circuito 3 (punto 3) (cortocircuito trifásico).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 3, que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k3\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_3}$$

donde:

Z'_3 se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_3 = 1{,}24 \cdot 0{,}02311 = 0{,}02866\Omega$$

El valor de X_3 no varía, por lo que queda:

$$Z'_3 = 0{,}02866 + j \cdot 0{,}0131\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k3\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_3} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}02866 + j \cdot 0{,}0131)} = 5.502{,}79 - j \cdot 2.515{,}23A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k3min}/$ = 6,05 kA.

3.7.8.8 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 4

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 4 son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 4 (punto 4, en cuadro 4) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B4} = R_{B4} + j \cdot X_{B4}$$

donde:

$$R_{B4} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B4} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

En este caso se tiene, en el tramo de circuito 4, un tramo de 70 m de longitud formado por un cable de 3x120/70 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B4} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 70}{120} = 0{,}01716\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{120}{\pi}} = 7{,}046 mm$$

$$X_{B4} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 70 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{7{,}046 \cdot 10^{-3}})) = 2{,}64 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{B4} = 0{,}01716 + j \cdot 2{,}64 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_4 = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B4} = (2{,}11 \cdot 10^{-3} + 0{,}01716) + j \cdot (0{,}0104 + 2{,}64 \cdot 10^{-3}) = 0{,}01927 + j \cdot 0{,}01304 \Omega$$

$$I_{k4\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_4} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0{,}01927 + j \cdot 0{,}01304)} = 8.225{,}91 - j \cdot 5.562{,}67 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k4max}/$ = 9,93 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}01927 / 0{,}01304)} = 1{,}032$$

$$i_p = 1{,}032 \cdot \sqrt{2} \cdot 9{,}93 = 14{,}49 kA$$

El valor de I_{k4max} calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el embarrado del cuadro 4 (punto 4, final del circuito 4).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 4, que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k4\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_4}$$

donde:

Z'_4 se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_4 = 1{,}24 \cdot 0{,}01927 = 0{,}02389\Omega$$

El valor de X_4 no varía, por lo que queda:

$$Z'_4 = 0{,}02389 + j \cdot 0{,}01304\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k4\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_4} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}02389 + j \cdot 0{,}01304)} = 6.127{,}51 - j \cdot 3.344{,}61A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k4min}/$ = 6,98 kA.

3.7.8.9 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 4 (Edificio Explotación)

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 4(E.E.) son los mismos que los valores de intensidad de cortocircuito del punto final del circuito 4, calculados en el apartado 3.7.8.8.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 4 (E.E.) (punto 4(E.E.), en cuadro del Edificio de Explotación) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{4,4(EE)} = R_{4,4(EE)} + j \cdot X_{4,4(EE)}$$

donde:

$$R_{4,4(EE)} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{4,4(EE)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

En este caso se tiene, en el tramo de circuito 4(E.E.), un tramo de 32 m de longitud formado por un cable de 3x35/16 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{4,4(EE)} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 32}{35} = 0{,}02689\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{35}{\pi}} = 3{,}805 mm$$

$$X_{4,4(EE)} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 32 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{3{,}805 \cdot 10^{-3}})) = 2{,}44 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{4,4(EE)} = 0{,}02689 + j \cdot 2{,}44 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{4(EE)} = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B4} + Z_{4,4(EE)} = (0{,}01927 + j \cdot 0{,}01304) + (0{,}02689 + j \cdot 2{,}44 \cdot 10^{-3}) =$$
$$= 0{,}04616 + j \cdot 0{,}0155 \Omega$$

$$I_{k4(EE)\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{4(EE)}} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0{,}04616 + j \cdot 0{,}0155)} = 4.496{,}09 - j \cdot 1.509{,}73 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k4(EE)max}/ = 4{,}74$ kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}04616/0{,}0155)} = 1{,}02$$

$$i_p = 1{,}02 \cdot \sqrt{2} \cdot 4{,}74 = 6{,}84 kA$$

El valor de $I_{k4(EE)max}$ calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el embarrado del cuadro 4 (E.E.) (punto 4(E.E.), final del circuito 4(E.E.)).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 4(E.E.), que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k4(EE)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_{4(EE)}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{4(EE)}}$$

donde:

$Z'_{4(EE)}$ se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_{4(EE)} = 1{,}24 \cdot 0{,}04616 = 0{,}05724\Omega$$

El valor de $X_{4(EE)}$ no varía, por lo que queda:

$$Z'_{4(EE)} = 0{,}05724 + j \cdot 0{,}0155\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k4(EE)\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_{4(EE)}} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}05724 + j \cdot 0{,}0155)} = 3.092{,}58 - j \cdot 837{,}44A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k4(EE)min}/$ = 3,20 kA.

3.7.8.10 Intensidades de cortocircuito en el Circuito 5

Los valores de intensidad de cortocircuito en el inicio del circuito 5 son los mismos que los valores para el punto B, calculados en el apartado 3.7.8.3.

La intensidad de cortocircuito en el punto final del Circuito 5 (punto 5, en cuadro 5) se calcula según el desarrollo siguiente:

$$Z_{B5} = R_{B5} + j \cdot X_{B5}$$

donde:

$$R_{B5} = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$$X_{B5} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r})$$

donde:

ρ = es la resistividad del material conductor del cable a 20ºC (caso más desfavorable): 1/54 Ω·mm^2/m, para el Cobre, y 1/34 Ω·mm^2/m, para el Aluminio).

L = es la longitud del tramo, en m.

S = la sección del cable, en mm^2

n = es el número de conductores del haz.

d = es la distancia media entre conductores o entre ejes de haces.

r = es el radio de conductor único. r debe multiplicarse por un factor de corrección de 1,14.

En este caso se tiene, en el circuito 5, un tramo de 193 m de longitud formado por un cable de 3x95/50 mm^2 Al RV 0,6/1 kV. Sustituyendo valores en las expresiones anteriores se obtiene que:

$$R_{B5} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{(1/34) \cdot 193}{95} = 0{,}0598\Omega$$

$$r = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1{,}14 \cdot \sqrt{\frac{95}{\pi}} = 6{,}269 mm$$

$$X_{B5} = L \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{n} + \ln \frac{d}{r}) = 193 \cdot 6{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot (\frac{0{,}25}{1} + \ln(\frac{0{,}01}{6{,}269 \cdot 10^{-3}})) = 8{,}69 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{B5} = 0{,}0598 + j \cdot 8{,}69 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_5 = Z''_Q + Z_T + Z_{AB} + Z_{B5} = (2{,}11 \cdot 10^{-3} + 0{,}0598) + j \cdot (0{,}0104 + 8{,}69 \cdot 10^{-3}) = 0{,}06191 + j \cdot 0{,}01909 \Omega$$

$$I_{k5\max} = \frac{C_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_5} = \frac{1{,}00 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0{,}06191 + j \cdot 0{,}01909)} = 3.406{,}40 - j \cdot 1.050{,}35 A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito máxima permanente de $/I_{k5max}/$ = 3,56 kA.

El valor de cresta i_p de la intensidad de cortocircuito, en el lado de baja tensión, viene dado por la expresión:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

$$\chi = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot R/X)} = 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{(-3 \cdot 0{,}06191/0{,}01909)} = 1{,}020$$

$$i_p = 1{,}020 \cdot \sqrt{2} \cdot 3{,}56 = 5{,}14 kA$$

El valor de I_{k5max} calculado es el valor de intensidad de cortocircuito permanente máximo que podrá darse en el embarrado del cuadro 5 (punto 5, final del circuito 5).

A continuación se procede al cálculo de intensidad de cortocircuito mínimo que podrá darse en el punto final del circuito 5, que se da aplicando las condiciones de C_{min} y resistencia de los cables a temperatura de 80ºC. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{k5\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z'_5} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_5}$$

donde:

Z'_5 se calcula según la resistencia de los cables a temperatura admisible del conductor al final del cortocircuito. Para líneas de baja tensión es suficiente tomar t_{maxcc}=80ºC (según UNE 21239:1994).

La resistencia viene dada por:

$$R_L = R_{L20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\max cc} - t_{20})) = R_{L20} \cdot 1{,}24$$

dado que α = 0,004/ºC, aplicable al cobre, aluminio y aleaciones de aluminio.

De aquí se tiene que:

$$R'_5 = 1{,}24 \cdot 0{,}0598 = 0{,}07415\Omega$$

El valor de X_5 no varía, por lo que queda:

$$Z'_5 = 0{,}07626 + j \cdot 0{,}01909\Omega$$

Sustituyendo:

$$I_{k5\min} = \frac{C_{\min} \cdot U_n}{2 \cdot Z'_5} = \frac{0{,}95 \cdot 400}{2 \cdot (0{,}07626 + j \cdot 0{,}01909)} = 2.344{,}55 - j \cdot 586{,}91A$$

Por lo que circulará una intensidad de cortocircuito mínima permanente de $/I_{k5min}/$ = 2,42 kA.

En la Figura 39: se representan esquemáticamente las corrientes de cortocircuito:

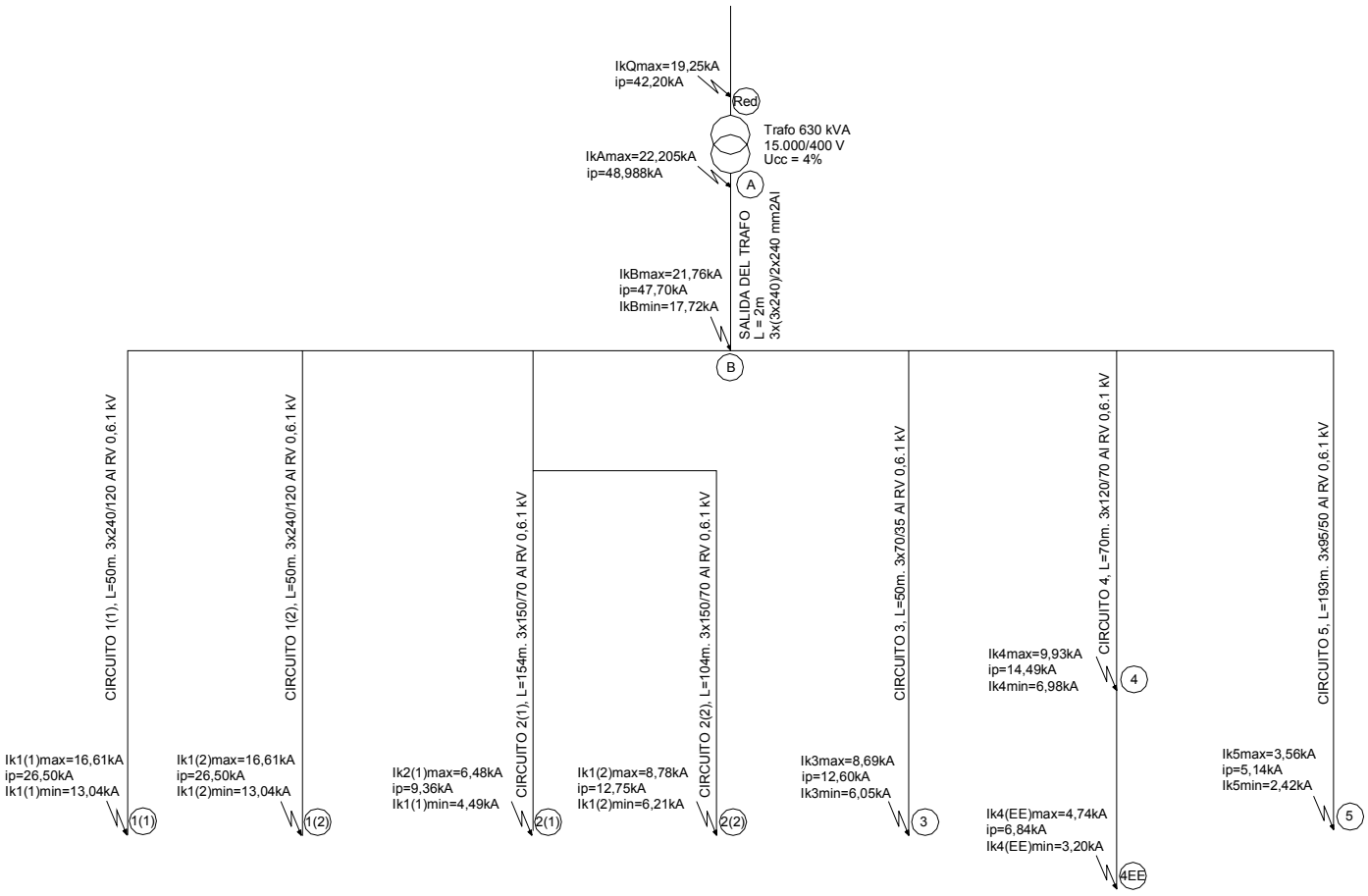


Figura 39: Corrientes de cortocircuito en la instalación.

3.8 PROTECCIONES DE LAS LÍNEAS GENERALES DE ALIMENTACIÓN.

Las líneas generales de alimentación quedan protegidas frente a corrientes de fuga, sobrecargas y cortocircuitos, mediante interruptores automáticos asociados a relés magnetotérmicos y diferenciales, en el cuadro general de baja tensión ubicado en el centro de transformación.

A la salida de baja tensión del transformador se colocan tres cables unipolares de 240 mm^2 de Aluminio, por cada fase, y dos cables de 240 mm^2 de Aluminio para el neutro (puente de unión entre el transformador y en embarrado principal del cuadro general de baja tensión).

La intensidad de circulación nominal por este embarrado es de 909,3 A, calculada en el apartado 3.3.1.2. La intensidad máxima de cortocircuito en el embarrado del cuadro general de baja tensión es de 21,76 kA, calculada en el apartado 3.7.8.3. Se instala un interruptor general automático de corte tetrapolar, del tipo Compact NS 1000 N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 50 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 37,5 kA. Este interruptor automático está asociado a un rele magnetotérmico del tipo Micrologic 2.0, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 1.000 A, y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 10 kA.

La potencia del grupo electrógeno es de 200 kVA, lo que supone una intensidad máxima de circulación, por los cables de unión entre el grupo electrógeno y el embarrado del cuadro general de baja tensión, de 288,68 A. Se instala un conmutador automático, de conexión del grupo electrógeno, de 400 A de intensidad nominal. Este conmutador tiene la función de conectar a la instalación de la E.D.A.R. el grupo electrógeno o el trafo, dependiendo de si hay un fallo en el suministro eléctrico en media tensión o si no lo hay, respectivamente. De esta forma se produce un enclavamiento que impide la conexión del grupo electrógeno a la red y/o el funcionamiento en paralelo de la red y el grupo electrógeno.

La batería de condensadores de 390 kVAr, del tipo Rectimac 2 estandar 400 V de Merlín Gerin, con regulación automática e interruptor automático incorporado, del tipo NS C801N de la serie Compact, realiza la conexión de los condensadores a la instalación de forma automática.

Este interruptor automático cuenta con poder de corte último (I_{cu}) = 50 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 25 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo STR25DE, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 640 A, y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 6,40 kA.

Seguidamente se contemplan las protecciones correspondientes a cada línea general de alimentación:

Circuito 1(1):

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 140.000 W. Teniendo en cuenta que los receptores a alimentar son motores, la intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de 268,38 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.1. También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a 306,00 A. Los valores de intensidad de cortocircuito que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.4 y que resultan ser I_{kBmax} = 21,76 kA, $I_{k1(1)min}$ = 13,04 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS 400 N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 50 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 50 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo STR23SE, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 280 A (I_n = 268,38 A < I_r = 280 A < I_{maxadm} = 306 A), y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 2,80 kA (I_m < $I_{k1(1)min}$ < I_{kBmax} < I_{cs}). El tiempo total de corte magnético de este dispositivo es de 60 ms. Además este interruptor está asociado a un relé diferencial del tipo VIGI MB, con regulación de la sensibilidad a 500 mA, y regulación del tiempo de disparo a 300 ms.

Circuito 1(2):

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 140.000 W. Teniendo en cuenta que los receptores a alimentar son motores, la intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de 268,38 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.2 . También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a 306,00 A. Los valores de intensidad de cortocircuito que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.5 y que resultan ser I_{kBmax} = 21,76 kA, $I_{k1(2)min}$ = 13,04 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS 400 N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 50 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 50 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo STR23SE, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 280 A (I_n = 268,38 A < I_r = 280 A < I_{maxadm} = 306 A), y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 2,80 kA ($I_m < I_{k1(2)min} < I_{kBmax} < I_{cs}$). El tiempo total de corte magnético de este dispositivo es de 60 ms. Además este interruptor está asociado a un relé diferencial del tipo VIGI MB, con regulación de la sensibilidad a 500 mA, y regulación del tiempo de disparo a 300 ms.

Circuito 2:

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 97.000 W. La intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de I_n = 188,97 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.3. También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a I_{maxadm} = 235,00 A. Los valores de intensidad de cortocircuito que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de

intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.6 y que resultan ser I_{kBmax} = 21,76 kA, $I_{k2(1)min}$ = 4,49 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS250N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 36 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 36 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo TM250D, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 225 A ($I_n < I_r < I_{maxadm}$), y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 2,25 kA ($I_m < I_{k2(1)min} < I_{kBmax} < I_{cs}$). Además este interruptor está asociado a un relé diferencial del tipo VIGI MH, con regulación de la sensibilidad a 500 mA, y regulación del tiempo de disparo a 300 ms.

Circuito 3:

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 36.300 W. La intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de I_n = 78,15 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.4. También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a I_{maxadm} = 156,64 A. Los valores de intensidad de cortocircuito que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.7 y que resultan ser I_{kBmax} = 21,76 kA, I_{k3min} = 6,05 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS160N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 36 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 36 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo TM125D, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 125 A ($I_n < I_r < I_{maxadm}$), y valor del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, de I_m = 1,25 kA ($I_m < I_{k3min} < I_{kBmax} < I_{cs}$). Además este interruptor está asociado a un

relé diferencial del tipo VIGI MH, con regulación de la sensibilidad a 500 mA, y regulación del tiempo de disparo a 300 ms.

Circuito 4:

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 84.800 W. La intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de I_n = 163,70 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.5. También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a I_{maxadm} = 210,04 A. Los valores de intensidad de cortocircuito que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.8 y que resultan ser I_{kBmax} = 21,76 kA, I_{k4min} = 6,98 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS400N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 36 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 36 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo STR23SE, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 200 A ($I_n < I_r < I_{maxadm}$), y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 2,00 kA ($I_m < I_{k4min} < I_{kBmax} < I_{cs}$). Además este interruptor está asociado a un relé diferencial del tipo VIGI MB, con regulación de la sensibilidad a 500 mA, y regulación del tiempo de disparo a 300 ms.

Circuito 4(E.E.):

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 30.000 W. La intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de I_n = 56,38 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.6. También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a I_{maxadm} = 106,80 A. Los valores de intensidad de cortocircuito

que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.9 y que resultan ser I_{k4max} = 9,93 kA, $I_{k4(E.E.)min}$ = 3,20 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS160N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 36 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 36 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo STR22SE(80A), con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 80 A ($I_n < I_r < I_{maxadm}$), y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 0,80 kA ($I_m < I_{k4(E.E.)min} < I_{k4max} < I_{cs}$).

Circuito 5:

Este circuito cuenta con una potencia instalada de 41.300 W. La intensidad correspondiente a esta potencia instalada es de I_n = 81,51 A, tal y como se ha calculado en el apartado 3.7.5.7. También en este apartado se especifica la intensidad máxima admisible de los cables, según el método de instalación, que asciende a I_{maxadm} = 185,12 A. Los valores de intensidad de cortocircuito que hay que tener en consideración son los valores extremos que pueden darse en el circuito, es decir, el valor de intensidad máxima de cortocircuito en el principio del tramo y el valor de intensidad mínima de cortocircuito al final del tramo, valores calculados en el apartado 3.7.8.10 y que resultan ser I_{kBmax} = 21,76 kA, I_{k5min} = 2,42 kA.

Según estos valores se instala, para la protección frente a las sobrecargas, cortocircuitos y corrientes diferenciales de esta línea, un interruptor automático de corte tetrapolar del tipo Compactt NS160N Merlín Gerin, con poder de corte último (I_{cu}) = 36 kA e intensidad de corte de servicio (I_{cs}) = 36 kA. Este interruptor automático está asociado a un relé magnetotérmico del tipo TM125D, con regulación del umbral de disparo térmico, de protección frente a sobrecargas, al valor de I_r = 125 A ($I_n < I_r < I_{maxadm}$), y regulación del umbral de disparo magnético, de protección frente a cortocircuitos, al valor de I_m = 1,25 kA ($I_m < I_{k5min} < I_{kBmax} < I_{cs}$). Además este interruptor está

asociado a un relé diferencial del tipo VIGI MH, con regulación de la sensibilidad a 500 mA, y regulación del tiempo de disparo a 300 ms.

3.9 ESTUDIO DE SELECTIVIDAD DE LAS PROTECCIONES.

3.9.1 Selectividad de los dispositivos de protección magnetotérmica

En este apartado se procede al estudio de la selectividad de las protecciones, selectividad amperimétrica, en el ámbito de las corrientes de cortocircuitos, y selectividad cronométrica, en el ámbito de las corrientes de cortocircuitos y sobrecargas. Con la selectividad se consigue eliminar un defecto de cortocircuito o una sobrecarga de forma localizada, sin que éste afecte al resto de la instalación.

El tipo de instalación eléctrica en cuestión está compuesto por dos zonas diferenciadas, en cuanto al comportamiento frente a cortocircuitos:

- La primera zona (zona A) la constituyen los cables que forman las líneas generales de alimentación, que parten desde el cuadro general de baja tensión, en el centro de transformación, y se dirigen hacia los diferentes cuadros secundarios de mando y protección. Estos cables quedan protegidos frente a las corrientes de cortocircuito y de sobrecarga mediante interruptores automáticos asociados a relés magnetotérmicos, en el cuadro general de baja tensión, que son analizados en el apartado 3.8.

- La segunda zona (zona B) la constituyen los cables de alimentación de los equipos, que parten desde los cuadros secundarios de mando y protección y se dirigen hacia los equipos que forman la instalación de la E.D.A.R.

El esquema de la instalación es representado en la Figura 40:

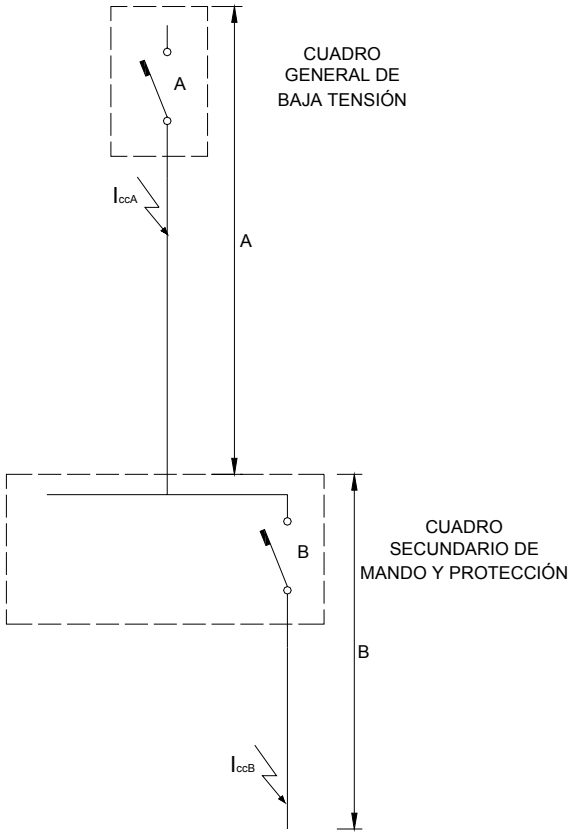


Figura 40: Zonas de la instalación frente al comportamiento ante un cortocircuito.

Para tener una selectividad amperimétrica total en esta instalación se debe cumplir la siguiente regla:

Figura 41: Selectividad amperimétrica.

Es decir: $I_{mB} < I_{ccminB} < I_{ccmaxB} < I_{mA} < I_{ccA}$, o lo que es lo mismo: $I_{mB} < I_{ccB} < I_{mA} < I_{ccA}$

donde:

I_{mB} es el umbral para el accionamiento del disparo magnético del interruptor en B.

I_{ccmaxB} es la corriente máxima de cortocircuito en B.

I_{ccminB} es la corriente mínima de cortocircuito en B.

I_{mA} es el umbral para el accionamiento del disparo magnético del interruptor en A.

I_{ccmaxA} es la corriente máxima de cortocircuito en A.

I_{ccminA} es la corriente mínima de cortocircuito en A.

I_{ccB} es el conjunto de valores de corriente de cortocircuito que pueden darse en B ($I_{ccminB}<I_{ccB}<I_{ccmaxB}$).

I_{ccA} es el conjunto de valores de corriente de cortocircuito que pueden darse en A ($I_{ccminA}<I_{ccA}<I_{ccmaxA}$).

Para tener una selectividad cronométrica total en esta instalación se debe cumplir la siguiente regla:

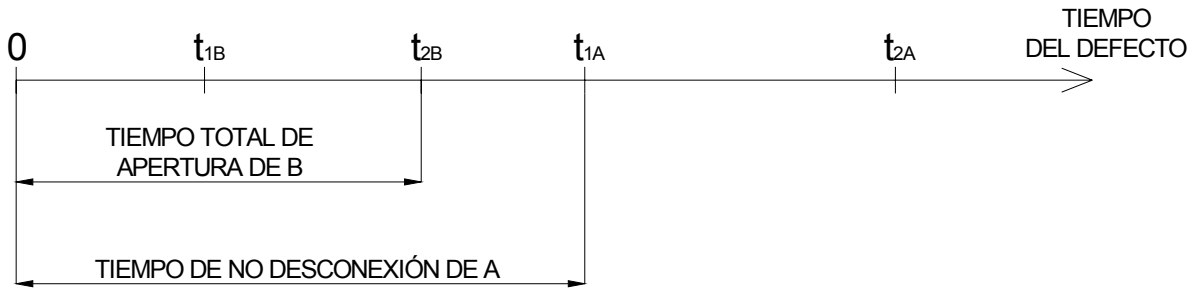


Figura 42: Selectividad cronométrica

donde:

t_1 es el tiempo de apertura.

t_{12} es el tiempo de permanencia del arco.

$t_2 = t_1 + t_{12}$, es el tiempo total de corte o tiempo total de desconexión.

Es decir: $t_{2B} < t_{1A}$, para cualquier punto de la curva tiempo-Intensidad.

Para que se produzca selectividad cronométrica frente a las corrientes de cortocircuito y sobrecargas, las curvas de disparo I-t (Intensidad frente a tiempo de respuesta) deben presentar en aspecto de la Figura 43: , para los interruptores magnetotérmicos colocados en los puntos A y B:

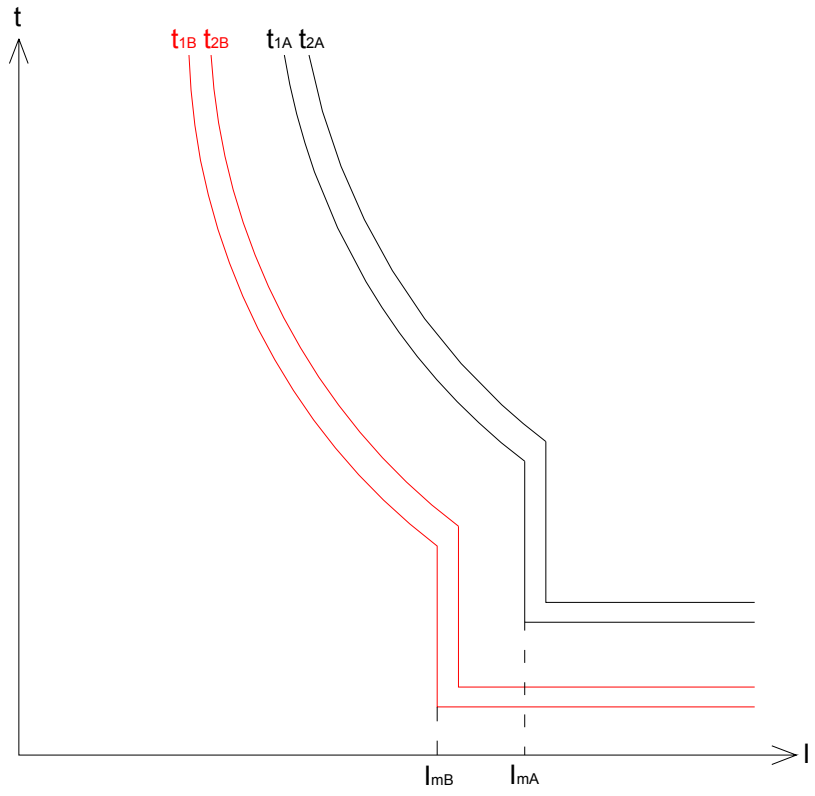


Figura 43: Condición de selectividad cronométrica en el ámbito de las intensidades de sobrecargas y cortocircuitos.

A continuación se detalla el estudio de la selectividad amperimétrica y cronométrica para cada línea general de alimentación. Siguiendo el esquema de las intensidades de cortocircuito, representadas en la Figura 39: se establecen los umbrales de disparo magnético de las diferentes protecciones, según el caso:

- **Circuitos 1(1) y 1(2) (Alimentación de Cuadro 3, reactores de aireación):**

Estos circuitos son los de alimentación del Cuadro 3, en la parte de los reactores de aireación.

El valor de I_{ccmaxB} fue calculado en el apartado 3.7.8.4 y 3.7.8.5 resultando:

I_{ccmaxB} = 16,61 kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A) es del tipo "Compact NS400N", asociado a un relé de protección magnetotérmica STR23SE, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 280 A (I_n = 268,38 A < I_r = 280 A < I_{maxadm} = 306 A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 2,80 kA ($10 \cdot I_r$).

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario de mando y protección 3 (punto B) son del tipo NG125N Melin Gerin (25 kA), de calibre 100 A, curva C. El valor de I_{mB} está comprendido entre de 0,70 y 1,00 kA ($7\text{-}10 \cdot I_r$), para este elemento.

Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

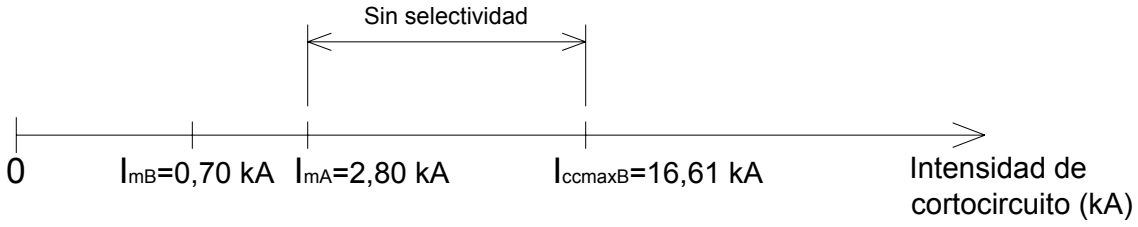


Figura 44: Selectividad amperimétrica parcial en los circuitos 1(1) y 1(2) (Cuadro 3).

Por lo tanto se tiene una selectividad amperimétrica parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

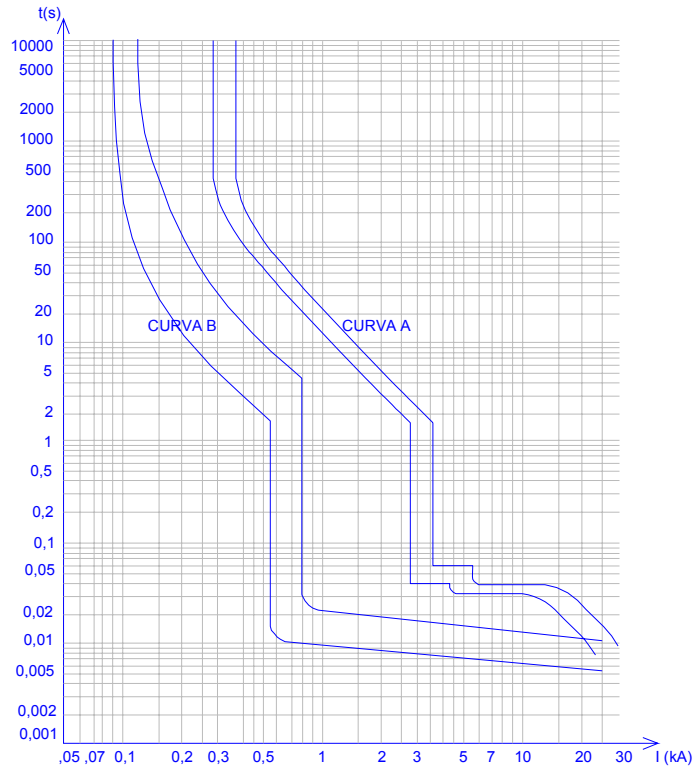


Figura 45: Curvas de disparo de los dispositivos de protección de los Circuitos 1(1) y 1(2) y Cuadro 3.

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS400N, STR23SE y la curva B la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico NG125N.

Se observa que las curvas de disparo de ambos dispositivos no quedan superpuestas, para el ámbito de las intensidades de cortocircuito entre I_{ccmaxB} e I_{ccminB}, por lo que la selectividad cronométrica es total.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 46:

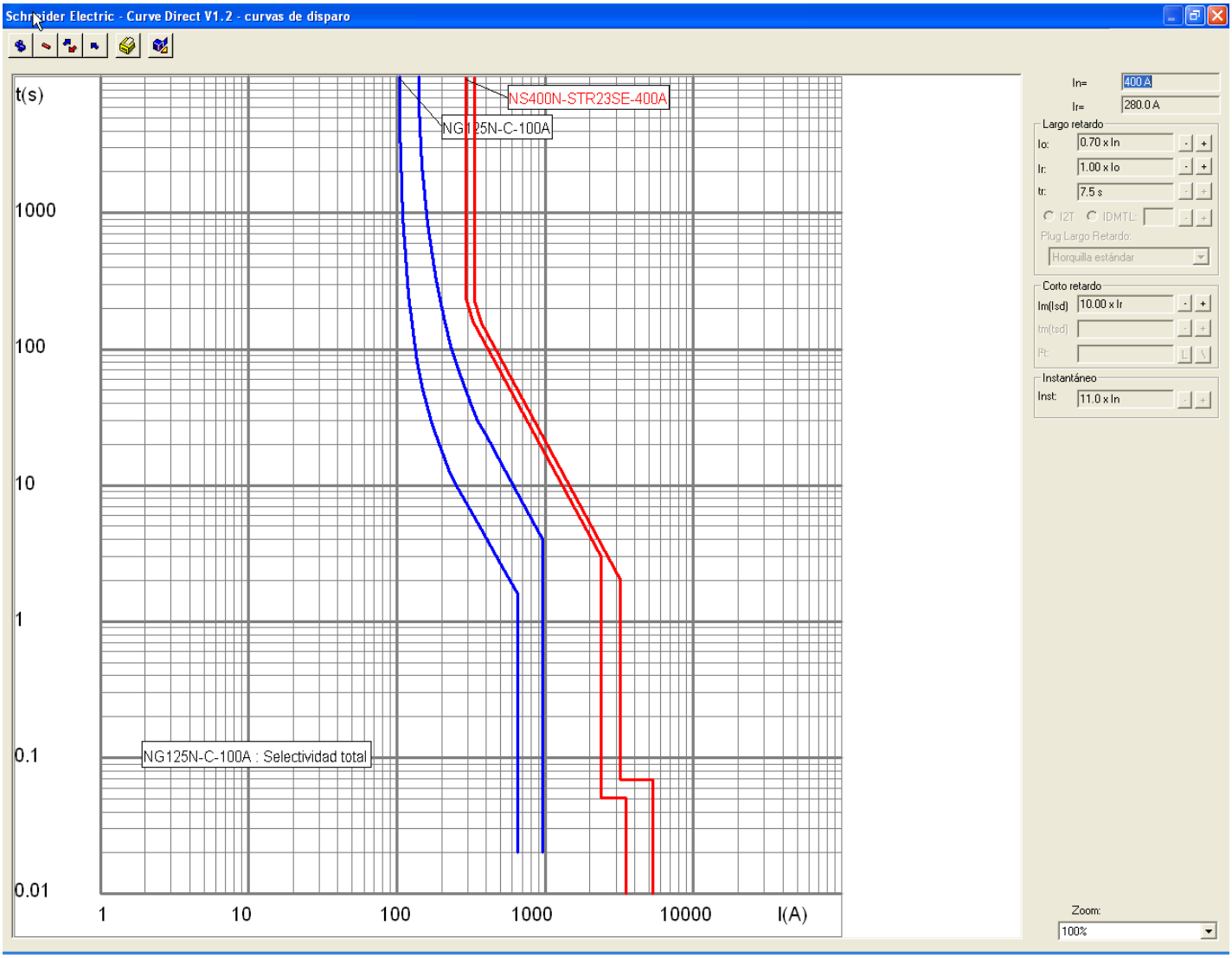


Figura 46: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, de los Circuitos 1(1) y 1(2) y Cuadro 3.

- **Circuito 2 (Alimentación de Cuadro 1):**

Este circuito es el de alimentación del Cuadro 1.

El valor de I_{ccmaxB} fue calculado en el apartado 3.7.8.6.1, resultando:

$I_{ccmaxB} = 6{,}48$ kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A), para protección de este circuito, es del tipo "Compact NS250N", asociado a un relé de protección magnetotérmica TM250D, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de $I_r = 225$ A ($I_n = 188{,}97$ A < $I_r = 225$ A < $I_{maxadm} = 235$ A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 2,25 kA ($10 \cdot I_r$).

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario de mando y protección 1 (punto B) son del tipo C60H Melin Gerin (10 kA), Curva C, de calibres 16 A y 32 A.

1. Interruptores automáticos magnetotérmicos C60H, calibre 16 A:

El umbral del disparo magnético de este dispositivo está en la banda de 7-10 · I_r. Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

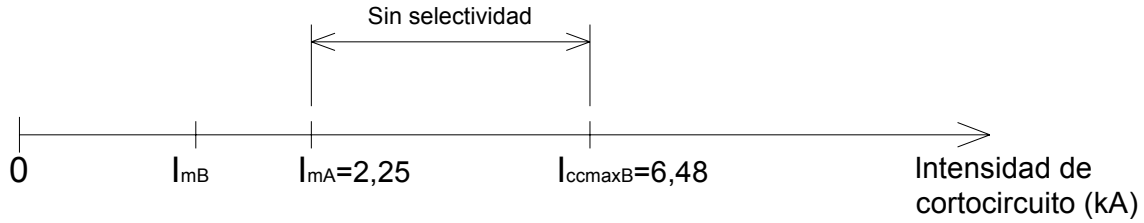


Figura 47: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 2 (Cuadro 1).

Por lo tanto no se tiene una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

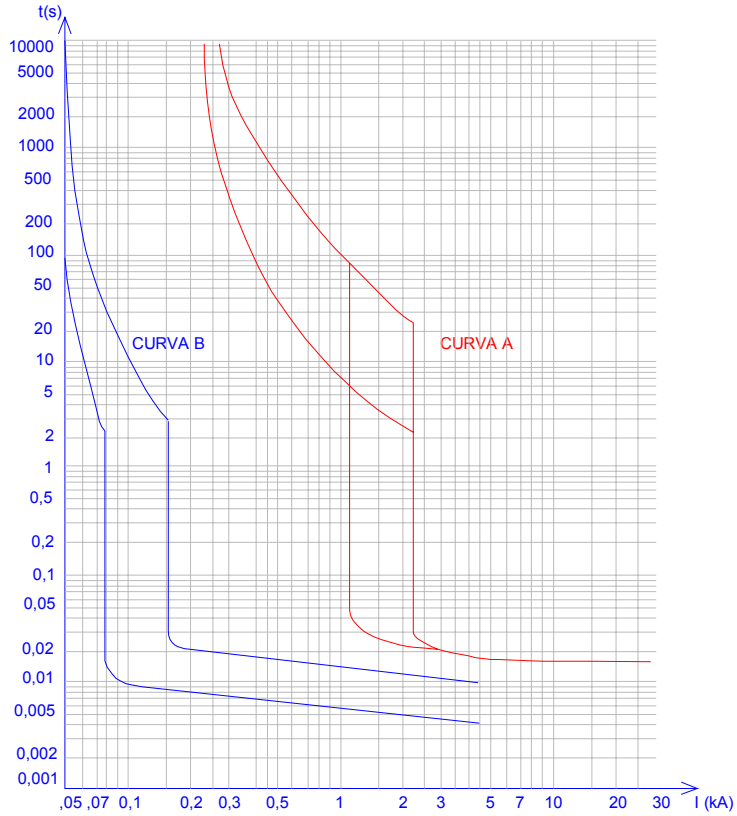


Figura 48: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 2 y Cuadro 1 (16 A)

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS250N, TM250D y la curva B la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico C60H, 16 A.

2. Interruptores automáticos magnetotérmicos C60H, calibre 32 A:

El umbral del disparo magnético de este dispositivo está en la banda de 7-10 · I_r. Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

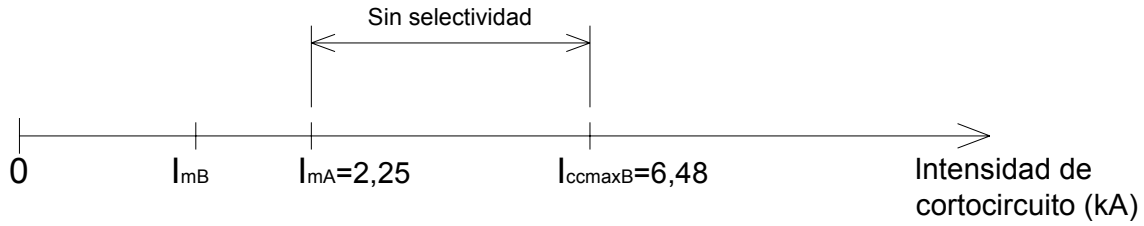


Figura 49: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 2 (Cuadro 1).

Por lo tanto no se tiene una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

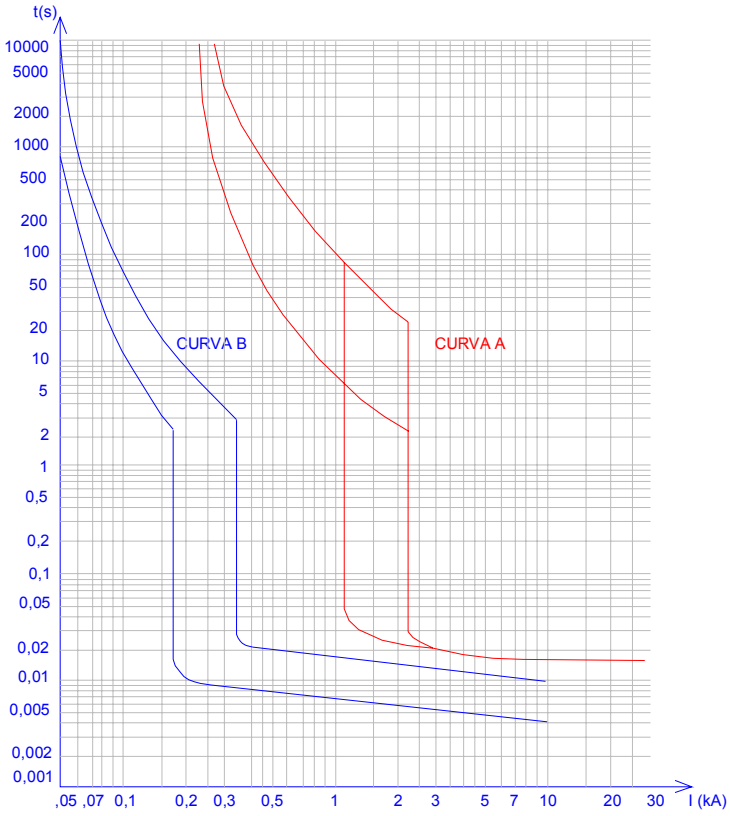


Figura 50: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 2 y Cuadro 1 (32 A).

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS250N, TM250D y la curva B la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico C60H, 32 A.

Se observa que las curvas de disparo de ambos dispositivos no quedan superpuestas, para el ámbito de las intensidades de cortocircuito entre I_{ccmaxB} e I_{ccminB}, por lo que la selectividad cronométrica es total.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 51:

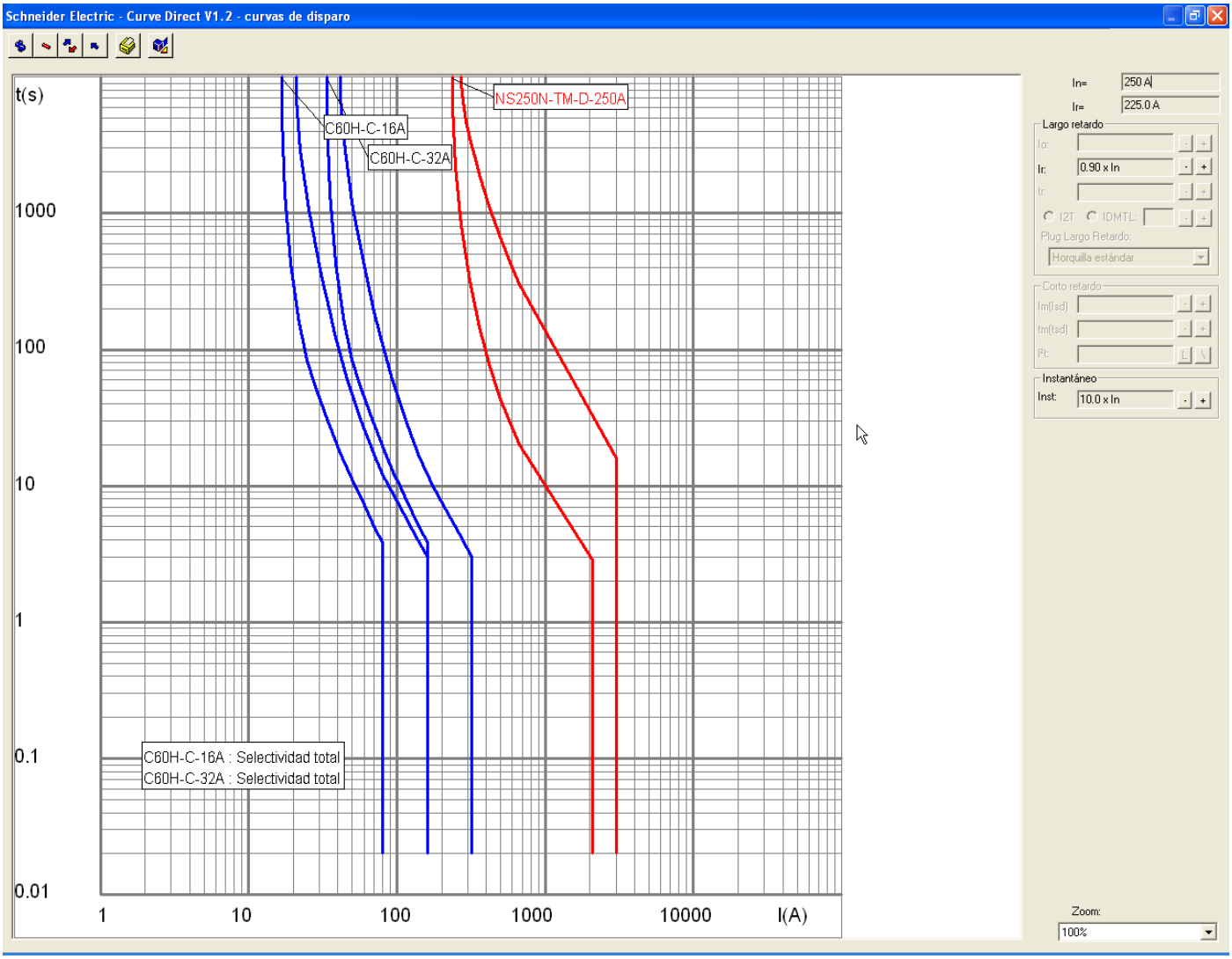


Figura 51: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, del Circuito 2 y Cuadro 1.

- **Circuito 2 (Alimentación de Cuadro 2):**

Este circuito es el de alimentación del Cuadro 2.

Particularizando los valores de I_{kminA} e I_{kmaxB} para este circuito se tiene:

I_{kminA} = 18,65 kA
I_{kmaxB} = 9,22 kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A), para protección de este circuito, es del tipo "Compact NS250N", asociado a un relé de protección magnetotérmica TM250D, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 225 A (I_n = 188,97 A < I_r = 225 A < I_{maxadm} = 235 A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 2,25 kA ($10 \cdot I_r$).

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario de mando y protección 2 (punto B) son del tipo C60H Melin Gerin (10 kA), Curva C, de calibres 16 A.

El umbral del disparo magnético de este dispositivo está en la banda de 7-10 · I_r. Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

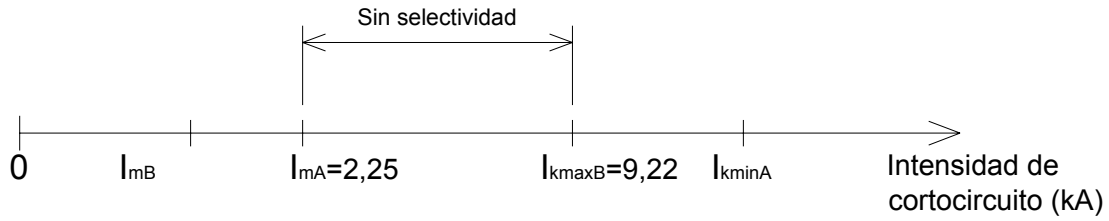


Figura 52: Selectividad amperimétrica parcial en el circuito 2 (Cuadro 2).

Por lo tanto no se tiene una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{kBmax}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

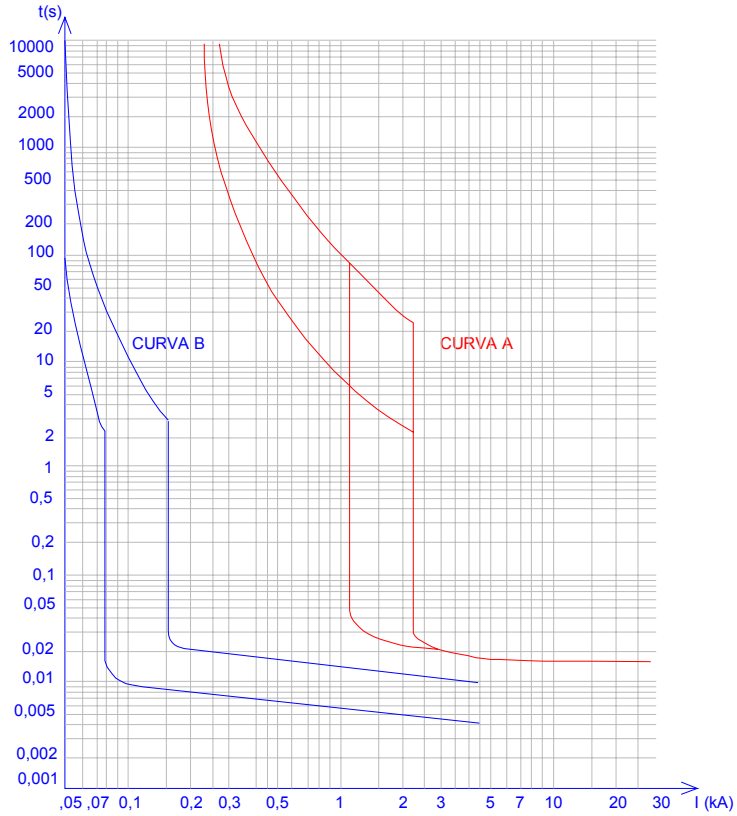


Figura 53: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 2 y Cuadro 2.

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS250N, TM250D y la curva B la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico C60H, 16 A.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 54:

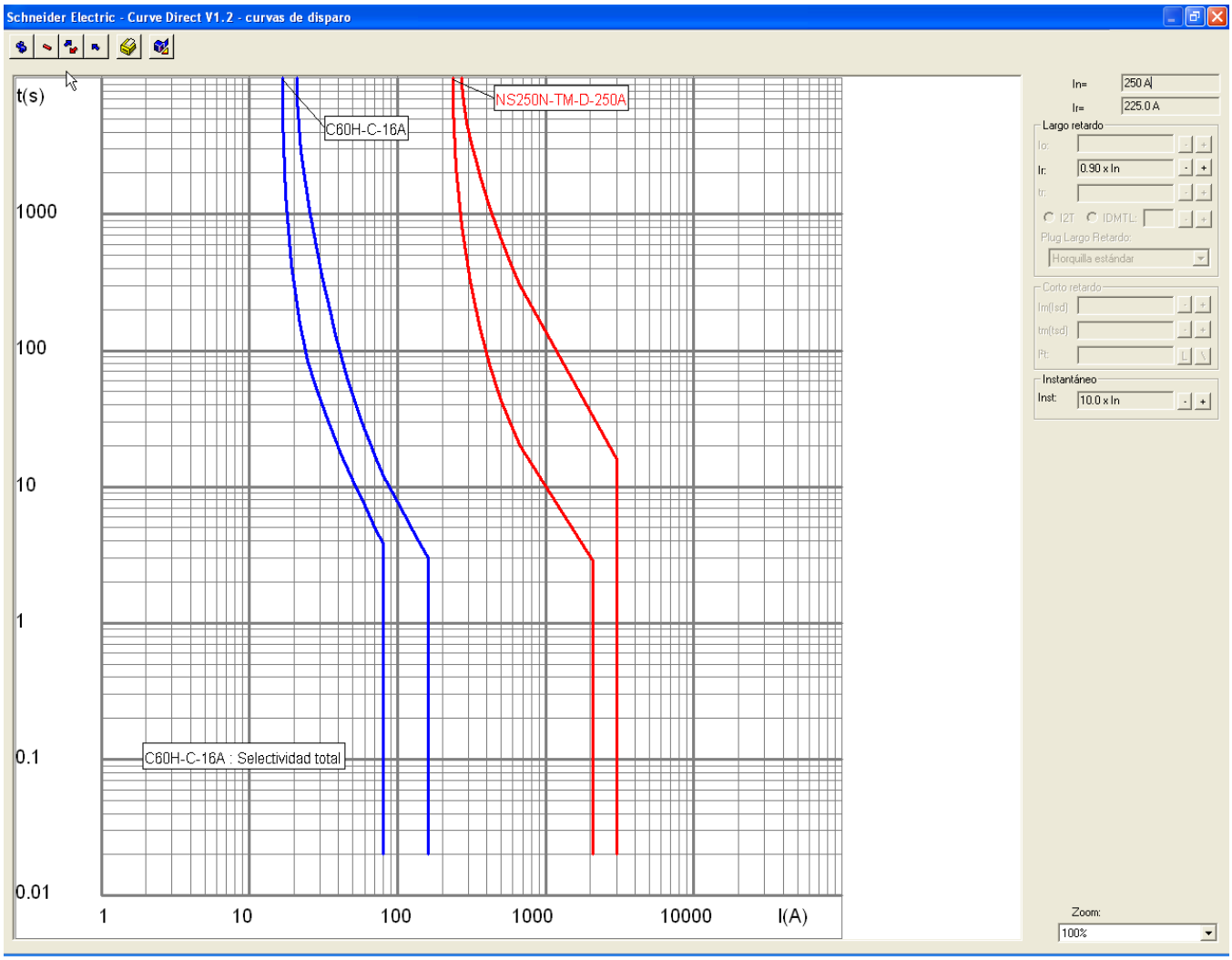


Figura 54: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, del Circuito 2 y Cuadro 2.

- **Circuito 3 (Alimentación de Cuadro 3):**

Este circuito es el de alimentación del Cuadro 3.

El valor de I_{ccmaxB} fue calculado en el apartado 3.7.8.7 resultando:

I_{ccmaxB} = 8,69 kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A), para protección de este circuito, es del tipo "Compact NS160N", asociado a un relé de protección magnetotérmica TM125D, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 125 A (I_n = 78,15 A < I_r = 125 A < I_{maxadm} = 156,64 A). El umbral de disparo I_m, para este relé, está fijado en el valor de 1,25 kA.

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario de mando y protección 3 (punto B) son del tipo C60H Melin Gerin (10 kA), Curva C, de calibres 16 A y 20 A.

1. Interruptores automáticos magnetotérmicos C60H, calibre 16 A:

El umbral del disparo magnético de este dispositivo está en la banda de 7-10 · I_r. Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

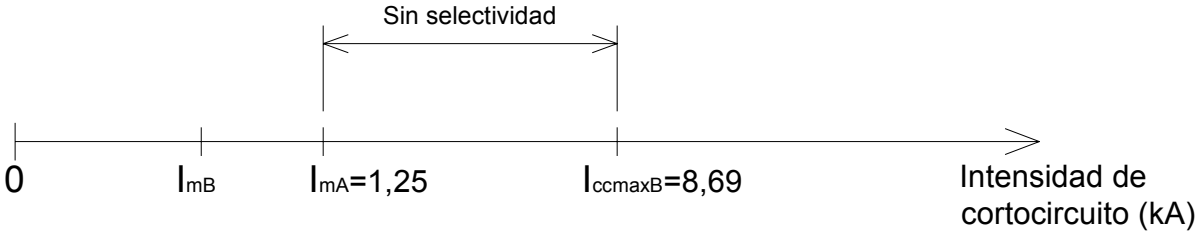


Figura 55: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 3 (Cuadro 3).

Por lo tanto no se tiene una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

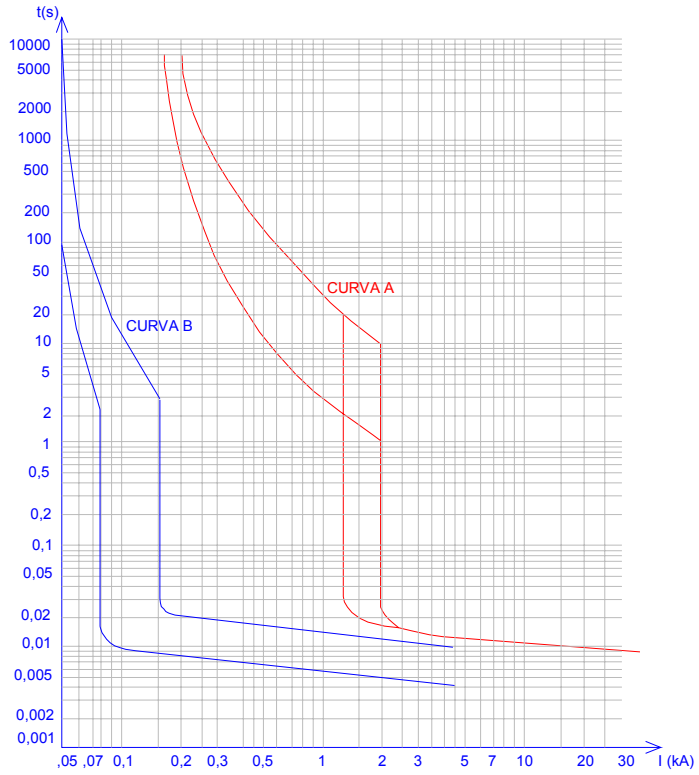


Figura 56: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 3 y Cuadro 3 (16 A)

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS160N, TM125D y la curva B la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico C60H, 16 A.

2. Interruptores automáticos magnetotérmicos C60H, calibre 20 A:

El umbral del disparo magnético de este dispositivo está en la banda de 7-10 · I_r. Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

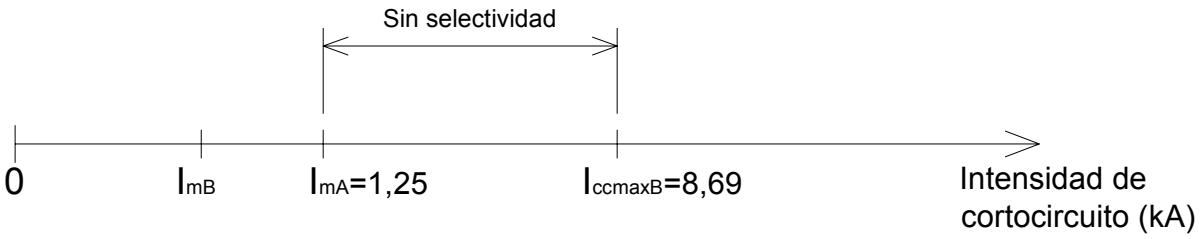


Figura 57: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 3 (Cuadro 3).

Por lo tanto no se tiene una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

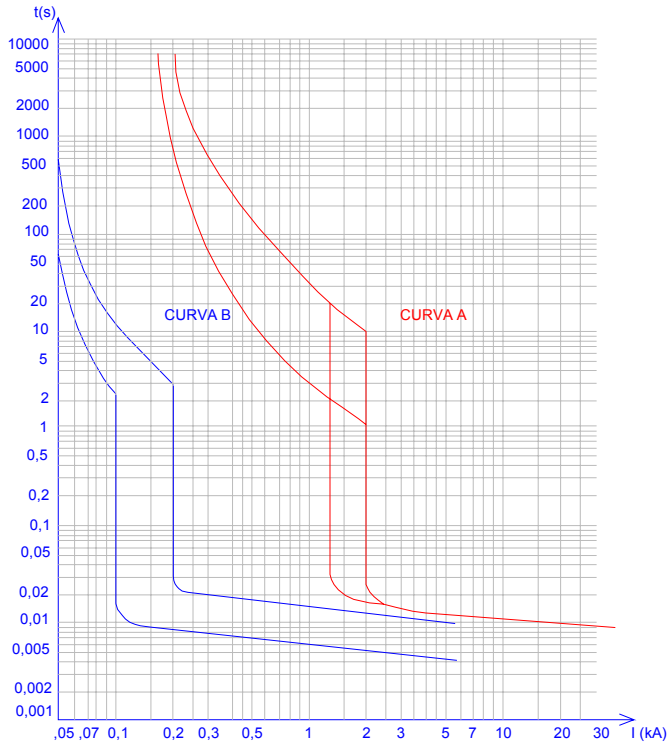


Figura 58: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 3 y Cuadro 3 (20 A).

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS160N, TM125D y la curva B la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico C60H, 20 A.

Se observa que las curvas de disparo de ambos dispositivos no quedan superpuestas, para el ámbito de las intensidades de cortocircuito entre I_{ccmaxB} e I_{ccminB}, por lo que la selectividad cronométrica es total.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 59:

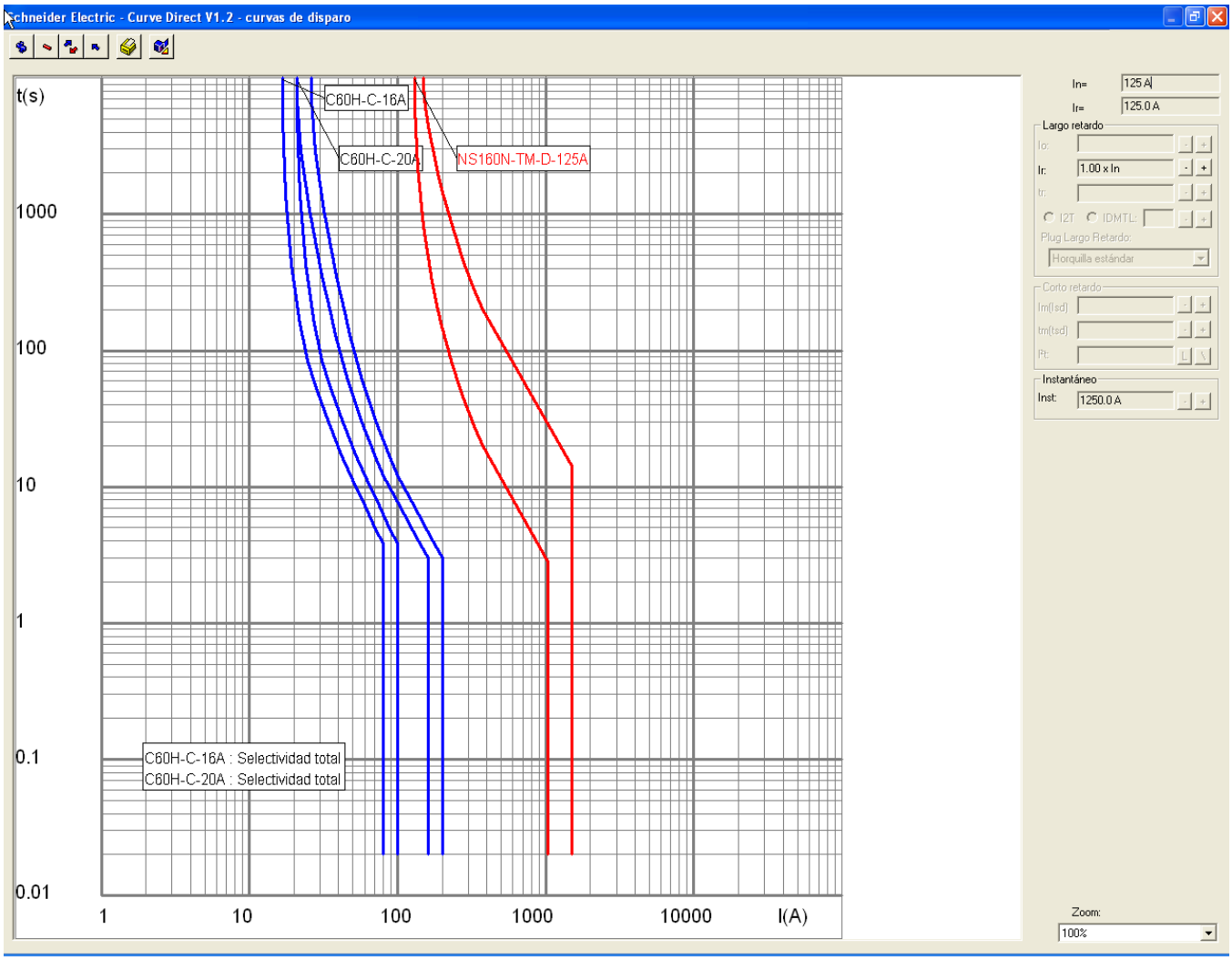


Figura 59: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, del Circuito 3 (Cuadro 3).

- **Circuito 4 (Alimentación de Cuadro 4):**

Este circuito es el de alimentación del Cuadro 4. Este circuito está compuesto por tres zonas diferenciadas, en cuanto al comportamiento frente a cortocircuitos:

- La primera zona (zona A) la constituyen los cables que forman la línea general de alimentación del Cuadro 4, que parte desde el cuadro general de baja tensión en el centro de transformación. Estos cables quedan protegidos frente a las corrientes de cortocircuito y de sobrecarga mediante interruptor automático asociado a relé magnetotérmico, en el cuadro general de baja tensión.

- La segunda zona (zona B) la constituyen los cables de alimentación de los equipos, conectados al Cuadro 4, y el Circuito 4(E.E.), de alimentación del cuadro secundario del Edificio de Explotación.

- La tercera zona (Zona C) la constituyen los cables de alimentación de los receptores del interior del Edificio de Explotación, que parten desde el Cuadro 4(E.E.).

El esquema de la instalación es representado en la Figura 60:

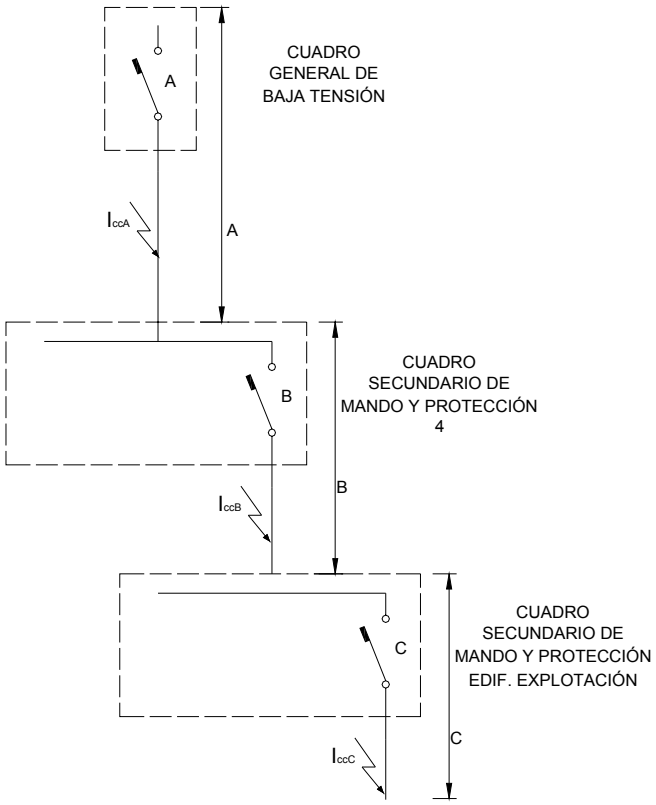


Figura 60: Zonas de la instalación del Edificio de Explotación frente al comportamiento ante un cortocircuito.

1. Circuito 4 (Cuadro 4)

En este punto se analiza la selectividad de los interruptores automáticos del Cuadro general de baja tensión y del Cuadro 4.

El valor de I_{ccmaxB} fue calculado en el apartado 3.7.8.8 resultando:

$I_{ccmaxB} = 9{,}93$ kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A), para protección del circuito 4, es del tipo “Compact NS400N”, asociado a un relé de protección magnetotérmica STR23SE, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está

regulado a un valor de I_r = 200 A (I_n = 163,70 A < I_r = 200 A < I_{maxadm} = 210,04 A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 2,00 kA ($10 \cdot I_r$).

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario de mando y protección 4 (punto B) son del tipo C120H Melin Gerin (15 kA), Curva C, de calibres 16 A y 32 A, para protección de las líneas de alimentación de los equipos conectados al Cuadro 4, y un interruptor automático, para protección del Circuito 4(E.E.) de alimentación del cuadro secundario en el Edificio de Explotación, "Compact NS160N", asociado a un relé de protección magnetotérmica STR22SE(80A), con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 80 A (I_n = 56,38 A < I_r = 80 A < I_{maxadm} = 106,80 A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 0,80 kA ($10 \cdot I_r$).

El umbral del disparo magnético de los dispositivos C120H está en la banda de 7-10 · I_r.

Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado

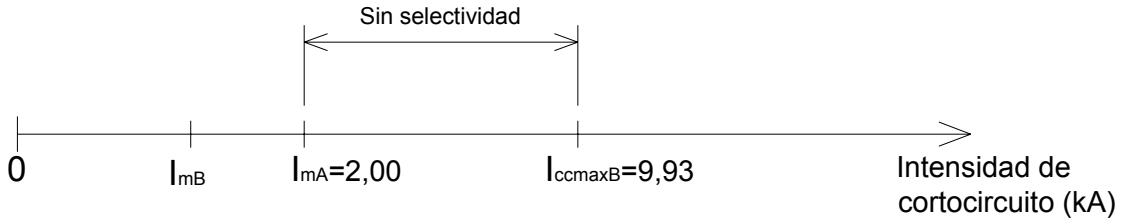


Figura 61: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 4 (Cuadro 4).

Por lo tanto no se tiene una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

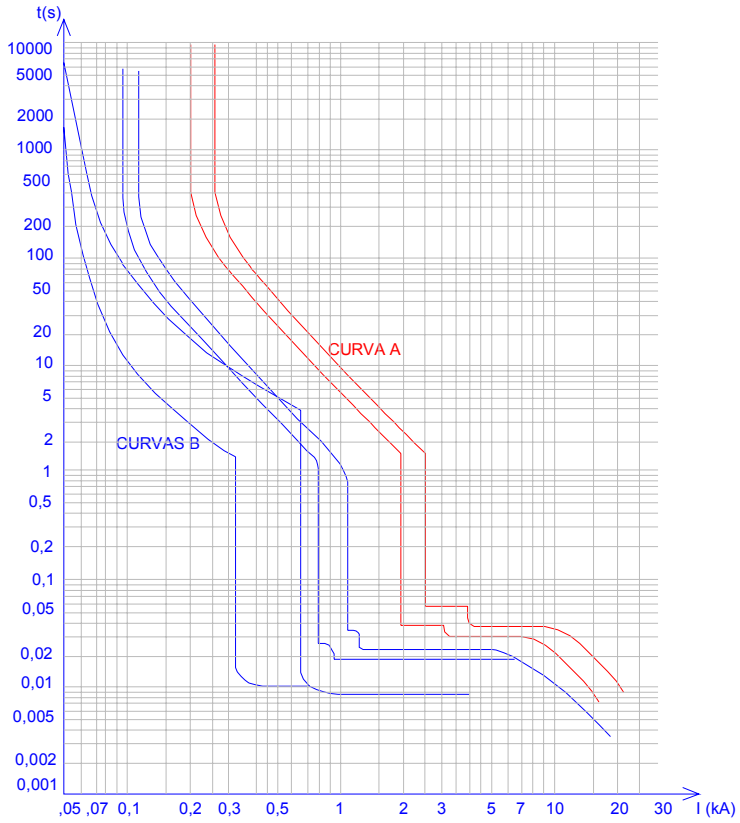


Figura 62: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 4 y Cuadro 4

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS400N, STR23SE, en el Cuadro general de baja tensión, y las curvas B representan las curvas de disparo de los interruptores automáticos magnetotérmicos C120H, 16 A y 32 A, y NS160N,STR22SE(80A), en el Cuadro 4.

Se observa que las curvas de disparo de ambos dispositivos no quedan superpuestas, para el ámbito de las intensidades de cortocircuito entre I_{ccmaxB} e I_{ccminB}, por lo que la selectividad cronométrica es total.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 63:

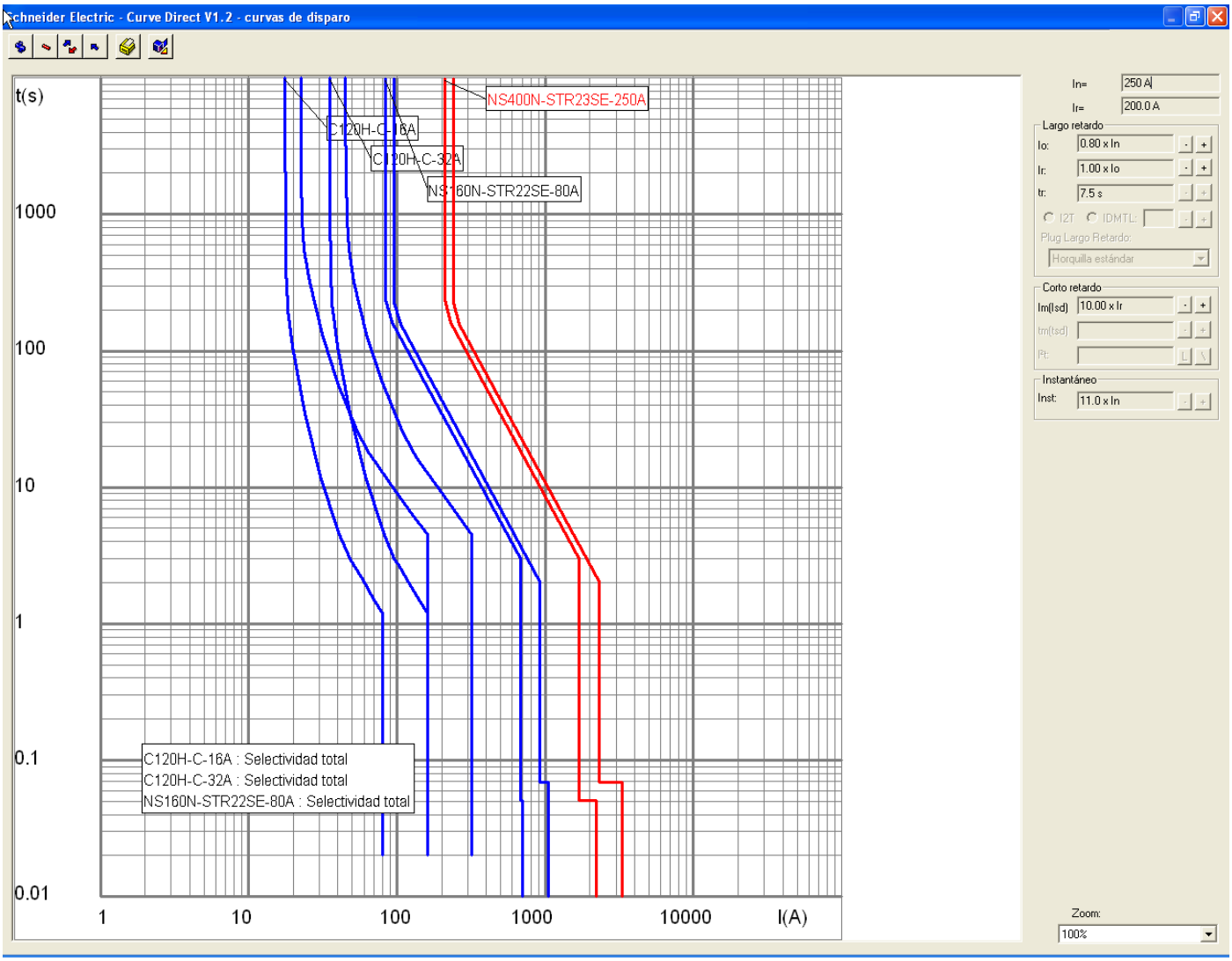


Figura 63: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, del Circuito 4 y Cuadro 4.

2. Circuito 4(E.E.) (Cuadro Edificio de Explotación)

En este punto se analiza la selectividad de los interruptores automáticos del Cuadro general de baja tensión, del interruptor automático de protección del Circuito 4(E.E.), en el Cuadro 4, y de los interruptores automáticos en el Edificio de Explotación (Cuadro (E.E.).

El valor de I_{ccmaxC} fue calculado en el apartado 3.7.8.9 resultando:

I_{ccmaxB} = 9,93 kA
I_{ccmaxC} = 4,74 kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A), para protección del circuito 4, es del tipo "Compact NS400N", asociado a un relé de protección magnetotérmica STR23SE, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 200 A (I_n = 163,70 A < I_r = 200 A < I_{maxadm} = 210,04 A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 2,00 kA ($10 \cdot I_r$).

Aguas abajo, el interruptor automático magnetotérmico instalado en el cuadro secundario de mando y protección 4 (punto B), para protección del Circuito 4(E.E.) de alimentación del cuadro secundario en el Edificio de Explotación, es un "Compact NS160N", asociado a un relé de protección magnetotérmica STR22SE(80A), con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 80 A (I_n = 56,38 A < I_r = 80 A < I_{maxadm} = 106,80 A). El valor máximo de regulación de I_m, en estas condiciones es de 0,80 kA ($10 \cdot I_r$).

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario del Edificio de Explotación (punto C) son del tipo iDPN Melin Gerin (6 kA), Curva C, de calibres 10, 16, 20, 25 y 32 A.

El umbral del disparo magnético de los dispositivos iDPN, Curva C, está en la banda de 7-10 · I_r.

Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

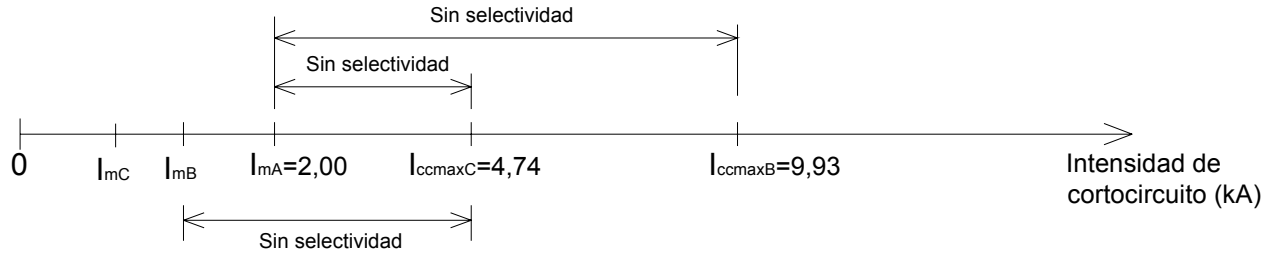


Figura 64: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 4 (Cuadro 4).

Por lo tanto no existe una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mC} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

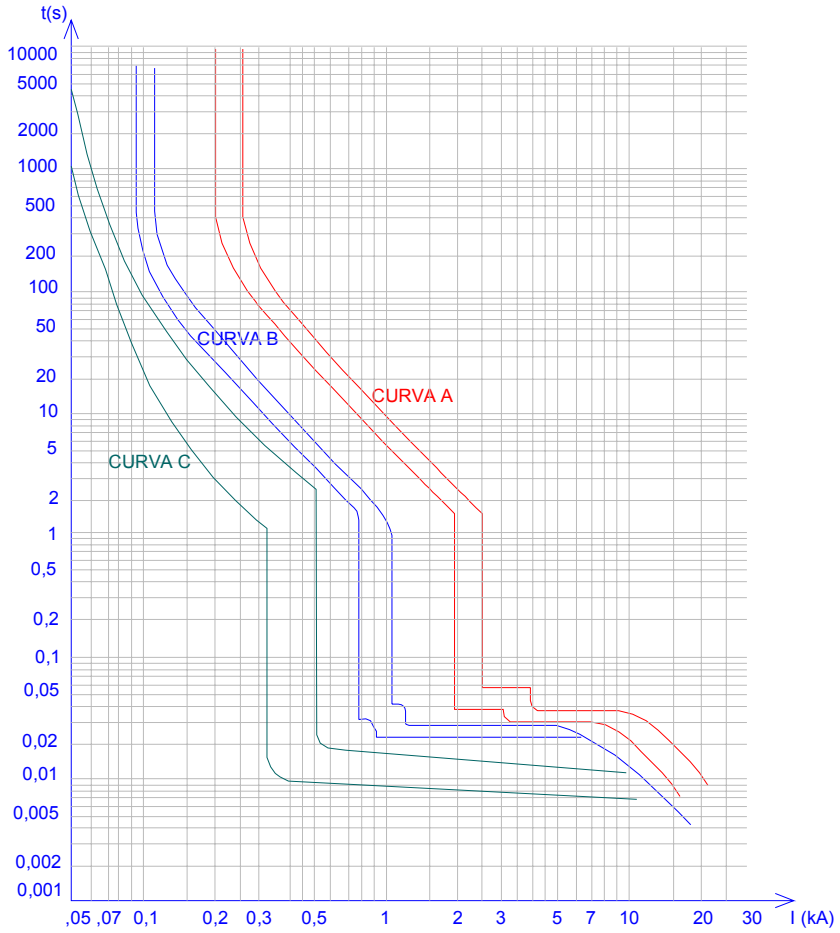


Figura 65: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 4, Cuadro 4 y Cuadro de Edificio de Explotación.

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS400N, STR23SE, en el Cuadro general de baja tensión, y la curva B representa la curva de disparo del interruptor automático magnetotérmico NS160N,STR22SE(80A), en el Cuadro 4, y la curva C representa las curvas de disparo de los interruptores automáticos magnetotérmicos iDPN, del cuadro secundario del Edificio de Explotación.

Se observa que las curvas de disparo de ambos dispositivos no quedan superpuestas, para el ámbito de las intensidades de cortocircuito entre I_{mC} e I_{ccmaxB}, por lo que la selectividad cronométrica es total.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 66:

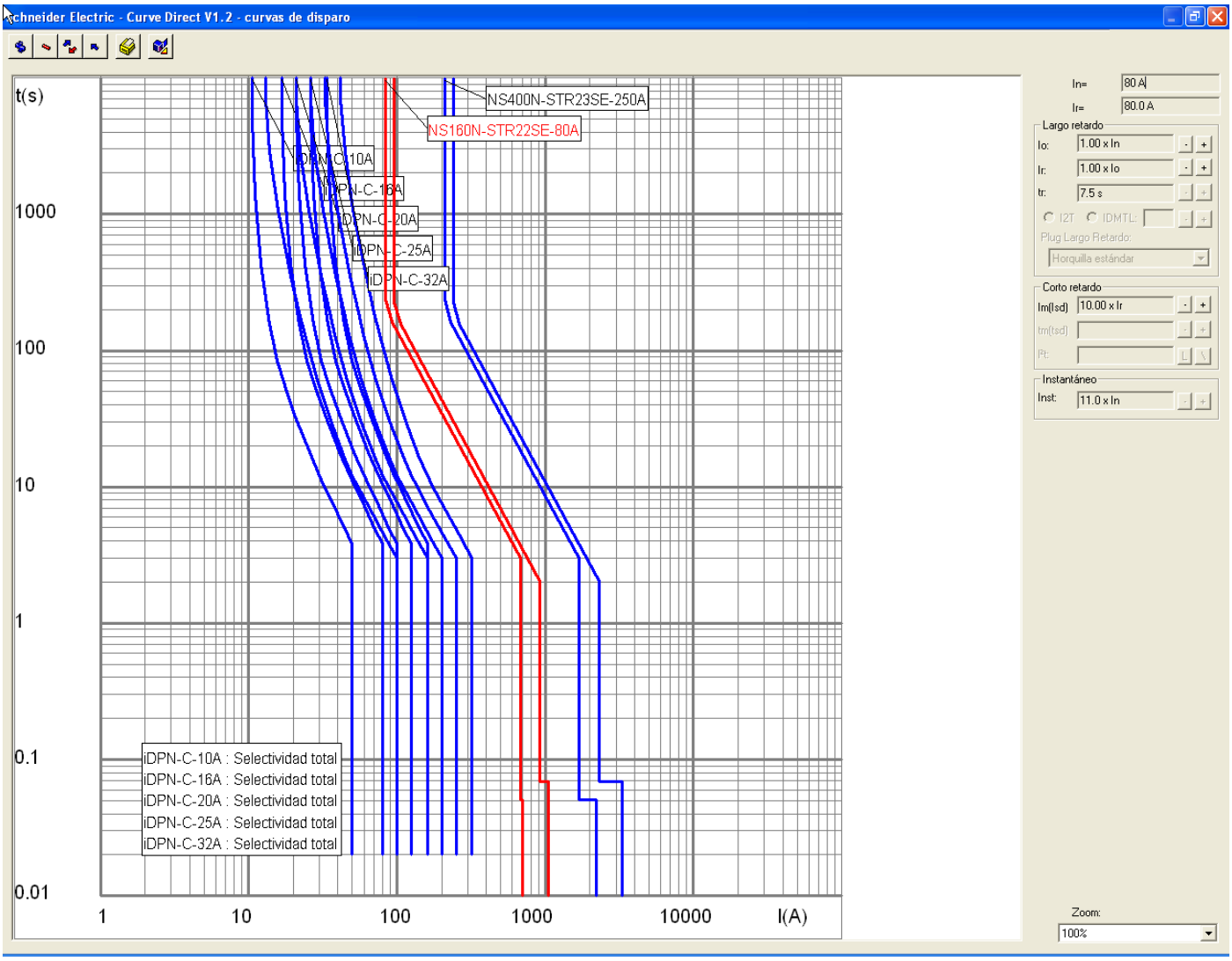


Figura 66: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, del Circuito 4, Cuadro 4 y Cuadro E.E.

- **Circuito 5 (Alimentación de Cuadro 5):**

Este circuito es el de alimentación del Cuadro 5.

El valor de I_{ccmaxB} fue calculado en el apartado 3.7.8.10 resultando:

I_{ccmaxB} = 3,56 kA

El interruptor automático instalado en el cuadro general de baja tensión (punto A), para protección de este circuito, es del tipo "Compact NS160N", asociado a un relé de protección magnetotérmica TM125D, con regulación del umbral de disparo magnético. Este dispositivo está regulado a un valor de I_r = 125 A (I_n = 81,51 A < I_r = 125 A < I_{maxadm} = 185,12 A). El umbral de disparo I_m, para este relé, está fijado en el valor de 1,25 kA.

Aguas abajo, los interruptores automáticos magnetotérmicos instalados en el cuadro secundario de mando y protección 5 (punto B) son del tipo C60N Melin Gerin (6 kA), Curva C, de calibres 16 A y 32 A.

El umbral del disparo magnético de los dispositivos C60N, Curva C, está en la banda de 7-10 · I_r. Analizando los valores anteriores se obtiene el siguiente resultado:

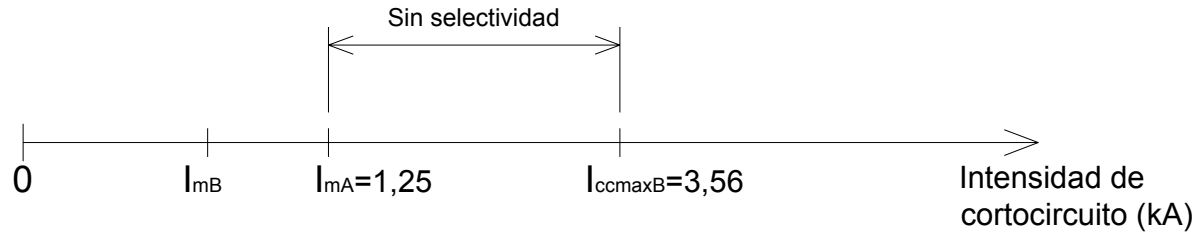


Figura 67: Selectividad amperimétrica parcial en el Circuito 3 (Cuadro 3).

Por lo tanto no existe una selectividad amperimétrica total, sino parcial, frente a las corrientes de cortocircuito, en este tramo.

Seguidamente se procede al análisis de la selectividad cronométrica en estos dispositivos. Este análisis se lleva a cabo estudiando gráficamente las curvas de disparo de los dispositivos de protección, debiendo quedar estas curvas sin solapar en la zona de las intensidades de cortocircuito entre I_{mA} e I_{ccmaxB}. Analizando las curvas de disparo de los dispositivos de protección se obtiene el siguiente resultado:

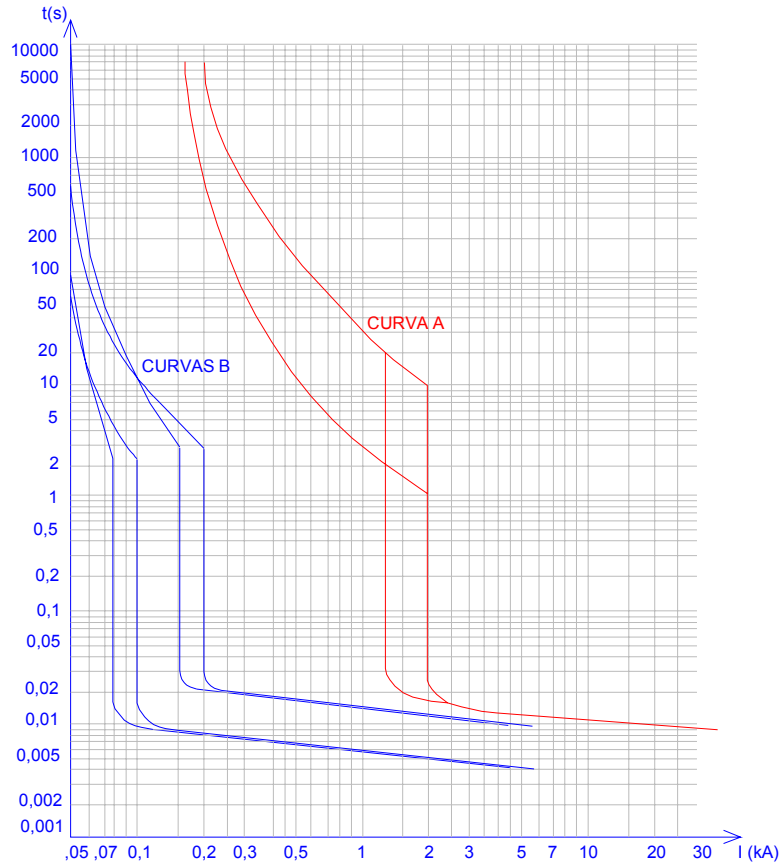


Figura 68: Curvas de disparo de los dispositivos de protección del Circuito 5 y Cuadro 5 (16 y 32 A)

donde: la curva A representa la curva de disparo del interruptor automático NS160N, TM125D y las curvas B las curvas de disparo de los interruptores automáticos magnetotérmicos C60N, 16 y 32 A.

Se observa que las curvas de disparo de ambos dispositivos no quedan superpuestas, para el ámbito de las intensidades de cortocircuito entre I_{ccmaxB} e I_{ccminB}, por lo que la selectividad cronométrica es total.

Este resultado se compara con los obtenidos de las gráficas proporcionadas por Schneider a través del programa informático EcodialV3.3, del fabricante de los dispositivos de protección (Merlín Gerin), que se representan el la Figura 69:

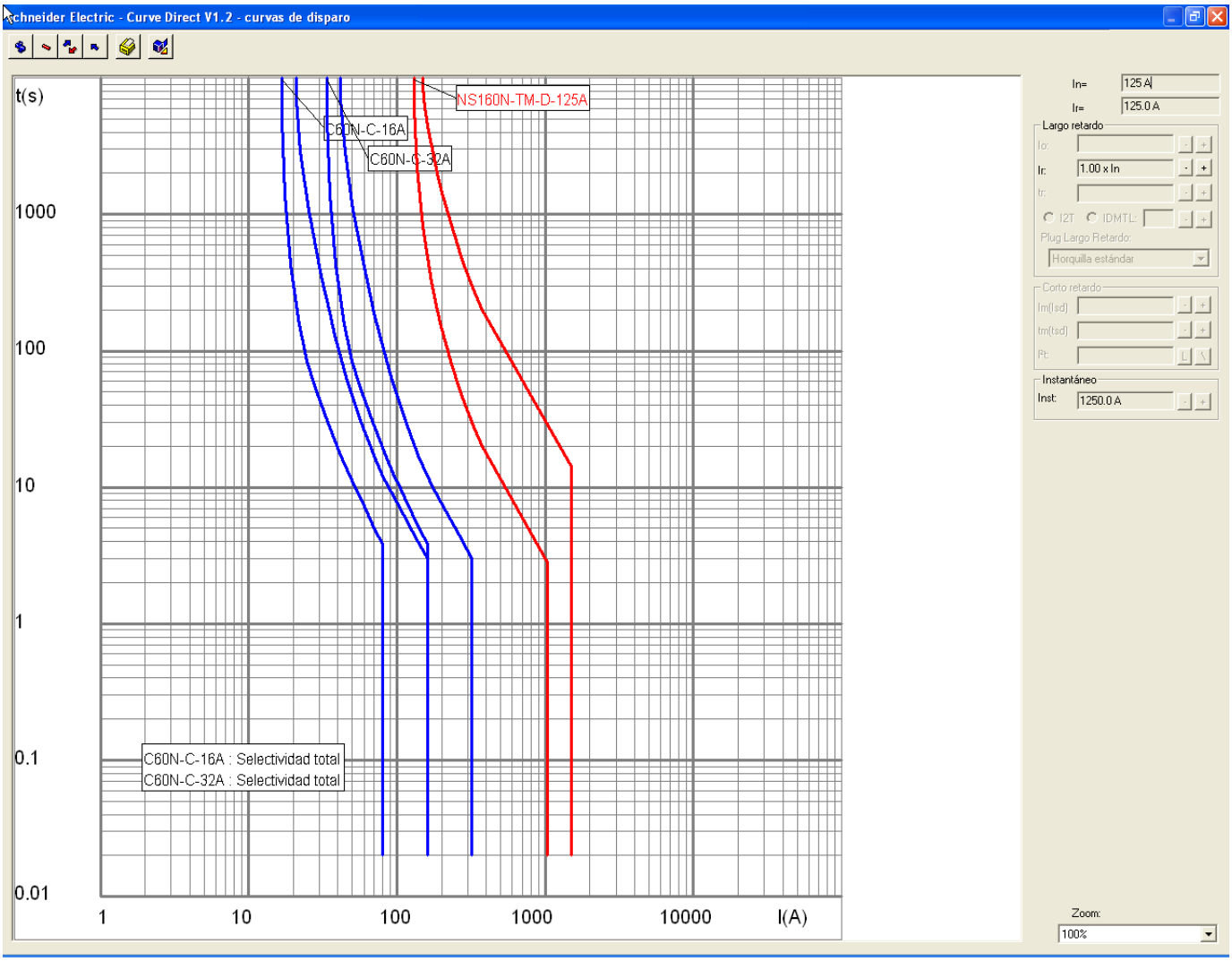


Figura 69: Curvas de disparo del fabricante de los dispositivos de protección, del Circuito 5 (Cuadro 5).

3.9.2 Selectividad de los dispositivos de protección frente a las corrientes diferenciales.

Se establece una selectividad entre los dispositivos de protección frente a las corrientes de derivación a tierra, es decir, entre los relés e interruptores diferenciales. Esta selectividad es del tipo cronométrica, de forma que el tiempo de respuesta de los dispositivos será menor conforme más aguas abajo se encuentre, y por la sensibilidad de los dispositivos, de forma que los dispositivos colocados más aguas abajo actúen frente a corrientes de defecto menores.

La instalación eléctrica en cuestión está compuesta por dos zonas diferenciadas, en cuanto a la actuación de las protecciones frente a un defecto a tierra:

- La primera zona (zona A) la constituyen los cables que forman las líneas generales de alimentación, que parten desde el cuadro general de baja tensión, en el centro de transformación, y se dirigen hacia los diferentes cuadros secundarios de mando y protección. Estos cables quedan protegidos frente a las corrientes de defecto mediante toroidales de medida de intensidad diferencial residual asociados a relés de detección de defectos diferenciales de la seria Vigirex de Merlin Gerin. Estos relés están a su vez asociados a los interruptores automáticos de la serie Compact, ubicados todos estos en el cuadro general de baja tensión, en el centro de transformación.

- La segunda zona (zona B) la constituyen los cables de alimentación de los equipos, que parten desde los cuadros secundarios de mando y protección y se dirigen hacia los equipos que forman la instalación de la E.D.A.R. Estos cables quedan protegidos frente a las corrientes de defecto mediante interruptores diferenciales, de la serie Multi 9 de Merlín Gerin, de disparo instantáneo.

3.9.2.1 Selectividad por sensibilidad de los dispositivos.

Los dispositivos de protección diferencial ubicados en el cuadro general de baja tensión, son relés diferenciales asociados a interruptores automáticos de la serie Compact, de Merlin Gerin. Estos relés diferenciales tienen las características de poder ser regulados en sensibilidad, es decir, puede establecerse la corriente de defecto a tierra a partir de la cual se produce el disparo del

dispositivo. Estos relés diferenciales, que protegen a las líneas generales de alimentación, están regulados para actuar ante una corriente de defecto mínima de 500 mA.

Los dispositivos de protección diferencial ubicados en los cuadros secundarios tienen un tarado de sensibilidad fijo de 300 mA, por lo que estos actuarán frente a una corriente diferencial superior a 300 mA, sin posibilidad de regulación.

El esquema de actuación de estos dispositivos puede observarse en la Figura 70:

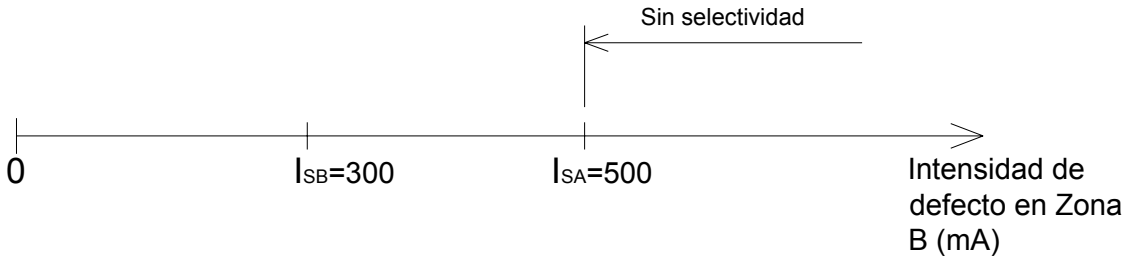


Figura 70: Selectividad en función de la sensibilidad de los dispositivos.

donde I_s es la sensibilidad de los dispositivos de la zona A y B, respectivamente.

De esta forma, para una corriente de fuga superior a 500 mA en la Zona B, podría producirse el disparo de las protecciones colocadas tanto en la Zona A como en la Zona B. Por lo tanto no existe selectividad total, sino parcial (entre 300 y 500 mA si existe selectividad), en cuanto a la sensibilidad de los dispositivos.

3.9.2.2 Selectividad cronométrica.

Los dispositivos de protección diferencial ubicados en el cuadro general de baja tensión, son relés diferenciales asociados a interruptores automáticos de la serie Compact, que tiene la característica de poder ser regulados en cuanto al tiempo de disparo, entre 0 y 310 ms. Estos relés

diferenciales, que protegen a las líneas generales de alimentación, están regulados para un tiempo de no funcionamiento de 310 ms.

Los dispositivos de protección diferencial ubicados en los cuadros secundarios (Zona B) tienen un tiempo de funcionamiento instantáneo.

Por esta razón, en el caso de producirse una corriente de defecto superior a 500 mA en la Zona B, corriente detectada por ambos dispositivos (los ubicados en las Zonas A y B), solo actuará el dispositivo situado en la Zona B, por realizarse su disparo de forma instantánea, frente al dispositivo situado en la Zona A que necesita 310 ms para actuar.

Por ello existe una selectividad cronométrica total entre los dispositivos de protección diferencial de la instalación.

3.10 CÁLCULO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA DEL EDIFICIO

La red de puesta a tierra está compuesta por electrodos enterrados, en íntimo contacto con el terreno natural, a una profundidad de 0,5 m. Los electrodos son del tipo picas de acero, cobrizadas en su exterior, de 14 mm de diámetro y 1 m de longitud, para las picas colocadas a pie de farola, y 2 m de longitud, para las picas colocadas en los cuadros secundarios de mando y protección. Además estas picas quedan conectadas eléctricamente por los cables de protección que forman el alumbrado exterior, consiguiendo así una red de puesta a tierra equipotencial en toda la E.D.A.R.

La armadura metálica que forma parte de los elementos constructivos se conectan a tierra en cada zapata de la cimentación. Esta tierra está formada por un conductor de cobre desnudo de 50 mm^2 enterrado horizontalmente en el terreno bajo las vigas riostras de la cimentación, en íntimo contacto con el terreno, sin quedar embutidas en el hormigón. Además, esta tierra se conecta al resto de las tierras de alumbrado exterior y cuadros secundarios de mando y protección, quedando separadas al menos 5 m de la puesta a tierra de servicio del centro de transformación.

El tipo de terreno en el cual se encuentra la instalación es del tipo arcilla plástica, con una resistividad teórica de 50 Ω·m, según la tabla 3 de la ITC-BT-18 del REBT. La instalación de puesta a tierra cuenta con un total de 17 picas de 1 m de longitud y 5 picas de 2 m de longitud, unidas eléctricamente.

Según la tabla 5 de la ITC-BT-18 del REBT, la resistencia de puesta a tierra de una pica enterrada verticalmente, a una profundidad de la parte superior de la pica a 0,5 m, viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{L}$$

donde:

R es la resistencia de tierra en el electrodo (Ω).

ρ es la resistividad del terreno (Ω·m).

L es la longitud de la pica (m).

Considerando la resistencia de los cables de 16 mm^2 y 35 mm^2 de cobre despreciable frente a la resistencia de puesta a tierra de los electrodos, se tendrá una resistencia de puesta a tierra total de:

- Resistencia de 17 picas de 1 m de longitud:

$$R_{(1m)} = \frac{1}{17}\cdot\frac{\rho}{L} = \frac{50}{17\cdot 1} = 2{,}9412\Omega$$

- Resistencia de puesta a tierra de 5 picas de 2 m de longitud:

$$R_{(2m)} = \frac{1}{5}\cdot\frac{\rho}{L} = \frac{50}{5\cdot 2} = 5{,}00\Omega$$

- Resistencia de puesta a tierra total:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{(1m)}} + \frac{1}{R_{(2m)}} = \frac{1}{2{,}9412} + \frac{1}{5} = 0{,}54\Omega^{-1}$$

Por lo que se tiene una resistencia de puesta a tierra global de la instalación de:

$$R_T = 1{,}852\Omega$$

Teniendo en cuenta que la tensión máxima admisible de contacto es de 24 V, se tiene una resistencia de puesta a tierra máxima de:

$$R_T < R_{T(\max)} = \frac{U}{I_d} = \frac{24}{0{,}500} = 12\Omega$$

donde:

$R_{T(max)}$ es la el valor máximo de resistencia de puesta a tierra que puede darse en la instalación.

U es la tensión máxima admisible de contacto (24 V).

I_d es la intensidad de defecto máxima que puede darse, regulada por la sensibilidad de los interruptores diferenciales.

Por lo que se cumple que $R_T = 1{,}852\Omega < R_{T(\max)} = 12\Omega$