



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cálculo de secciones de conductores aislados en instalaciones subterráneas de alta tensión. Verificación mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F.)

Determination of the cross-section of high voltage insulated conductors in underground installation. Verification by the Finite Element Method (F.E.M.)

Autor

Pablo Munuera Mínguez

Directores

Antonio Usón Sardaña

Jesús Letosa Fleta

Titulación

Ingeniería eléctrica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2023

Cálculo de secciones de conductores aislados en instalaciones subterráneas de alta tensión. Verificación mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F.)

Resumen.

La temperatura de la capa aislante de un conductor aislado de alta tensión es el factor limitante de la potencia máxima que puede transportar. El trabajo consiste en el cálculo de la sección de conductores aislados siguiendo el procedimiento indicado por el reglamento y en la norma UNE 21144. Posteriormente, se ha realizado un modelo bidimensional en FEMM que ha permitido el cálculo térmico mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F.) de la evacuación de calor y de las temperaturas en el aislante para el régimen nominal de funcionamiento. Posteriormente se han comparado y analizado los resultados obtenidos por los dos procedimientos.

Abstract.

The temperature of the insulating layer of a high-voltage insulated conductor is the limiting factor of the maximum power that it can transport. The work consists of the calculation of the cross-section of insulated conductors following the procedure indicated by the regulation and in the UNE 21144 standard. Subsequently, a two-dimensional model has been made in FEMM that has allowed the thermal calculation by the Finite Element Method (F.E.M.) of the heat dissipation and the temperatures in the insulator for the nominal operating regime. Subsequently, the results obtained by the two procedures have been compared and analyzed.

Índice.

1. Introducción.....	6
2. Objetivo.....	9
3. Características de la instalación.....	10
3.1 Características generales de la línea.....	10
4. Cálculo eléctrico.....	11
4.1 Fórmulas usadas.....	11
5. Estimación de temperaturas mediante el método de elementos finitos (MEF)...	23
6. Conclusiones.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los materiales usados.....	10
Tabla 2. Diámetros bajo aislamiento del conductor de aluminio según sección de Voltalene.....	13
Tabla 3. Equivalencias entre designaciones Prysmian para cables Voltalene y designaciones UNE.....	13
Tabla 4. Niveles de aislamiento de los cables y sus accesorios.....	15
Tabla 5. Factor de corrección, F, para temperatura del terreno distinta de 25°C.....	16
Tabla 6. Factores de corrección para profundidades de la instalación distintas de 1 m.....	16
Tabla 7. Factor de corrección por distancia entre ternos o cables tripolares.....	17
Tabla 8. Resistividad térmica del terreno en función de su naturaleza y humedad.....	17
Tabla 9. Factor de corrección para resistividad térmica del terreno distinta de 1,5 K.m/W.....	18
Tabla 10. Cables aislados con aislamiento seco. Temperatura máxima, en °C, asignada al conductor.....	19
Tabla 11. Densidad máxima admisible de corriente de cortocircuito, en A/mm ² , para conductores de aluminio.....	20
Tabla 12. Intensidades máximas admisibles (A) en servicio permanente y con corriente alterna. Cables unipolares aislados de hasta 18/30 kV bajo tubo.....	21
Tabla 13. Reactancia inductiva según la sección del conductor por el fabricante.....	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de las partes de un cable aislado.....	11
Figura 2. Dibujo de las partes de un cable aislado.....	11
Figura 3. Representación de un cable unipolar y los diámetros a los que se refiere la Tabla 2.....	13
Figura 4. Representación de la distancia a la que se refiere la Tabla 7.....	17
Figura 5. Gráficas representando el tiempo que tardan en llegar a temperatura máxima en cortocircuito.....	19
Figura 6. Modelos bidimensionales empleados en el cálculo numérico.....	24
Figura 7. Imagen ampliada de la Fig. 6 con detalle de los conductores.....	24
Figura 8. Cálculo del programa Femm.....	25
Figura 9. Resultados del circuito “fase A”.....	25
Figura 10. Modelo lineal en problema de flujo de calor.....	26
Figura 11. Temperatura máxima en modelo lineal en problema de flujo de calor.....	26
Figura 12. Modelo triangular en problema de flujo de calor.....	26
Figura 13. Temperatura máxima en modelo triangular en problema de flujo de calor.....	27
Figura 14. Modelo lineal con condición de contorno en tubo PVC.....	27
Figura 15. Temperatura máxima en modelo lineal en problema de flujo de calor.....	28
Figura 16. Modelo triangular con condición de contorno en tubo PVC.....	28
Figura 17. Temperatura máxima modelo triangular con condición contorno en tubo PVC.....	28

1. Introducción.

La transmisión de energía eléctrica en alta tensión es una actividad fundamental para el desarrollo económico y social de cualquier país. Sin embargo, esta actividad implica también una serie de retos técnicos y ambientales que deben ser abordados con criterios de eficiencia, seguridad y sostenibilidad. Uno de estos retos es el diseño óptimo de los conductores aislados que se emplean para la distribución subterránea de la energía eléctrica.

Los conductores aislados son cables que poseen una capa de material aislante que los recubre y los protege de las posibles fugas de corriente o de las interferencias con otras canalizaciones. Estos cables se usan para la transmisión de energía eléctrica en alta tensión de forma aislada, ideal para redes subterráneas y submarinas. A diferencia de los conductores desnudos, que están aislados por el aire circundante y se usan para la transmisión aérea, los conductores aislados requieren un mayor control del campo eléctrico y térmico que se genera en su interior. El correcto diseño dieléctrico de los cables aislados es fundamental, tal como lo demuestran estudios como [1]

La temperatura de la capa aislante de un conductor aislado es el factor limitante de la potencia máxima que puede transportar. Si la temperatura supera el valor máximo admisible por el material aislante, se puede producir un deterioro irreversible del mismo, que afectaría a la vida útil del cable y a su capacidad de transmisión. Por ello, es necesario calcular la sección adecuada de los conductores aislados, teniendo en cuenta las condiciones térmicas del entorno y el régimen de carga al que están sometidos.

El presente trabajo fin de grado (TFG) tiene como título “Cálculo de secciones de conductores aislados en instalaciones subterráneas de alta tensión. Verificación mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F.)” y ha sido realizado por el alumno (**Pablo Munuera Mínguez**) bajo la dirección del profesor **Antonio Usón Sardaña** y el cotutor **Jesús Letosa Fleita**, pertenecientes al Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática Industrial de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) de la Universidad de Zaragoza.

El objetivo general de este TFG es realizar el cálculo de la sección de unos conductores aislados siguiendo el Reglamento de Alta Tensión [2] y la norma UNE 21144 [3][4], que establece un procedimiento largo y complejo para el cálculo de la sección mínima de un conductor aislado en función de las características térmicas de

la instalación, distinguiendo claramente entre tramos aéreos y tramos subterráneos. El objetivo es no superar en ningún caso una temperatura límite en la capa aislante, que depende del material.

Las tareas del presente trabajo son las siguientes:

- Realizar un modelo bidimensional en el programa FEMM4.2 para el cálculo térmico mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F.) de la evacuación de calor y de las temperaturas en el aislante para el régimen nominal de funcionamiento.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos en los dos procedimientos y sacar conclusiones.

La hipótesis o pregunta que plantea este TFG sería si los valores de la sección mínima de los conductores aislados en instalaciones subterráneas de alta tensión obtenidos mediante el reglamento y la norma UNE 21144 son iguales o muy similares a los obtenidos mediante la simulación con FEMM4.2, lo que demuestra la validez y la fiabilidad del reglamento.

La metodología que se ha seguido para desarrollar este TFG ha sido la siguiente:

- Definir una instalación y sus características de funcionamiento.
- Seleccionar el conductor aislado para una determinada instalación mediante el procedimiento indicado en la norma.
- Realización del modelo del conductor en FEMM y cálculo de las temperaturas en el régimen nominal.
- Análisis y comparación de los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos.

La estructura y el contenido de los capítulos de este TFG son los siguientes:

- Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se presenta el contexto, el objetivo, los objetivos específicos, la hipótesis o pregunta de investigación, la metodología y la estructura del TFG.
- Capítulo 2: Marco teórico. En este capítulo se revisan los conceptos teóricos necesarios para comprender el problema planteado y las herramientas utilizadas para resolverlo. Se explican las características de los conductores

-

-
- aislados, el reglamento y la norma UNE 21144, el programa FEMM4.2 y el Método de Elementos Finitos (M.E.F.).
- Capítulo 3: Desarrollo del trabajo. En este capítulo se describe el desarrollo del trabajo, detallando los pasos seguidos para realizar el cálculo de la sección de los conductores aislados según la norma y para realizar el modelo bidimensional en FEMM4.2 y el cálculo térmico mediante el M.E.F.
- Capítulo 4: Resultados y discusión. En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos por los dos procedimientos, comparándolos entre sí y con los valores teóricos o experimentales disponibles en la literatura. Se discute la validez y la fiabilidad de los resultados, así como las posibles fuentes de error o incertidumbre.
- Capítulo 5: Conclusiones y propuestas de mejora. En este capítulo se resumen las principales conclusiones extraídas del trabajo, respondiendo a la hipótesis o pregunta de investigación planteada. Se evalúa el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos y se sugieren posibles mejoras o líneas de trabajo futuras.

2. Objetivo.

Se parte de una línea de 15 kV aislada y con unas características específicas. Se trata de una línea proyectada como ejemplo real de 960 m enterrados y 300 m en bandeja en una nave, teniendo una potencia de 2520 kVA. [5]

El objetivo de este proyecto es calcular la sección necesaria de esta línea para que cumpla con los reglamentos [2] usando la norma UNE 21144 [3][4]. Una vez sacado este dato, realizar una simulación bidimensional en FEMM para sacar el cálculo térmico mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F.) de la evacuación de calor y de las temperaturas en el aislante para el régimen nominal de funcionamiento y comparar y analizar los resultados obtenidos en los dos procedimientos y sacar conclusiones.

3. Características de la instalación.

3.1. Características generales de la línea

- Sistema: Corriente alterna trifásica
- Frecuencia: 50 Hz
- Tensión nominal: 15 kV
- Potencia de línea: 2520 kVA
- Número de circuitos: 1
- Número de conductores por fase: 1
- Disposición de los cables: trébol
- Longitud de la línea: 960m enterrados
- fdp: 0'9
- Neutro aislado de tierra en origen de línea
- $S_{cc}=375$ MVA con tiempo disparo ante cortocircuito trifásico 0.4 s
- Máxima caída de tensión admisible 5%
- Cable XLPE, pantalla radial y cubierta de poliolefina de aluminio.

Los cables unipolares se encuentran bajo tubo de propileno de 160 mm \varnothing_{ext}

Terreno arenoso muy seco. A 1'25 m de profundidad y temperatura de 30°C

Materiales	Propiedades lineales relativas	Conductividad eléctrica [$\frac{MS}{m}$]	Conductividad térmica [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Capacidad calorífica volumétrica [$\frac{MJ}{m^3 \cdot K}$]	Generación de calor volumétrico [$\frac{W}{m^3}$]
Aire	1	0	0.0181	0.001185	0
Tierra	1	0.001	0.25	1.5	0
PVC	1	0	0.2	0.00088	0
Polioletina de aluminio	1	0	1.209	2	0
Semiconductor (polietileno)	1	0	0.5	3	0
XLPE	2.3	0	0.25	5	0
Aluminio	1	38	200	2.43	28107

Tabla 1: Propiedades de los materiales usados

Las propiedades físicas empleadas en el presente trabajo se han obtenido de los catálogos de los fabricantes, de la norma [3][4] y de la base de datos incluida en el programa femm.

Las características del cable aislado son las siguientes: [6]



Fig. 1: Descripción de las partes de un cable aislado.



Fig. 2: Dibujo de las partes de un cable aislado.

4. Cálculo eléctrico

En el siguiente apartado, se explican y analizan todos los cálculos eléctricos para hallar la sección y amperaje que se necesita con las características de la línea.

4.1. Fórmulas usadas.

Las fórmulas que se han usado para el cálculo eléctrico más relevantes son las siguientes:

Para hallar el valor de corriente en línea, se ha usado

$$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_L \rightarrow I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad (4.1)$$

$$S = \text{Potencia aparente [VA]}$$

$$U_N = \text{Tensión nominal [V]}$$

$$I_L = \text{Corriente de línea [A]}$$

Corriente admisible

$$I'_Z = I' \cdot K'_1 \cdot K'_2 \cdot K'_3 \cdot K'_4 \quad (4.2)$$

$K'_1, K'_2, K'_3, K'_4 =$ factores de corrección

$I =$ Corriente máxima admisible [A]

$I_Z =$ corriente máxima admisible con los factores de corrección [A]

Corriente en cortocircuito:

$$\frac{I_{cc}}{S} = \frac{K}{\sqrt{t_{cc}}} \quad (4.3)$$

$I_{cc} =$ Corriente de cortocircuito [A]

$t_{cc} =$ Tiempo de cortocircuito [s]

$S =$ Superficie [mm²]

$K =$ Coeficiente dependiente del conductor y temperaturas inicial y final

Factor de corrección. Densidad de corriente de cortocircuito:

$$K_{\text{corregida}} = K \cdot \sqrt{\frac{\text{Ln} \left(\frac{\theta_{cc} + \beta}{\theta_i + \beta} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{\theta_{cc} + \beta}{\theta_s + \beta} \right)}} \quad (4.4)$$

$\beta = 228$ para el aluminio

$\theta_i =$ Temperatura inicial [K]

$\theta_s =$ Temperatura servicio permanente [K]

$\theta_{cc} =$ Temperatura en cortocircuito [K]

Caída de tensión:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot (R_k \cdot \cos \varphi + X_k \cdot \text{sen } \varphi) \quad (4.5)$$

$l =$ distancia de la línea [km]

$R_k =$ Resistencia por kilómetro [Ω]

$X_k =$ Reactancia por kilómetro [Ω]

Sección mm ²	d Cuerda mm	d' Semic. int. mm	D sobre aislamiento						
			1,8/3 kV	3,6/6 kV	6/10 kV	8,7/15 kV	12/20 kV	15/25 kV	18/30 kV
Conductor de Al									
35	7	8	11	13	14,8	17	19	-	-
50	8,1	9,1	12,1	14,1	15,9	18,1	20,1	22,7	25,1
70	9,8	10,8	13,8	15,8	17,6	19,8	21,8	24,4	26,8
95	11,2	12,2	15,2	17,2	19	21,2	23,3	25,8	28,3
120	12,7	13,7	16,7	18,7	20,5	22,7	24,7	27,3	29,7
150	14	15	18	20	21,8	24	26,1	28,6	31,2
185	16,1	17,1	20,1	22,1	23,9	26,1	28,1	30,7	33,1
240	17,9	19,3	21,9	24,5	26,1	28,3	30,2	32,9	34,5
300	20,6	22	24,6	27,6	28,8	31	33	35,6	38
400	23,1	24,5	27,1	30,5	31,3	33,5	35,5	38,1	40,6
500	26,3	28,3	30,7	34,7	35,1	37,3	39,3	41,9	44,3

Tabla 2: Diámetros bajo aislamiento del conductor de aluminio según sección de Voltalene. [6]

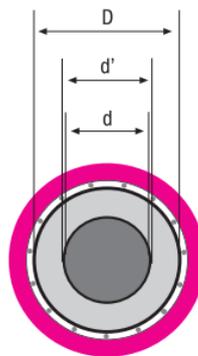


Fig 3: Representación de un cable unipolar y los diámetros a los que se refiere la Tabla 2.

VOLTALENE	FORMACIÓN	PANTALLA	ARMADURA	DENOMINACIÓN UNE	
				CAMPO NO RADIAL (1)	CAMPO RADIAL
H	Unipolar	Sí	No	-	RHZ1
	Tripolar	Individual sobre cada fase	No		
FA	Unipolar	No	Flejes aluminio	RFAV	-
F	Tripolar		Flejes acero	RFV	
HFA	Unipolar	Sí	Flejes aluminio	-	RHVFAV
HF	Tripolar		Flejes acero	-	RHVFV
MA	Unipolar	No	Alambres de aluminio ²	RMAV	-
M	Tripolar		Alambres de acero	RMV	-
HMA	Unipolar	Sí	Alambres de aluminio ²	-	RHVMAV
HM	Tripolar		Alambres de acero	-	RHVMV
P	Unipolar o Tripolar	Con tubo de plomo		RPV	
HP ³		Con tubo de plomo y apantallado individual			RHVPV
O		Con pantalla conjunta		ROZ1	

Tabla 3: Equivalencias entre designaciones Prysmian para cables Voltalene y designaciones UNE. [6]

Como tenemos una tensión de 15 kV, nos vamos a la Tabla 1 de la ITC-LAT 06 [2] reglamento y observamos que la Tensión más elevada de la red será 17,5 kV.

Según la duración máximo de defecto, miraremos las diferentes categorías.

Categoría A:

Los defectos a tierra se eliminan tan rápidamente como sea posible y en cualquier caso antes de 1 minuto.

Categoría B:

Comprende las redes que, en caso de defecto, sólo funcionan con una fase a tierra durante un tiempo limitado. Generalmente la duración de este funcionamiento no debería exceder de 1 hora, pero podrá admitirse una duración mayor cuando así se especifique en la norma particular del tipo de cable y accesorios considerados. Conviene tener presente que en una red en la que un defecto a tierra no se elimina automática y rápidamente, los esfuerzos suplementarios soportados por el aislamiento de los cables y accesorios durante el defecto, reducen la vida de los cables y accesorios en una cierta proporción. Si se prevé que una red va a funcionar bastante frecuentemente con un defecto a tierra durante largos periodos, puede ser económico clasificar dicha red dentro de la categoría C.

Categoría C:

Esta categoría comprende todas las redes no incluidas en la categoría A ni en la categoría B.

Como tenemos una duración de 0,7 s, entra dentro de la categoría A (<1 s).

Tensión nominal de la red U_n kV	Tensión más elevada de la red U_e kV	Categoría de la red	Características mínimas del cable y accesorios	
			U_0/U_e ó U_0 kV	U_p Kv
3	3,6	A-B	1,8/3	45
		C		
6	7,2	A-B	3,6/6	60
		C		
10	12	A-B	6/10	75
		C		
15	17,5	A-B	8,7/15	95
		C		
20	24	A-B	12/20	125
		C		
25	30	A-B	15/25	145
		C		
30	36	A-B	18/30	170
		C		
45	52	A-B	26/45	250
66	72,5	A-B	36	(1)
110	123	A-B	64	(1)
132	145	A-B	76	(1)
150	170	A-B	87	(1)
220	245	A-B	127	(1)
400	420	A-B	220	(1)

(1) El nivel de aislamiento a impulsos tipo rayo se determinará conforme a los criterios de coordinación de aislamiento establecidos en la norma UNE-EN 60071-1.

Donde:

U_0 : Tensión asignada eficaz a frecuencia industrial entre cada conductor y la pantalla del cable, para la que se han diseñado el cable y sus accesorios.

U : Tensión asignada eficaz a frecuencia industrial entre dos conductores cualesquiera para la que se han diseñado el cable y sus accesorios.

Nota: Esta magnitud afecta al diseño de cables de campo no radial y a sus accesorios.

U_p : Valor de cresta de la tensión soportada a impulsos de tipo rayo aplicada entre cada conductor y la pantalla o la cubierta para el que se ha diseñado el cable o los accesorios.

Tabla 4: Niveles de aislamiento de los cables y sus accesorios. [2]

De la tensión nominal de 15 kV y Categoría A, sacamos que: $U_0/U = 8,7/15 \text{ kV}$ y $U_p = 95 \text{ kV}$

La corriente de servicio con los datos iniciales y según la expresión (4.1)

$$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_L \rightarrow I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{2520 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 97 \text{ A}$$

Hay que hacer correcciones por las siguientes situaciones:

- Temperatura del terreno
- Profundidad del tendido
- Distancia entre ternas
- Resistividad térmica del terreno

Temperatura °C Servicio Permanente θ_s	Temperatura del terreno, θ_t , en °C								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
105	1,09	1,06	1,03	1,00	0,97	0,94	0,90	0,87	0,83
90	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
70	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67
65	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61

Tabla 5. Factor de corrección, F , para temperatura del terreno distinta de 25 °C. [2]

El terreno está a una temperatura de $\theta=30^\circ\text{C}$, con temperatura de servicio de 90°C , el factor de corrección es de $K_1 = 0,96$

Profundidad (m)	Cables enterrados de sección		Cables bajo tubo de sección	
	$\leq 185 \text{ mm}^2$	$> 185 \text{ mm}^2$	$\leq 185 \text{ mm}^2$	$> 185 \text{ mm}^2$
0,50	1,06	1,09	1,06	1,08
0,60	1,04	1,07	1,04	1,06
0,80	1,02	1,03	1,02	1,03
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,25	0,98	0,98	0,98	0,98
1,50	0,97	0,96	0,97	0,96
1,75	0,96	0,94	0,96	0,95
2,00	0,95	0,93	0,95	0,94
2,50	0,93	0,91	0,93	0,92
3,00	0,92	0,89	0,92	0,91

Tabla 6: Factores de corrección para profundidades de la instalación distintas de 1m. [2]

La profundidad en la que se encuentra el tubo es de 1,25 m, es $\leq 185\text{mm}^2$, por lo tanto, $K_2 = 0,98$

Tipo de instalación	Separación de los ternos	Factor de corrección								
		Número de ternos de la zanja								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cables directamente enterrados	En contacto (d=0 cm)	0,76	0,65	0,58	0,53	0,50	0,47	0,45	0,43	0,42
	d = 0,2 m	0,82	0,73	0,68	0,64	0,61	0,59	0,57	0,56	0,55
	d = 0,4 m	0,86	0,78	0,75	0,72	0,70	0,68	0,67	0,66	0,65
	d = 0,6 m	0,88	0,82	0,79	0,77	0,76	0,74	0,74	0,73	-
	d = 0,8 m	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80	0,79	-	-	-
Cables bajo tubo	En contacto (d=0 cm)	0,80	0,70	0,64	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,49
	d = 0,2 m	0,83	0,75	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60	0,59	0,58
	d = 0,4 m	0,87	0,80	0,77	0,74	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68
	d = 0,6 m	0,89	0,83	0,81	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	-
	d = 0,8 m	0,90	0,86	0,84	0,82	0,81	-	-	-	-

Tabla 7: Factor de corrección por distancia entre ternos o cables tripolares. [2]

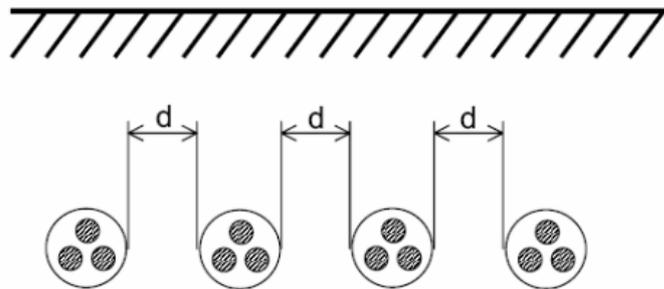


Fig. 4: Representación de la distancia a la que se refiere la Tabla 7.

Bajo tubo y no hay distancia entre cables al ser único, además, sólo tenemos un terno, por lo tanto, el valor de la corrección será la unidad $K_3 = 1$

Resistividad térmica del terreno (K.m/W)	Naturaleza del terreno y grado de humedad
0,40	Inundado
0,50	Muy húmedo
0,70	Húmedo
0,85	Poco húmedo
1,00	Seco
1,20	Arcilloso muy seco
1,50	Arenoso muy seco
2,00	De piedra arenisca
2,50	De piedra caliza
3,00	De piedra granítica

Tabla 8: Resistividad térmica del terreno en función de su naturaleza y humedad [2]

Es arenoso y muy seco, la resistividad térmica del terreno será de 1,5 K·m/W

Tipo de instalación	Sección del conductor mm ²	Resistividad térmica del terreno, K.m/W						
		0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	2,5	3
Cables directamente enterrados	25	1,25	1,20	1,16	1,00	0,89	0,81	0,75
	35	1,25	1,21	1,16	1,00	0,89	0,81	0,75
	50	1,26	1,21	1,16	1,00	0,89	0,81	0,74
	70	1,27	1,22	1,17	1,00	0,89	0,81	0,74
	95	1,28	1,22	1,18	1,00	0,89	0,80	0,74
	120	1,28	1,22	1,18	1,00	0,88	0,80	0,74
	150	1,28	1,23	1,18	1,00	0,88	0,80	0,74
	185	1,29	1,23	1,18	1,00	0,88	0,80	0,74
	240	1,29	1,23	1,18	1,00	0,88	0,80	0,73
	300	1,30	1,24	1,19	1,00	0,88	0,80	0,73
Cables en interior de tubos enterrados	25	1,12	1,10	1,08	1,00	0,93	0,88	0,83
	35	1,13	1,11	1,09	1,00	0,93	0,88	0,83
	50	1,13	1,11	1,09	1,00	0,93	0,87	0,83
	70	1,13	1,11	1,09	1,00	0,93	0,87	0,82
	95	1,14	1,12	1,09	1,00	0,93	0,87	0,82
	120	1,14	1,12	1,10	1,00	0,93	0,87	0,82
	150	1,14	1,12	1,10	1,00	0,93	0,87	0,82
	185	1,14	1,12	1,10	1,00	0,93	0,87	0,82
	240	1,15	1,12	1,10	1,00	0,92	0,86	0,81
	300	1,15	1,13	1,10	1,00	0,92	0,86	0,81
400	1,16	1,13	1,10	1,00	0,92	0,86	0,81	

Tabla 9: Factor de corrección para resistividad térmica del terreno distinta de 1,5 K.m/W [2]

La sección es de 35 mm² y la resistividad de 1,5 K.m/W, el factor de corrección del terreno será $K_4 = 1$. Es por ello que realizaremos la corriente admisible según (4.2)

$$I_z = 110 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 110 \cdot 0,96 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 1 = 103'5 A > 97 A \rightarrow \text{cumple}$$

Cálculo de la corriente en **cortocircuito**, la potencia aparente de cortocircuito de la instalación es de 375 MVA y de acuerdo con la expresión (4.1), se obtiene una corriente de cortocircuito que es la siguiente

$$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{cc} \rightarrow I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{375 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 14,43 \text{ kA}$$

Todo el calor desprendido durante el proceso es absorbido por los conductores ya que el proceso es tan rápido que se considera adiabático, es por esto que, en Femm, no se podrá realizar el estudio porque sólo puede hacer transmisión de calor. Según la expresión (4.3) se estimará el tiempo

$$\frac{I_{cc}}{S} = \frac{K}{\sqrt{t_{cc}}} \longrightarrow \text{Coeficiente que depende el conductor y temperaturas inicial y final}$$

t_{cc} → Hay que comprobar que es superior al tiempo de las protecciones para que no se sobre caliente el conductor $t_{cc} > 0.4 \text{ s}$

El cálculo de las secciones mínimas en el caso de cortocircuito, se basa en la estimación del tiempo necesario, t , para que la capa de materiales aislantes alcance la temperatura máxima reglamentaria, que en el caso del XLPE es de 250°C

TEMPERATURA/TIEMPO EN CORTOCIRCUITO

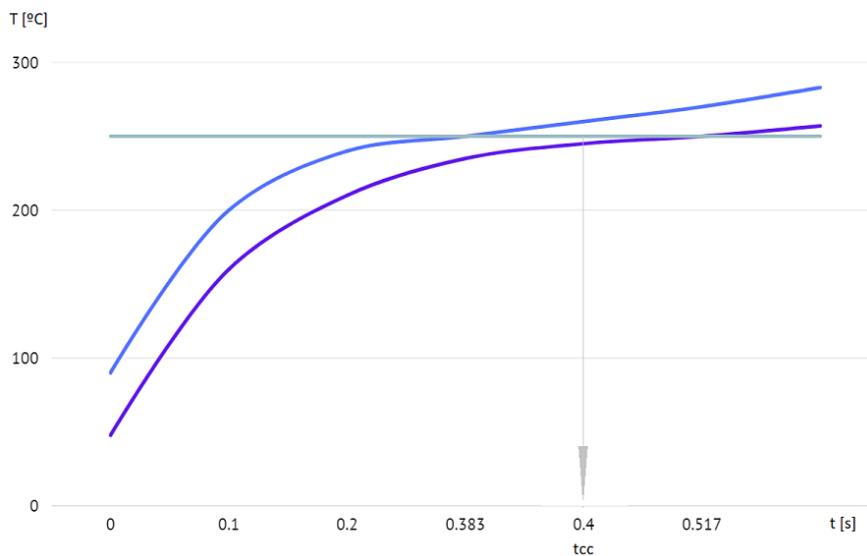


Fig. 5: Gráficas representando el tiempo que tardan en llegar a temperatura máxima en cortocircuito.

Como se observa en la Fig. 5, el tiempo t aumenta al disminuir la temperatura en régimen permanente a la que se encuentra el conductor de aluminio. En los cálculos que se proponen en el reglamento [2], una primera estimación de la sección mínima se calcula suponiendo la temperatura máxima en régimen permanente de 90°C

Tipo de aislamiento seco	Condiciones	
	Servicio Permanente θ_s	Cortocircuito θ_{cc} ($t \leq 5 \text{ s}$)
Policloruro de vinilo (PVC)* $S \leq 300 \text{ mm}^2$ $S > 300 \text{ mm}^2$	70	160
	70	140
Polietileno reticulado(XLPE)	90	250
Etileno – Propileno (EPR)	90	250
Etileno - Propileno de alto módulo (HEPR)	105 para $U_0/U \leq 18/30 \text{ kV}$ 90 para $U_0/U > 18/30 \text{ kV}$	250

* Solo para instalaciones de tensión asignada hasta 6 kV.

Tabla 10. Cables aislados con aislamiento seco. Temperatura máxima, en °C, asignada al conductor.

El caso más desfavorable sería que fuese desde la temperatura de servicio (90°C) hasta los 250°C

Tipo de aislamiento	$\Delta\theta^*$ (K)	Duración del cortocircuito, t_{cc} , en segundos									
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
PVC: sección $\leq 300 \text{ mm}^2$	90	240	170	138	107	98	76	62	53	48	43
sección $> 300 \text{ mm}^2$	70	215	152	124	96	87	68	55	48	43	39
XLPE, EPR y HEPR	160	298	211	172	133	122	94	77	66	59	54
HEPR $U_0/U \leq 18/30 \text{ kV}$	145	281	199	162	126	115	89	73	63	56	51

* $\Delta\theta$ es la diferencia entre la temperatura de servicio permanente y la temperatura de cortocircuito.

Tabla 11. Densidad máxima admisible de corriente de cortocircuito, en A/mm^2 , para conductores de aluminio.

- 1) XLPE $\rightarrow t_{cc} = 1 \text{ segundo} \rightarrow 94 A/mm^2$
- 2) XLPE $\rightarrow t_{cc} = 0.4 \text{ segundos} \rightarrow 153 A/mm^2$ (como sólo hay para 0.3 y 0.5, cogemos el valor intermedio)

$$\frac{I_{cc}}{S} = \frac{K}{\sqrt{t_{cc}}} \rightarrow S = \frac{14434 \cdot \sqrt{1}}{153} = 94 \text{ mm}^2 \rightarrow S = 95 \text{ mm}^2$$

(es la sección existente más cercana por encima del valor calculado)

$$t_{cc} = \sqrt{\frac{K \cdot S}{I_{cc}}} = \sqrt{\frac{94 \cdot 95}{14434}} = 0.383 \text{ s} < 0.4 \text{ s}$$

NO cumple, esto indica que alcanza los 250°C en ese tiempo, siendo menor del que tarda en reaccionar la protección.

El propio reglamento [2] y norma [3][4], propone un método de corrección de la temperatura inicial del conductor en régimen permanente. Ahora, en vez de coger una sección mayor, se calculará la temperatura inicial.

Se hace el mismo procedimiento anterior pero para 95 mm^2 y usando las correcciones de la sección de 35 mm^2 : $K_1 = 0.96$; $K_2 = 0.98$; $K_3 = 1$; $K_4 = 1$

Sección (mm ²)	EPR		XLPE		HEPR	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
25	115	90	120	90	125	95
35	135	105	145	110	150	115
50	160	125	170	130	180	135
70	200	155	205	160	220	170
95	235	185	245	190	260	200
120	270	210	280	215	295	230
150	305	235	315	245	330	255
185	345	270	355	280	375	290
240	400	310	415	320	440	345
300	450	355	460	365	500	390
400	510	405	520	415	565	450

Tabla 12: Intensidades máximas admisibles (A) en servicio permanente y con corriente alterna. Cables unipolares aislados de hasta 18/30 kV bajo tubo.

De la sección de 95 mm², sabiendo que es XLPE y Al, la corriente que encontraríamos para usarla en (4.2) es de 190 A

$$I_{Z_{cc}} = 190 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 178.75 \text{ A}$$

Cálculo de la temperatura antes del cortocircuito:

$$\theta_i - \theta_{amb} = (\theta_s - \theta_{amb}) \cdot \sqrt{\frac{I}{I_{Z_{cc}}}} \rightarrow \theta_i = 30 + (90 - 30) \cdot \sqrt{\frac{97}{178.75}} = 47.67^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

Con esta nueva temperatura, que es considerablemente menor a la máxima reglamentaria, volvemos a repetir los cálculos, concluyendo que el conductor no alcanza los 250°C antes de que se corte la circulación de I_{cc} ($t_{cc} = 0'4s$).

Se corregirá la K para saber si cumple en (4.4)

$$K_{corregida} = K \cdot \frac{\sqrt{\frac{\ln(\frac{\theta_{cc} + \beta}{\theta_i + \beta})}{\ln(\frac{\theta_{cc} + \beta}{\theta_s + \beta})}}}{\sqrt{\frac{\ln(\frac{250 + \beta}{47.67 + \beta})}{\ln(\frac{250 + \beta}{90 + \beta})}} \rightarrow \beta = 228 \text{ (Aluminio)}$$

$$K_{corregida} = 94 \cdot 1.1623 = 109.25 \text{ A/mm}^2$$

Ahora que tenemos la K corregida, se implementará de nuevo en (4.3) para hallar el nuevo tiempo

$$t_{cc} = \sqrt{\frac{K_{corregida} \cdot S}{I_{cc}}} = \sqrt{\frac{109.25 \cdot 95}{14434}} = 0.517 \text{ s} > 0.4 \text{ s}$$

Como consecuencia a lo anterior, concluimos que la sección de 95 mm²mm² SI cumple el reglamento.

Ahora ya que se sabe que cumple, se tendrá que comprobar que no supera la caída de tensión el 5%

1 x sección conductor (Al)/sección pantalla (Cu) (mm ²)	Resistencia del conductor a 20 °C (Ω/km)	Resistencia del conductor a T máx (105 °C) (Ω/km)	Reactancia inductiva (Ω/km)		Capacidad (μF/km)	
			12/20 kV y 18/30 kV	18/30 kV	12/20 kV	18/30 kV
1x95/16 (1)	0,320	0,410	0,123	0,132	0,217	0,167
1x150/16 (2)	0,206	0,264	0,114	0,123	0,254	0,192
1x240/16 (2)	0,125	0,161	0,106	0,114	0,306	0,229
1x400/16 (2)	0,078	0,100	0,099	0,106	0,376	0,277

(1) Sección homologada por las compañías del Grupo Endesa en 12/20 kV
(2) Secciones homologadas por las compañías del Grupo Endesa en 12/20 kV y 18/30 kV
NOTA: valores obtenidos para una terna de cables al tresbolillo

Tabla 13: Reactancia inductiva según la sección del conductor por el fabricante.

Sección 95 mm² → Cable unipolar Aluminio → Resistencia kilométrica de 0.410 Ω/km=R_k

Sección 95 mm² → 12/20kV → Reactancia inductiva 0.123 Ω/km=X_k

CAÍDA DE TENSIÓN

Para concluir con el cálculo, quedará comprobar si la caída de tensión que cae sobre la línea es inferior al 5% usando la ecuación (4.5)

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot (R_k \cdot \cos \varphi + X_k \cdot \sen \varphi) = \sqrt{3} \cdot 97 \cdot 1.26 \cdot (0.41 \cdot 0.9 + 0.123 \cdot 0.436) = 89.47V$$

0.60% < 5% , por lo tanto, el conductor cumple también con el criterio de la caída de tensión.

5. Estimación de temperaturas mediante el método de elementos finitos (MEF)

En el apartado anterior, hemos observado que para un cálculo óptimo de la sección del conductor es fundamental conocer la temperatura en régimen permanente en la que se encuentra el conductor de la instalación. En la norma UNE 21144 [3][4] y reglamento [2] se describe un método paramétrico para la estimación de esa temperatura.

A continuación, emplearemos el módulo térmico incorporado en el software libre femm4.2 elaborado por David Meeker [8], para estimar numéricamente esa temperatura en régimen permanente.

Se ha elaborado dos modelos bidimensionales con simetría planar y una profundidad de un metro de la instalación subterránea objeto del estudio de este trabajo para comprobar si el método paramétrico propuesto por el reglamento, se ajusta con el obtenido mediante este software. El primero es mediante la forma de trébol o triángulo, en el cual se apoya uno de los cables en los otros dos. El segundo se trata de una organización lineal en el que están los cables uno al lado del otro dejando uno de ellos en el centro.

Para comenzar, se ha dibujado en ambos modelos una porción del suelo y del aire para simular más correctamente el lugar de donde se basa el problema inicial Fig. 6. A 1'25 m, se ha dibujado el tubo enterrado, de 80 mm de radio, donde se encuentran los tres cables aislados del problema. Por adherirse a la realidad, se han dibujado en el fondo del tubo siguiendo, de esta manera, la fuerza de la gravedad. Fig. 7

Para poder hallar la temperatura del cable, primero se tendrá que obtener las pérdidas reales con el modelo magnetodinámico a una frecuencia de 50 Hz. Para ello se han incorporado los materiales en los que se compone, siguiendo los mismos criterios que en la (Tabla 1).

Se crea un contorno (*background*) que delimitará la zona de trabajo y que incluirá la zanja, tubos y conductores con sus dimensiones reglamentarias. En un primer modelo, la condición de contorno de $\theta = 30^{\circ}C$ se impone en este contorno (temperatura del terreno). En la sección del aluminio, se agregarán conductores que hemos tenido que crear con el valor de la corriente que hemos obtenido con la expresión (4.1).

$$I_{total_A} = \sqrt{2} \cdot I_{m\acute{a}x_eficaz} = \sqrt{2} \cdot 97 = 137'18 A \quad (5.1)$$

$$I_{total_B} = I_{total_C} = \frac{-I_{total_A}}{2} = -68'59 A \quad (5.2)$$

Como vamos a trabajar en régimen permanente, el valor de la corriente en los tres conductores será el máximo, en este caso serán 137'18 A para los tres casos.

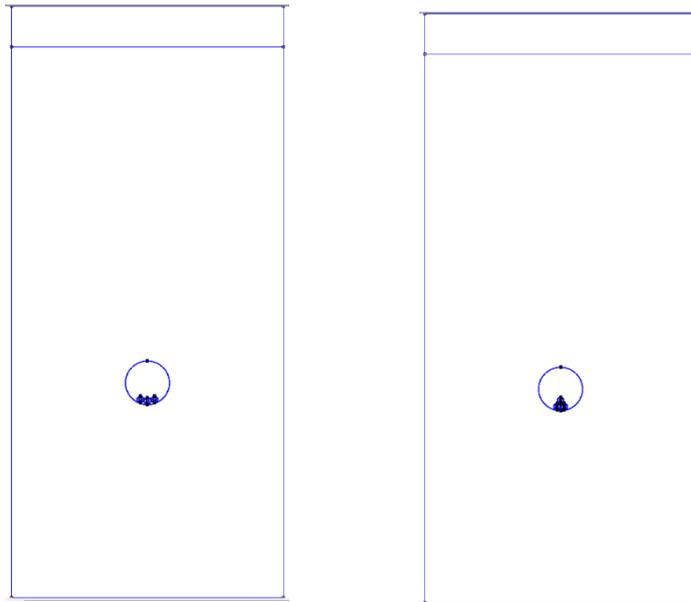


Fig. 6: Modelos bidimensionales empleados en el cálculo numérico.

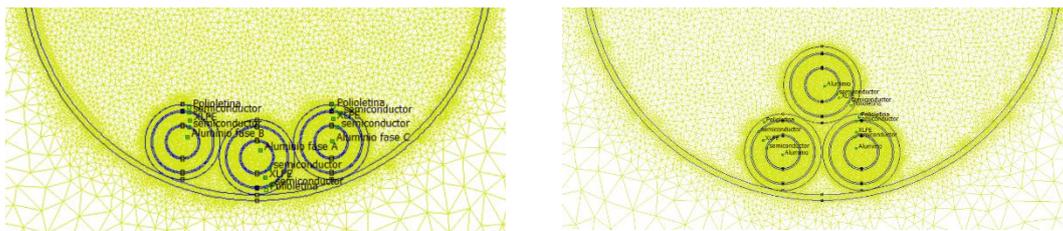


Fig. 7: Imagen ampliada de la Fig. 6 con detalle de los conductores.

Una vez se tengan todos los datos en orden, se mallará; los modelos tienen donde han salido en torno a 75000 elementos. Cuantas más se pongan, más preciso serán los cálculos. Después del mallado, se realizarán los cálculos como podemos ver en Fig. 8. Cuando haya acabado, visionaremos el resultado y buscaremos las pérdidas de potencia real. Al tratarse de un modelo magnetodinámico, el post procesador calcula automáticamente esas pérdidas por efecto Joule, siendo en nuestro caso de 2'67 W por conductor Fig. 9

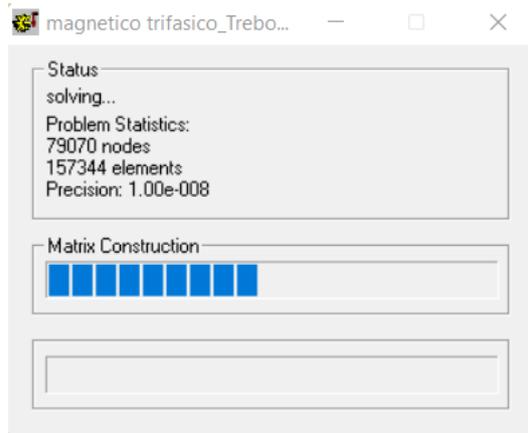


Fig. 8: Cálculo del programa Femm

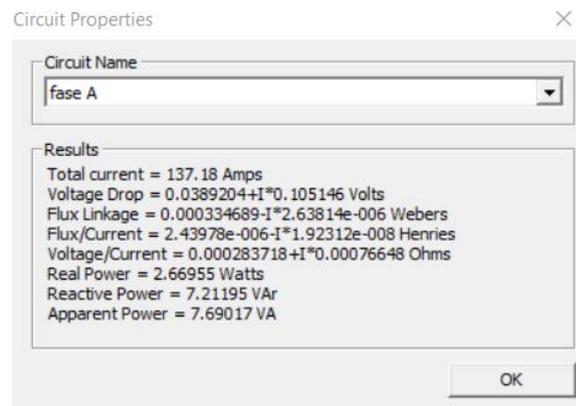


Fig. 9: Resultados del circuito "fase A"

Una vez obtenido el valor de la potencia real, se creará otro problema nuevo pero, esta vez, de flujo de calor. Usando el valor obtenido en el anterior cálculo, se analizará la generación de calor volumétrico que va a tener el aluminio. Para ello, se necesitará saber el volumen del cable. Cogiendo un metro de profundidad y sabiendo que tiene la sección de 95 mm^2 , se emplea la expresión (5.3). Con todos los datos ya recogidos, se pasa a m^3 y se resuelve con la expresión (5.4)

$$P_{\text{fase}_A} = 2'67 \text{ W}$$

$$\text{Volumen} = 95 \cdot 1000 = 95000 \text{ mm}^3 \begin{cases} \text{Profundidad} = 1000 \text{ mm} \\ \text{Superficie} = 95 \text{ mm}^2 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\text{Generación de calor volumétrica } \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

$$\text{fase A} \rightarrow \frac{2'67 \text{ W}}{95000 \text{ mm}^3} \cdot \frac{10^9 \text{ mm}^3}{1 \text{ m}^3} = 28105 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \quad (5.4)$$

Como se obtuvo en (4.6), la temperatura calculada es de $47'67 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta es la temperatura que se busca conseguir para que tenga un funcionamiento correcto.

Mi modelo térmico de Femm estima la siguiente distribución de temperatura, tanto en el modelo lineal (Figura X) como en el triangular (Figura X). A su vez, se puede observar la gráfica de la distribución de máxima temperatura para los dos modelos (Gráfica X) y (Gráfica X). Con estas observaciones, se obtiene un dato a tener en cuenta: la formación lineal obtiene menos temperatura máxima que el triangular, siendo así más homogénea entre las fases.

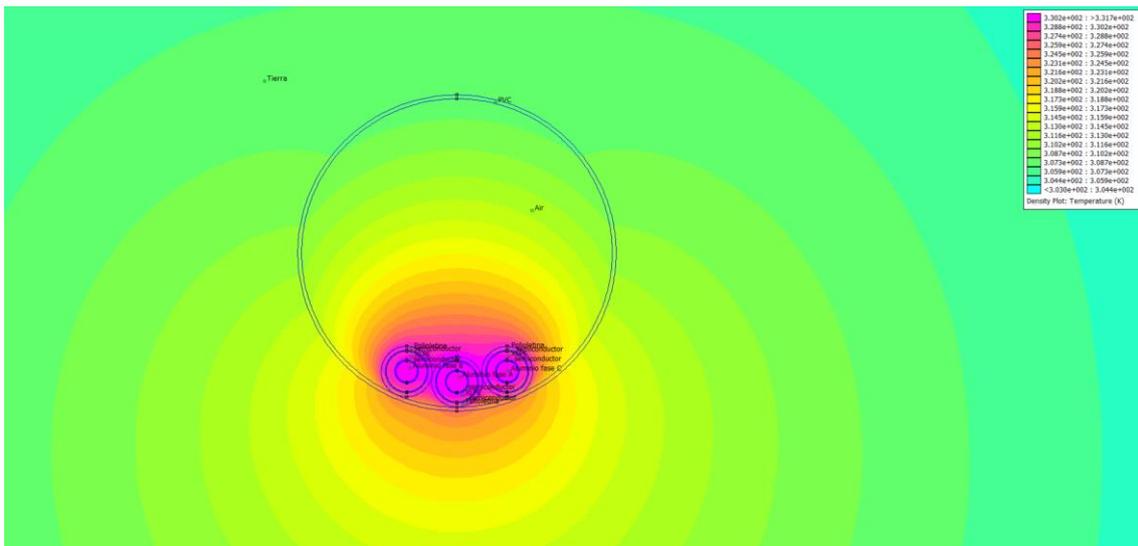


Fig. 10: Modelo lineal en problema de flujo de calor

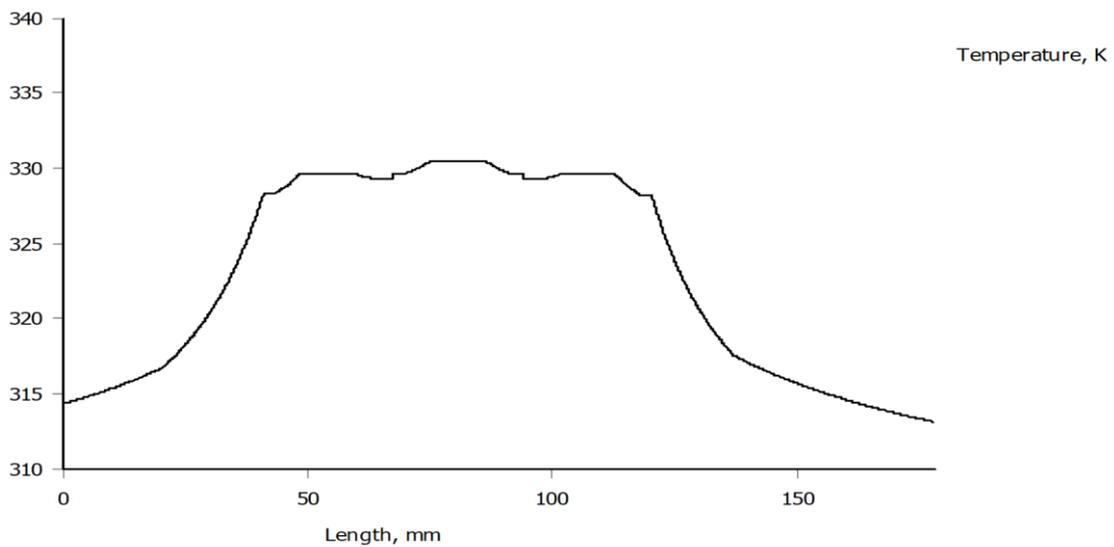


Fig.11: Temperatura máxima en modelo lineal en problema de flujo de calor

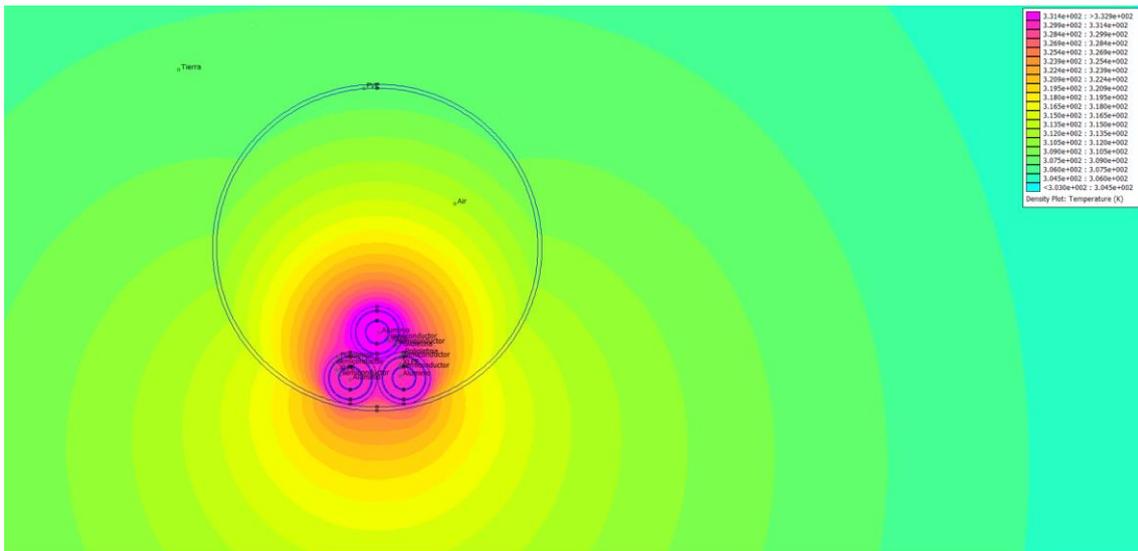


Fig. 12: Modelo triangular en problema de flujo de calor

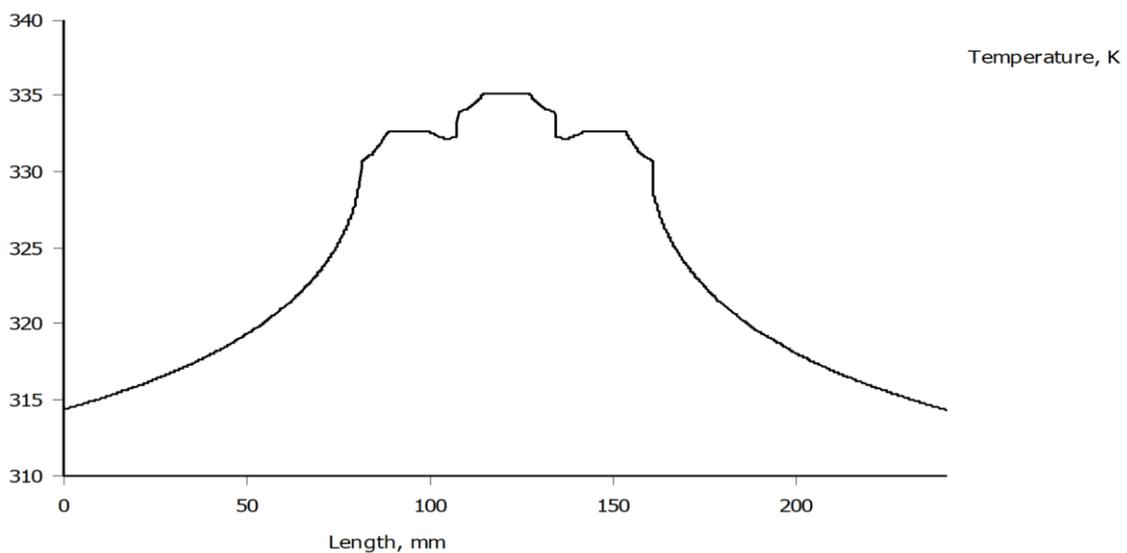


Fig. 13: Temperatura máxima en modelo triangular en problema de flujo de calor

En un segundo modelo, la condición de contorno de $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ se impone sobre la superficie exterior del tubo de PVC que protege a los tres conductores. En las figuras X e Y se observan las nuevas distribuciones de temperatura obtenida.

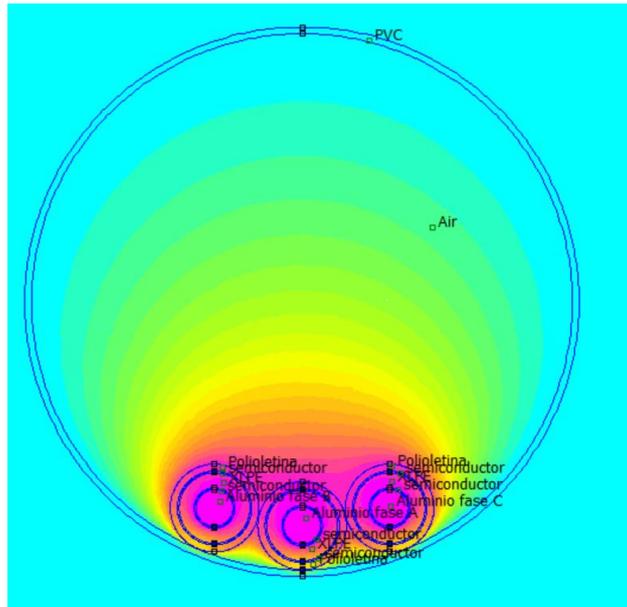


Fig. 14: Modelo lineal con condición de contorno en tubo PVC

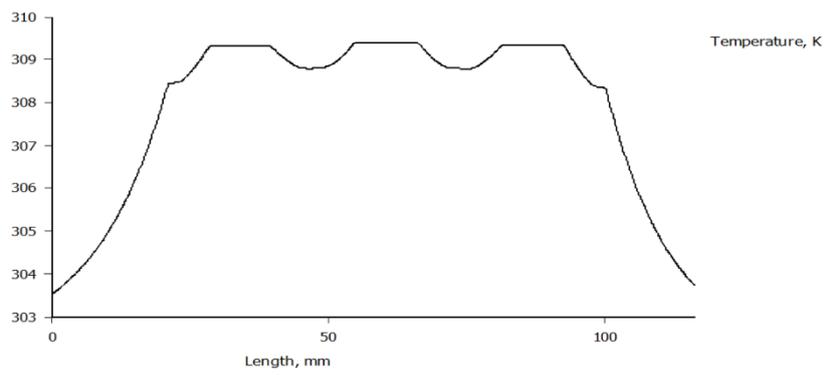


Fig. 15: Temperatura máxima en modelo lineal en problema de flujo de calor

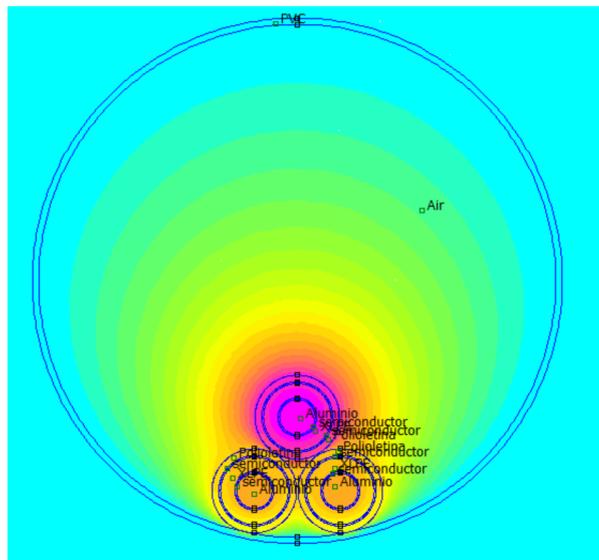


Fig. 16: Modelo triangular con condición de contorno en tubo PVC

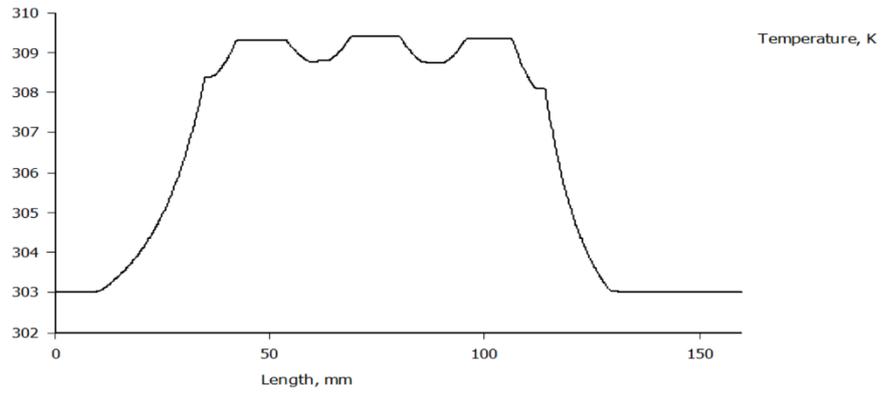


Fig. 17: *Temperatura máxima modelo triangular con condición contorno en tubo PVC*

6. CONCLUSIONES

El objetivo de este TFG ha sido calcular los valores de la sección mínima de los conductores aislados en instalaciones subterráneas de alta tensión obtenidos mediante el reglamento y la norma UNE 21144. La hipótesis o pregunta que planteaba este TFG era si alguno de los valores de temperatura necesarios en este cálculo podrían estimarse numéricamente mediante el MEF.

Para lograr este objetivo, se ha realizado un cálculo térmico mediante el reglamento y la norma UNE 21144, utilizando los datos de una línea subterránea de alta tensión de 15 kV, 97 A y 95 mm² de sección. Se ha obtenido una temperatura máxima en el aislante del conductor en régimen permanente de 47.67°C, lo que cumple con el límite máximo establecido por el reglamento de 90°C, para que no pierda las propiedades aislantes el XLPE.

A continuación, he realizado varias simulaciones bidimensionales en FEMM4.2, utilizando los mismos datos de la línea subterránea. Las más representativas son las siguientes:

- Simulación 1, con los cables en trébol, bajo tubo de PVC, con la condición de contorno de $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ en la frontera (background) del modelo, se obtiene una temperatura en la superficie interna del aislante de $\theta_{\text{XLPE}} = 62^{\circ}\text{C}$.
- Simulación 2, igual que la anterior, pero con la condición de contorno de $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ en la superficie exterior de la tubería de PVC, $\theta_{\text{XLPE}} = 40^{\circ}\text{C}$
- Simulación 3, con los cables en capa, bajo tubo de PVC con la condición de contorno de $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ en la frontera (background) del modelo; $\theta_{\text{XLPE}} = 57^{\circ}\text{C}$
- Simulación 4, igual que la anterior, pero con la condición de contorno de $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ en la superficie exterior de la tubería de PVC, $\theta_{\text{XLPE}} = 36^{\circ}\text{C}$

Observamos que en las dos geometrías, la temperatura obtenida paramétricamente con la norma está en el intervalo de las máximas y mínimas obtenidas mediante el MEF.

Esta discrepancia puede deberse a varias causas, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

- Las condiciones de contorno utilizadas en la simulación con FEMM4.2 pueden no reflejar las condiciones reales del entorno donde se ubica la línea

-
-
- subterránea. Esto puede afectar al flujo de calor entre los diferentes materiales y al gradiente térmico entre el conductor y el exterior.
- Las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la simulación con FEMM4.2 pueden no coincidir con las propiedades reales de los materiales empleados en la construcción de la línea subterránea. Esto puede alterar la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la resistividad eléctrica de los materiales.

De estos resultados se concluye que el MEF puede acabar siendo una herramienta que sustituya a los cálculos paramétricos. También se observa la necesidad de realizar modelos más ajustados que puedan contrastarse con resultados experimentales a los que no he tenido acceso durante este trabajo.

Bibliografía

- [1] [J. A. Hernández, "Diseño de un sistema de control para un robot móvil tipo Ackerman", Tesis de Maestría, Dept. Ing. Eléctrica, Inst. Politécnico Nacional, México, 2015. \[último acceso 02/07/2023\]](#)
- [2] [BOE-A-2014-6084 Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23. \[último acceso 05/08/2023\]](#)
- [3] [UNE 21144-1-1:2012, "Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible. Parte 1-1: Ecuaciones de intensidad admisible \(factor de carga 100%\) y cálculo de pérdidas. Generalidades", Madrid: AENOR, 2012.](#)
- [4] [UNE 21144-2:2012, "Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible. Parte 2: Aplicación de las ecuaciones de intensidad admisible", Madrid: AENOR, 2012.](#)
- [5] P. Simón, Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión. Aplicación al Reglamento de Líneas de Alta Tensión (RLAT). R.D. 223/2008 de 15 de febrero. Madrid: Garceta, 2011.
- [6] Prysmian, *Cables y accesorios para media tensión. Adaptado al Reglamento de Líneas de Alta Tensión (R.D. 223/2008)*. Barcelona, España: Prysmian, 2009. Catálogo.
- [7] [J. A. Gómez, "Una introducción al uso de FEMM 4", 2015 \[último acceso 14/05/2023\]](#)
- [8] [D. Meeker, Finite element method magnetics. \[S.l.\]: D. Meeker, 2014. \[Libro electrónico\]](#)