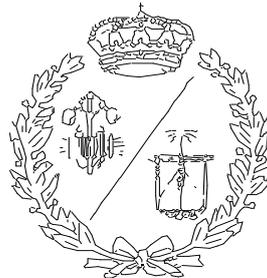


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**Diseño de estrategias de optimización
multicriterio para el trazado de líneas eléctricas
subterráneas de media y alta tensión**

**Design of multicriterial optimization strategies for
the routing of medium and high voltage underground
power lines**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor: Eugenio Sainz Ortiz

Septiembre – 2020

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	4
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	8
1 INTRODUCCIÓN	9
2 CABLES SUBTERRÁNEOS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN	12
2.1 COMPOSICIÓN DE LOS CABLES.....	13
2.1.1 CONDUCTOR.....	13
2.1.2 CAPAS SEMICONDUCTORAS.....	14
2.1.3 AISLAMIENTO	14
2.1.4 PANTALLA.....	17
2.1.5 CUBIERTA EXTERIOR	18
2.2 MÉTODOS DE INSTALACIÓN	18
2.2.1 DIRECTAMENTE ENTERRADOS	19
2.2.2 EN CANALIZACIÓN ENTUBADA.....	19
2.2.3 EN GALERIAS.....	20
3 CÁLCULO DE LA AMPACIDAD NORMA UNE 21144.....	21
3.1 NORMA UNE 21144	21
3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	22
3.2.1 RESISTENCIA TÉRMICA T.....	22
3.2.2 EFECTO PROXIMIDAD γ_p	23
3.2.3 EFECTO PELICULAR γ_s	23
3.2.4 PÉRDIDAS EN EL DIELECTRICO W_d	24
3.2.5 PÉRDIDAS EN LAS PANTALLAS λ_1	24
3.2.6 MODELO TERMO-ELÉCTRICO DE UN CABLE	25

3.3 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	26
3.3.1 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	27
3.3.2 RESISTENCIA DEL CONDUCTOR R	27
3.3.3 FACTORES DE EFECTO PELICULAR γ_s Y EFECTO PROXIMIDAD γ_p	28
3.3.4 FACTORES DE PÉRDIDAS EN EL DIELECTRICO W_d	29
3.3.5 FACTORES DE PÉRDIDAS EN LAS PANTALLAS λ_1	29
3.3.6 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS	31
3.3.7 FACTORES DE CORRECCIÓN	33
4 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS.....	35
4.1 DEFINICIÓN	35
4.2 GRAFOS PONDERADOS.....	36
4.2 PROBLEMA DE LA RUTA ÓPTIMA (SHORTEST PATH).....	37
4.2.1 ALGORITMO DE DIJKSTRA.....	38
4.3 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS 2D	40
4.4 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS TIPO MALLA.....	42
4.5 GENERACIÓN DEL GRAFO	44
4.6 ASIGNACIÓN DE PESOS A LAS ARISTAS	45
5 MODELO ARTIFICIAL DEL TERRENO.....	47
5.1 MAPA GEOLÓGICO	47
5.2 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO ARTIFICIAL DEL TERRENO.....	50
5.3 GENERACIÓN DEL MODELO ARTIFICIAL DEL TERRENO	51
5.3.1 DIAGRAMAS DE VORONOI.....	51
5.3.2 ASIGNACIÓN DE VALORES DE RESISTIVIDAD TÉRMICA A LOS POLÍGONOS	53
5.3.3 MODELADO DEL GRAFO:RESISTIVIDADES TÉRMICAS.....	54
6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	58

6.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	58
6.2 TRAZADO DE LA RUTA ÓPTIMA Y EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL PASO DE MALLA	64
6.3 ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO T4 Y CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	67
6.3.1 Tabla de resultados 1: En función de la Resistividad térmica media	70
6.3.2 Tabla de resultados 2: En función de la Resistividad térmica crítica.....	70
7 CONCLUSIONES.....	77
8 BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ampacidad en función de la resistividad térmica del terreno [autor]	9
Figura 2 Curva Dry Out para diferentes materiales [1]	10
Figura 3 Curva Dry Out para diferentes grados de compactación [1]	11
Figura 4 Curva Dry Out para diferentes temperaturas del terreno [1]	11
Figura 5 Partes de un cable subterráneo [2]	13
Figura 6 Sección compuesta por alambres, sección compacta y sectorial [2]	14
Figura 8 Cable eléctrico con capas semiconductoras [3]	14
Figura 7 Distribución del campo eléctrico sin capas semiconductoras [3]	14
Figura 9 Resistencias térmicas para diferentes materiales aislantes [4].....	15
Figura 10 Valores tabulados ϵ y $\tan \delta$ [5]	16
Figura 11 Conexión Both ends [6]	17
Figura 12 Conexión single point [6].....	17
Figura 13 Conexión Crossbonding [6].....	18
Figura 14 Cable directamente enterrado [7].....	19
Figura 15 Canalización entubada [7]	19
Figura 16 Cable en galería no registrable [7].....	20
Figura 17 Definición de resistividad térmica [8].....	22
Figura 18 Densidad de corriente decreciente del color azul al color rojo [10]	23
Figura 19 Aumento del efecto piel con el aumento de la frecuencia. Intensidad (azul) [11]	23
Figura 20 Fenómenos dieléctricos 1,2,3 [12]	24
Figura 21 Modelo termo-eléctrico de un cable [9].....	25
Figura 22 Diferentes capas de un cable con su resistencia térmica asociada [autor].....	31
Figura 23 Representación de los diferentes factores del parámetro T4 [autor].....	32
Figura 24 Norma UNE_21144 Tabla A6 [13].....	34

Figura 25 Norma UNE_21144 Tabla A7 [13].....	34
Figura 26 Norma UNE_21144 Tabla A8 [13]	34
Figura 28 Grafo no dirigido [autor].....	35
Figura 27 Grafo dirigido [autor].....	35
Figura 29 Ejemplo de grafo ponderado no dirigido [autor]	36
Figura 30 Matriz de adyacencia para el grafo de la figura 24 [autor]	36
Figura 31 Lista de adyacencia, grafo de la figura 24 [autor]	37
Figura 32 Ejemplo de aplicación A.DIJKSTRA [autor]	39
Figura 33 [autor].....	39
Figura 34 Tabla de aristas-peso [autor].....	40
Figura 35 Grafo con coordenadas reales [autor].....	41
Figura 36 Grafo abstracto [autor].....	41
Figura 37 Ejemplo de un modelo digital de elevaciones con malla regular [14].....	42
Figura 38 Subíndices de una matriz e índices lineales [15]	42
Figura 39 Representación de la matriz de datos en función de sus coordenadas Xcenter,Ycenter [autor]	43
Figura 40 Topología de aristas utilizadas [autor]	44
Figura 41 Comparativa entre el grafo suma y el grafo producto [autor]	46
Figura 42 Mapa geológico de Santander [16]	47
Figura 43 Visualización de vértices con QGIS para el mapa geológico de Santander [autor].....	48
Figura 44 Unidades geológicas para el mapa geológico de Santander 1:25000 [autor].....	48
Figura 45 Mapa geológico de Santander 1:250000 [autor].....	49
Figura 46 Unidades geológicas que se utilizaran para el modelo artificial del terreno [autor].....	50
Figura 47 Diagrama de Voronoi creado a partir de puntos aleatorios [autor].....	51
Figura 48 Comparación entre puntos aleatorios espaciados y no espaciados [autor]	52
Figura 49 Polígonos con borde [autor].....	53
Figura 50 Polígonos sin borde [autor]	53

Figura 51 Ejemplo de asignación de pesos a las aristas [autor]	54
Figura 52 Grafo con paso de malla 50m [autor].....	56
Figura 53 Grafo con paso de malla 25m [autor].....	56
Figura 54 Grafo superpuesto al plot de los polígonos [autor]	57
Figura 55 Vértices coloreados en función a su polígono [autor].....	57
Figura 56 Modelo de función con 4 entradas y una salida [autor].....	58
Figura 57 Características dimensionales de los cables AL EPROTENAX H COMPACT [7]	60
Figura 58 Parámetro T4 en función de la resistividad térmica del terreno [autor]	61
Figura 59 Características eléctricas de los cables AL EPROTENAX H COMPACT [7]	61
Figura 60 Ampacidad en función de la resistividad térmica del terreno [autor]	62
Figura 61 Variación % de la ampacidad respecto a la variación % de la resistividad [autor].....	63
Figura 62 Trazado óptimo vs Trazado mínima distancia. Paso de malla 8m [autor].....	65
Figura 63 Trazado óptimo vs Trazado mínima distancia. Paso de malla 4m [autor].....	66
Figura 64 Trazado óptimo vs Trazado mínima distancia. Paso de malla 2m [autor].....	66
Figura 65 Gráfico en el que se representan los polígonos por orden de paso con su distancia de paso para las dos rutas [autor].....	67
Figura 66 Longitud acumulada de resistividad térmica común [autor]	68
Figura 67 Leyenda de longitud acumulada de resistividad térmica común [autor].....	68
Figura 68 Tabla resumen de resultados [autor]	69
Figura 70 Tabla de resultados 2 [autor].....	70
Figura 69 Tabla de resultados 1 [autor]	70
Figura 71 Escenario 1 [autor].....	71
Figura 72 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 1 [autor].....	71
Figura 73 Escenario 2 [autor].....	72
Figura 74 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 2 [autor].....	72
Figura 75 Escenario 3 [autor].....	73
Figura 76 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 3 [autor].....	73

Figura 77 Escenario 4 [autor]..... 74

Figura 78 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 4 [autor]..... 74

Figura 79 Escenario 5 [autor]..... 75

Figura 80 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 5 [autor]..... 75

Figura 81 Escenario 6 [autor]..... 76

Figura 82 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 6 [autor]..... 76

RESUMEN

En este trabajo de investigación se desarrollarán técnicas de optimización para el trazado de líneas subterráneas de media y alta tensión con el objetivo de maximizar la ampacidad de la línea para un área de terreno dada.

Se creará un modelo artificial del terreno basado en una base de datos geológica de Mapas Cantabria Open Source. Este modelo simplificado nos proporcionará un escenario con características reales para la construcción de un grafo.

Posteriormente partiendo del modelo térmico-eléctrico para el cálculo de la ampacidad de un conductor propuesto por la norma IEC 60287 se obtendrán valores óptimos de los parámetros que dependen de las características geológicas del terreno mediante la aplicación de algoritmos para el trazado de caminos mínimos en el grafo.

La metodología propuesta se implementará utilizando herramientas GIS (Qgis) y herramientas numéricas (Matlab)

ABSTRACT

In this research work, optimization techniques will be developed for the path of medium and high voltage underground lines with the aim of maximizing the ampacity of the line for a given area of land.

An artificial model of the terrain will be created based on a geological database of Cantabria Open Source Maps. This simplified model will provide us with a scenario with real characteristics for the construction of the graph.

Subsequently, starting from the thermal-electrical model for the calculation of the ampacity of a conductor proposed by the IEC 60287 standard, optimal values of the parameters that depend on the geological characteristics of the terrain will be obtained by applying algorithms for the routing of minimum paths in the graph.

The proposed methodology will be implemented using GIS tools (Qgis) and numerical tools (Matlab).

1 INTRODUCCIÓN

Cuando la corriente fluye a través de un cable subterráneo se produce una generación de calor que debe disiparse a través del medio que lo rodea para que la temperatura del cable no aumente. La resistividad térmica del terreno representa aproximadamente la mitad de la resistencia térmica total entre el conductor y el medio ambiente. Una mala selección de los materiales que rodean a los cables y un régimen de humedad y temperatura del terreno desfavorables pueden desembocar en escenarios muy desfavorables donde se pueden producir recalentamientos puntuales (Hot Spots) y reducir drásticamente la capacidad de transporte de la línea.

La resistividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de oponerse al paso del calor. Sus unidades en el sistema internacional son $\text{k}\cdot\text{m}/\text{W}$. En Estados Unidos y otros países es muy común utilizar las unidades $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$. Deberá tenerse muy en cuenta esta propiedad ya que como se comentará en las siguientes secciones es un factor muy importante en el diseño de una línea subterránea y determinará la ampacidad. En la siguiente figura se representa la influencia de la resistividad térmica en la ampacidad para un cable unipolar de cobre de 400mm^2 de sección.

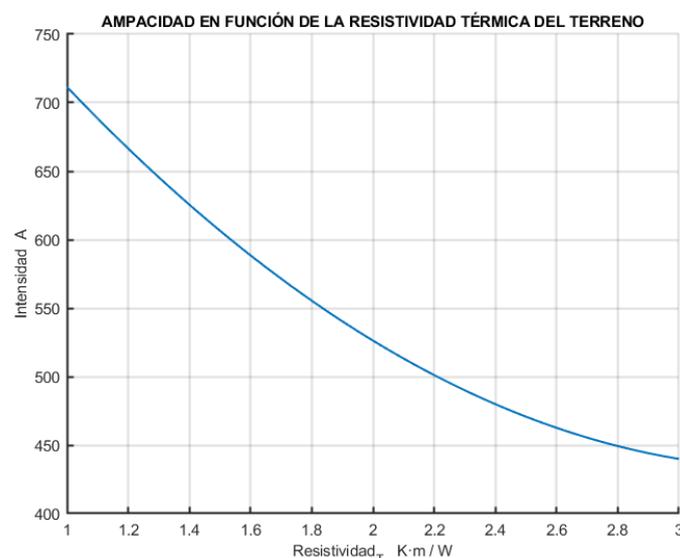


Figura 1 Ampacidad en función de la resistividad térmica del terreno [autor]

Las ecuaciones y procedimientos para el cálculo de la ampacidad, resistencias térmicas y valores tabulados se obtendrán de la norma española UNE 21144. Esta norma aporta valores tabulados de resistividad térmica y factores de corrección para diferentes resistividades, pero no en función del tipo de terreno, por lo que indica que los valores tomados deberán basarse en resultados de medidas adecuadas.

El suelo debe considerarse como una mezcla entre materiales sólidos, agua y aire. La resistividad térmica del suelo varía principalmente con:

- El tipo de terreno
- Contenido volumétrico de agua
- Temperatura del terreno
- Grado de compactación, porosidad

El factor más determinante es el contenido volumétrico de agua, ya que la resistividad varía mucho en función de este parámetro, se suelen representar las curvas de resistividad térmica en función del contenido de agua (curvas Dry Out) para diferentes materiales, densidad y temperatura del terreno. Es importante conocer en este tipo de gráficas el valor de contenido en agua para el que la resistividad deja de tener una fuerte dependencia y pasa a ser constante. Este valor se conoce como punto crítico. En la siguiente figura se representa esta dependencia para tres materiales.

- Materia orgánica
- Loam: Es una roca sedimentaria de granos sueltos con proporción equilibrada de partículas de arena, limo y arcilla
- Arena de cuarzo

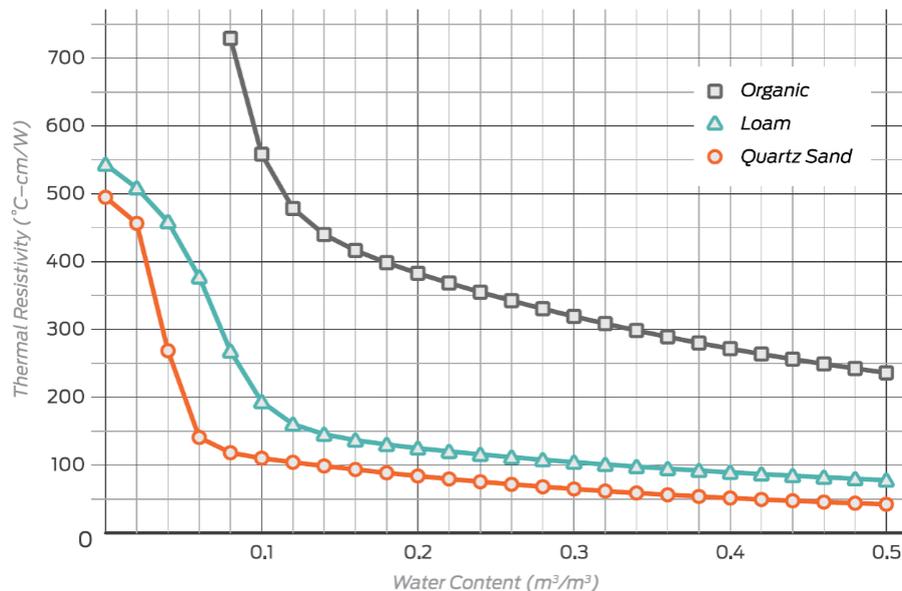


Figura 2 Curva Dry Out para diferentes materiales [1]

El grado de compactación es otro factor muy a tener en cuenta. Esta magnitud se determina por medio de la densidad aparente del terreno (Bulk Density) .Esta propiedad se define como la masa de muchas partículas del material dividida por el volumen total que ocupan. Este volumen incluye el total de las partículas ,el volumen vacío entre ellas (aire) y el poro interno. Debido a que la resistividad térmica del aire es muy alta, mayores densidades aparentes (mayor compactación) tendrán una resistividad térmica menor como se puede apreciar en la siguiente imagen.

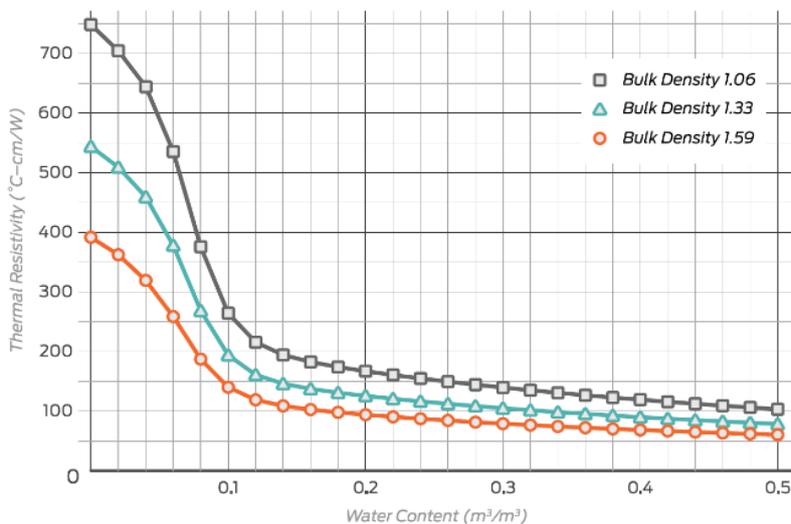


Figura 3 Curva Dry Out para diferentes grados de compactación [1]

En la siguiente figura se representa la influencia de la temperatura del terreno en la curva Dry Out. Temperaturas más elevadas del terreno presentan un punto crítico de contenido de agua menor, por lo que el suelo se comporta rápidamente como conductor del calor respecto a temperaturas menos elevadas.

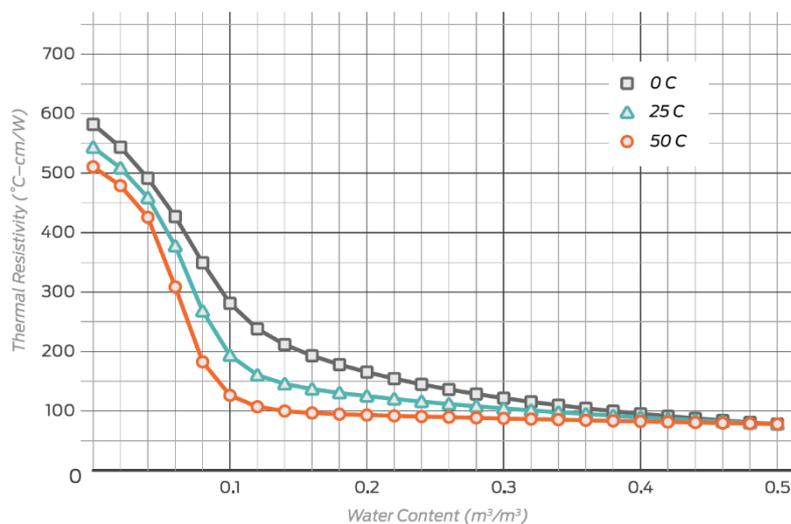


Figura 4 Curva Dry Out para diferentes temperaturas del terreno [1]

2 CABLES SUBTERRÁNEOS DE MEDIA Y ALTA TENSION

En el siguiente apartado se explicarán las formas constructivas, métodos de instalación y conceptos básicos de los cables subterráneos de media y alta tensión. Existen muchas formas de clasificar los cables subterráneos, las principales son:

1. Por su tensión aplicada los cables pueden ser:

- Baja tensión: Hasta 1 kV
- Media tensión: Entre 1 y 30 kV
- Alta tensión: Hasta 132 kV
- Muy alta tensión: Tensiones superiores a 132 kV

2. Por su número de conductores:

- Unipolar: Un solo conductor
- Bipolar: Dos conductores
- Tripolar: Tres fases en el mismo cable

3. Por su aislamiento

- Aislamiento de papel
- Aislamiento por materiales termoestables XLPE
- Aislamiento por materiales termoplásticos PVC

4. Por el método de instalación

- Directamente enterrados (el cable está en contacto con el terreno)
- Conductores en canalizaciones:
 - Conductores entubados con tubos en contacto con el terreno
 - Dispuestos en galerías sin estar entubados
 - En galerías y entubados

5. Por su sistema de puesta a tierra (conexión de las pantallas)

- Conexión en ambos extremos ("both ends")
- Conexión en un extremo ("single point")
- Cruzamiento de pantallas ("crossbonding")

2.1 COMPOSICIÓN DE LOS CABLES

Los cables subterráneos de media y alta tensión están formados por las siguientes capas concéntricas.

- 1-Conductor.
- 2-Semiconductora Interna.
- 3-Aislamiento.
- 4-Semiconductora externa.
- 5-Pantalla metálica.
 - WS (hilos de cobre)
 - TS (cinta de cobre)
- 6-Cubierta exterior o chaqueta

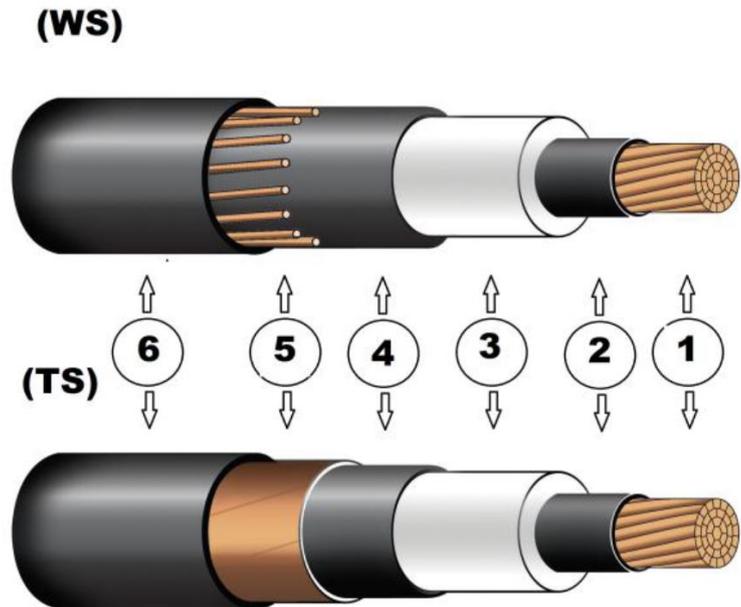


Figura 5 Partes de un cable subterráneo [2]

2.1.1 CONDUCTOR

El conductor es el elemento central del cable. Su función principal es el transporte de la corriente en régimen nominal, en sobrecarga y en cortocircuito. Comúnmente se utiliza cobre o aluminio.

-El cobre es más caro y presenta mejores propiedades eléctricas (menor resistividad). Para el transporte de una misma carga se necesita aproximadamente 1.6 veces más de sección en conductores de aluminio. $S_{Al} \approx 1.6 S_{Cu}$

-Para una misma sección el aluminio es más ligero que el cobre. Aproximadamente para una misma sección la masa del aluminio es 3 veces menor. $P_{Al} \approx 0.3 P_{Cu}$

Con el fin de reducir el efecto piel (se explicará en los siguientes apartados) la sección conductora se divide en diferentes secciones. Destacan tres tipologías de diseño:

-Cables compuestos por alambres redondos. Se disponen concéntricamente y se ensamblan en hélice con el fin de reducir el efecto proximidad.

-Secciones compactas. Comprimidos para obtener una superficie de contacto lisa y uniforme con el fin de evitar contactos rugosos entre las diferentes secciones.

-Secciones sectoriales. Están formados por varias secciones sectoriales. El conjunto da lugar a una sección cilíndrica

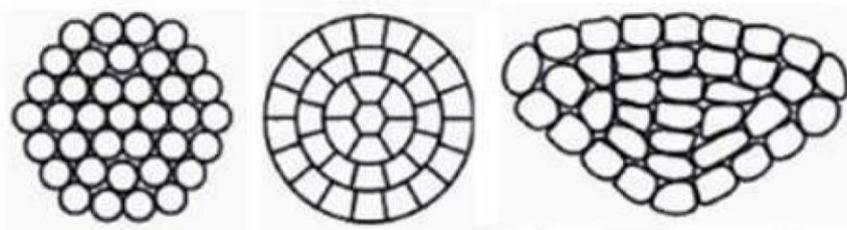


Figura 6 Sección compuesta por alambres, sección compacta y sectorial [2]

2.1.2 CAPAS SEMICONDUCTORAS

Las capas semiconductoras están ubicadas en contacto directo con el conductor y el aislamiento. Su función principal es conseguir que el campo eléctrico sea homogéneo (líneas equipotenciales concéntricas). Con ello se consigue eliminar concentraciones puntuales de campo eléctrico generadas por efecto piel, evitando ruptura del aislamiento (arco eléctrico a tierra) o deterioro del aislamiento (sobrecalentamientos y aparición de descargas parciales)

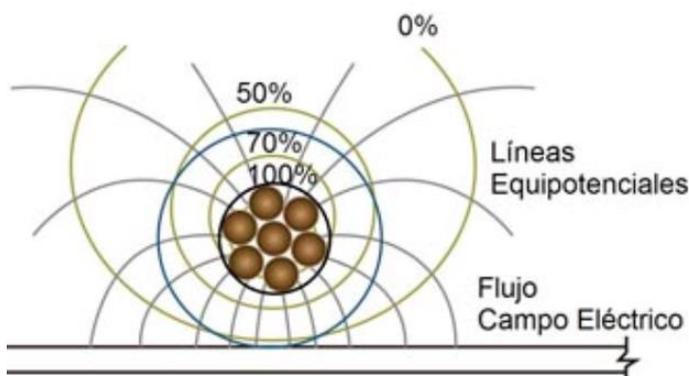


Figura 7 Distribución del campo eléctrico sin capas semiconductoras [3]

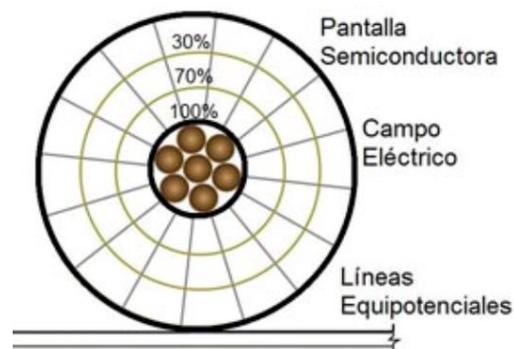


Figura 8 Cable eléctrico con capas semiconductoras [3]

2.1.3 AISLAMIENTO

La capa aislante confina la corriente eléctrica dentro de la sección conductora. Esta capa debe ser capaz de soportar voltajes transitorios sin que se produzca ruptura del dieléctrico. La temperatura máxima que puede soportar el dieléctrico determina la capacidad nominal de transporte del

conductor. Si se supera dicha temperatura máxima se puede acelerar el envejecimiento del cable reduciendo su vida útil. Los tres parámetros principales para caracterizar un aislante son:

-Resistencia Térmica del aislamiento ($K \cdot m/W$): Es un cte física asociada al material, mide su capacidad para conducir el flujo de calor. Los valores de resistencia térmica de los aislantes están tabulados en la norma UNE_21144_2_1

Material	Resistividad térmica (ρ_T) K · m/W
<i>Materiales aislantes*</i>	
Papel en los cables de tipo "sólido"	6,0
Papel en los cables de aceite fluido	5,0
Papel en los cables con presión externa de gas	5,5
Papel en los cables con presión interna de gas:	
a) preimpregnado	5,5
b) impregnado en masa	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
Policloruro de vinilo:	
- cables hasta 3 kV inclusive	5,0
- cables de más de 3 kV	6,0
EPR:	
- cables hasta 3 kV inclusive	3,5
- cables de más de 3 kV	5,0
Goma butílica	5,0
Goma	5,0
<i>Cubiertas protectoras</i>	
Compuesto de yute y materiales fibrosos	6,0
Protección "goma sandwich"	6,0
Policloropreno	5,5
PVC:	
- cables hasta 35 kV inclusive	5,0
- cables de más de 35 kV	6,0
PVC/betún sobre cubiertas de aluminio corrugado	6,0
PE	3,5
<i>Materiales para las instalaciones en conductos</i>	
Hormigón	1,0
Fibra	4,8
Amianto	2,0
Cerámico	1,2
PVC	6,0
PE	3,5

Figura 9 Resistencias térmicas para diferentes materiales aislantes [4]

-Permitividad relativa del aislamiento (ϵ) y Factor de pérdida del aislamiento ($\tan \delta$):

Estos parámetros describen como se ve afectado el dieléctrico por el campo eléctrico, estado del aislamiento y la relación entre la potencia activa y reactiva cuando el dieléctrico se encuentra sometido por una tensión sinusoidal.

1	2	3
Tipo de cable	ϵ	$\text{tg } \delta^*$
<i>Cables aislados con papel Impregnado</i>		
Tipo "sólido", de impregnación total, preimpregnado o impregnado con materia no migrante	4	0,01
De aceite fluido, con cubierta metálica ^a	hasta $U_0 = 36$ kV	0,003 5
	hasta $U_0 = 87$ kV	0,003 3
	hasta $U_0 = 160$ kV	0,003 0
	hasta $U_0 = 220$ kV	0,002 8
De presión de aceite, tipo en tubo ^b	3,7	0,004 5
De presión externa de gas ^c	3,6	0,004 0
De presión interna de gas ^d	3,4	0,004 5
<i>Cables aislados con otros materiales</i>		
Goma butílica	4	0,050
EPR ^e		
cables de tensiones inferiores o iguales a 18/30 (36) kV	3	0,020
cables de tensiones superiores a 18/30 (36) kV	3	0,005
PVC ^e	8	0,1
PE (HD y LD) ^e	2,3	0,001
XLPE ^e		
cable de tensiones inferiores o iguales a 18/30 (36) kV (no "cargado")	2,5	0,004
cables de tensiones superiores a 18/30 (36) kV (no "cargado")	2,5	0,001
cables de tensiones superiores a 18/30 (36) kV ("cargados")	3,0	0,005
PPL		
cables de tensiones superiores o iguales a 63/110 kV	2,8	0,001 4

Figura 10 Valores tabulados ϵ y $\text{tg } \delta$ [5]

Los materiales aislantes se dividen principalmente en, aislantes secos e impregnados

Aislamientos impregnados: Están formados por capas encintadas de fibra celulosa impregnadas en aceites. Este tipo de aislamiento ofrece excelentes características mecánicas. La pérdida de impregnación supone un gran riesgo para estos aislantes. Se distinguen dos tipos principalmente:

-Impregnación en masa (Mass impregnated): El aceite en este tipo de aislante se encuentra estático entre las capas de papel.

-Aceite fluido (Oil filled): En este tipo de cables el aceite circula por el interior del conductor impregnando y renovando el aceite encareciendo el coste de la instalación.

Aislamientos secos: Formado por polímeros extruidos cuya resina se obtiene de la polimerización de hidrocarburos. Los materiales más comunes son el XLPE (polietileno reticulado), el EPR (etileno propileno), el PE (polietileno) y el PVC (policloruro de vinilo).

El aislamiento más utilizado en alta tensión es el XLPE (90°C). El EPR y PE son más comunes en media tensión.

2.1.4 PANTALLA

Las pantallas están constituidas por conductores metálicos no magnéticos (cobre o aluminio). Esta pantalla hará la función de conductor de protección, soportará las corrientes de derivación, confinará el campo eléctrico en el interior del cable y limitará la influencia ante potenciales inducidos por campos eléctricos externos. Las pantallas deben conectarse a tierra. Existen 3 formas de conexión típicas:

-Conexión en ambos extremos (both ends): Se conectan ambos extremos del cable a tierra y en cortocircuito con la tierra de las demás fases. Esto permite la circulación de las corrientes de las demás puestas a tierra. Este tipo de conexión se utiliza para líneas cortas.

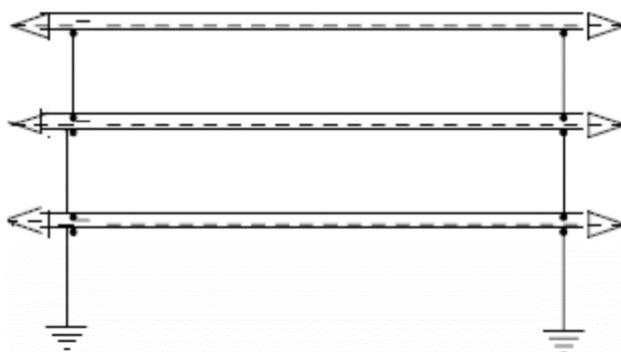


Figura 11 Conexión Both ends [6]

-Conexión en un extremo (single point): En este tipo de conexión las pantallas solo se conectan a un extremo del cable y están aisladas de las demás puestas a tierra evitando la circulación de corrientes entre puestas a tierra. Como consecuencia se generan tensiones inducidas en la pantalla que limita la longitud de la línea. Para aumentar la longitud de la línea en ocasiones se conecta a tierra su punto central.

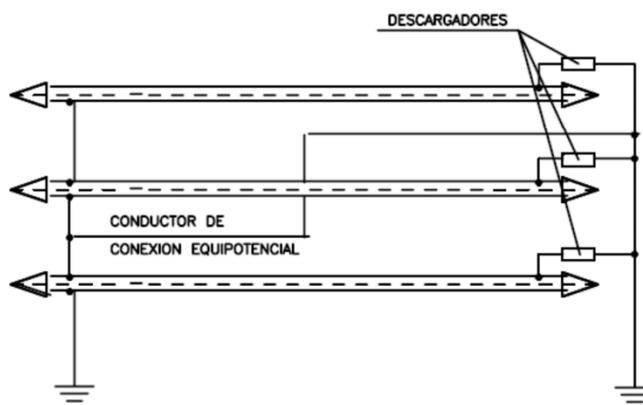


Figura 12 Conexión single point [6]

-Cruzamiento entre pantallas (crossbonding): Este tipo de conexión es una modificación de la conexión both ends, se conectan las pantallas en ambos extremos y se cruzan con el fin de anular las corrientes de circulación entre las puestas de tierra. Con ello se consigue aumentar la longitud de la línea.

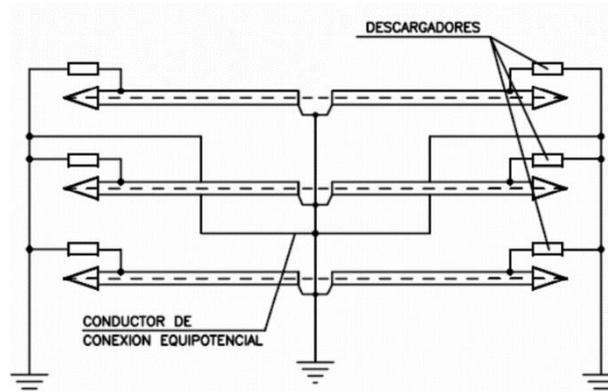


Figura 13 Conexión Crossbonding [6]

2.1.5 CUBIERTA EXTERIOR

La cubierta exterior tiene como función principal proteger al cable contra agentes externos dañinos, de tipo atmosférico, físicos, químicos biológicos...

Otra de sus funciones es aislar la pantalla de tierra. Los principales materiales de construcción son el Polietileno (PE) o Policloruro de vinilo (PVC). Si el cable lleva armadura (lo cual es muy poco común en cables subterráneos) se suele utilizar como cubierta exterior materiales fibrosos como servidumbre para la armadura (armor serving).

2.2 MÉTODOS DE INSTALACIÓN

Existen numerosas tipologías y combinaciones a la hora de instalar cables subterráneos. Las líneas eléctricas se dispondrán en general por terrenos de dominio público, en suelo urbano o en curso de urbanizaciones. A la hora del tendido se deberá tener en cuenta los radios de curvatura mínimos que pueden soportar los cables sin deteriorarse. Los métodos de instalación más usados son los siguientes:

2.2.1 DIRECTAMENTE ENTERRADOS

El cable se entierra en una zanja directamente sobre el terreno a una profundidad no inferior a 0.6m manteniendo la distancia reglamentaria entre los conductores. Por lo general dicha zanja se vuelve a rellenar con los mismos materiales o con añadidos de conductividad térmica más elevada. Sobre el fondo de la zanja se colocará una capa de arena de espesor no inferior a 5cm. Por encima del conductor se colocará otra capa no inferior a 10cm de espesor con el fin de proteger el cable de futuras excavaciones. Los cables deberán tener una protección mecánica en su parte superior para prevenir posibles impactos, así como una cinta de señalización. Este método de instalación favorece la disipación de calor al estar el cable en contacto con el terreno.

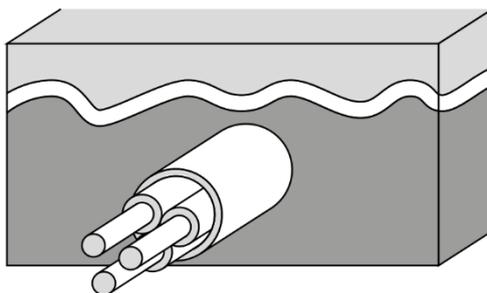


Figura 14 Cable directamente enterrado [7]

2.2.2 EN CANALIZACIÓN ENTUBADA

En este método de instalación los cables se alojan directamente en canalizaciones entubadas, estas suelen ser de PVC, acero galvanizado u hormigón. La profundidad de la canalización no será inferior a 0.6m. Presentarán una señalización como la de los cables directamente enterrados. Las canalizaciones ofrecen una protección mecánica extra y alargan la vida útil del cable ya que evitan el contacto directo con agentes químicos, humedad...

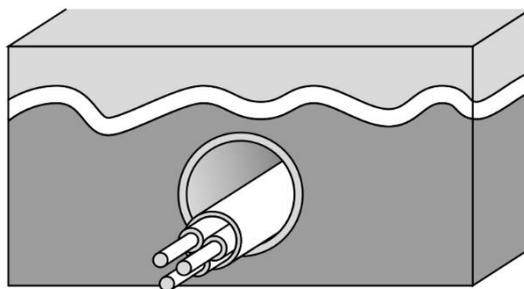


Figura 15 Canalización entubada [7]

2.2.3 EN GALERIAS

Se diferencian dos tipos principales de galerías:

-Galerías visitables: Cuyas dimensiones interiores son suficientes para la circulación del personal.

-Galería o zanja registrable: En las que sus dimensiones interiores no son suficientes para la circulación del personal. Este tipo de galerías se revisan por medio de arquetas con tapas de registro.

Las galerías serán generalmente de hormigón armado y se dimensionarán para soportar la carga de tierra superior y lateral. Los cables se fijarán a las paredes o estructuras de la galería mediante elementos de sujeción como regletas, bandejas, bridas...con el fin de evitar que los esfuerzos térmicos y electrodinámicos puedan moverlos o deformarlos. Dichos elementos de sujeción u otros elementos metálicos dentro de la galería se conectarán a la red de tierra de la galería. Los cables dentro de la galería pueden estar canalizados o no.

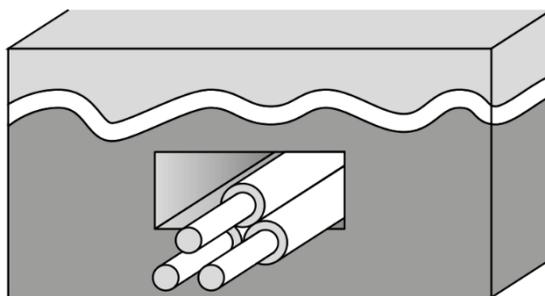


Figura 16 Cable en galería no registrable [7]

3 CÁLCULO DE LA AMPACIDAD NORMA UNE 21144

Las ecuaciones y procedimientos para el cálculo de la ampacidad, resistencias térmicas y valores tabulados se obtendrán de la norma española UNE 21144 elaborada por AENOR, cuyo equivalente internacional es IEC 60287. Esta norma se aplica tanto a líneas subterráneas como a líneas aéreas de conductor desnudo de corriente continua de tensión no superior a 5Kv y todas las tensiones de corriente alterna. Tanto para corriente continua como para corriente alterna la norma concierne exclusivamente el funcionamiento en régimen permanente.

Se desglosa en los siguientes apartados:

3.1 NORMA UNE 21144

1ª Parte: Ecuaciones de intensidad admisible y cálculo de pérdidas

21144_1-1. Generalidades

21144_1-2. Factores de pérdidas por corrientes de Foucault

21144_1-3. Reparto de la intensidad entre cables unipolares dispuestos en paralelo y cálculo de pérdidas por corrientes circundantes

2ª Parte: Resistencia térmica

21144_2-1: Cálculo de la resistencia térmica

21144_2-2: Método para el cálculo de los factores de reducción de la intensidad admisible de los grupos de los cables al aire libre, protegidos de la radiación solar.

3ª Parte: Secciones sobre condiciones de funcionamiento

21144_3-1: Condiciones de funcionamiento de referencia y selección del tipo de cable.

21144_3-2: Optimización económica de las secciones de los cables eléctricos de potencia.

21144_3-3: Cables que cruzan fuentes de calor externas

3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La ampacidad se define como la máxima corriente que es capaz de transportar un conductor en unas condiciones ambientales determinadas. Es la máxima intensidad de corriente que puede circular por un conductor en régimen permanente sin sobrepasar los límites de temperatura que afecten las características físicas y eléctricas del mismo. Esta corriente varía según las condiciones en que se encuentre el conductor, su sección, el material de su aislamiento y de la cantidad de conductores agrupados.

Las ecuaciones y procedimientos para el cálculo de la ampacidad descritos en la norma UNE 21144 e IEC 60287 se basan en el modelo termoeléctrico publicado en 1957 por los ingenieros estadounidenses Neher-McGrath.

3.2.1 RESISTENCIA TÉRMICA T

La resistencia térmica de un material es una propiedad física que se define como el valor de la diferencia de temperatura, en grados Kelvin entre las dos caras opuestas de un cubo de un centímetro de arista, que permite el paso de calor de un watio. Esta propiedad determina la calidad de un aislante. Para materiales aislantes se necesitan resistividades térmicas elevadas. Todo lo contrario ocurre con un cable de potencia donde lo ideal son valores bajos con el fin de aumentar la capacidad de disipación de calor. Dentro de un cable las partes conductoras tienen resistividad térmica despreciable ya que su conductividad térmica es muy alta, se considerarán para los cálculos la resistividad térmica del aislamiento, armadura, cubierta y medio exterior.

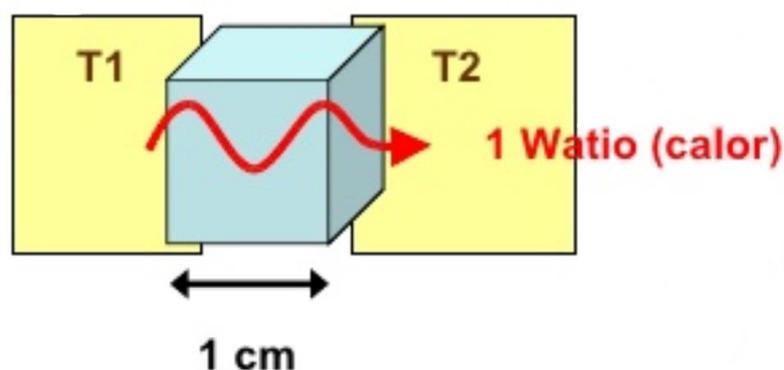


Figura 17 Definición de resistividad térmica [8]

3.2.2 EFECTO PROXIMIDAD y_p

Ocurre cuando un cable por el que circula corriente es afectado por otro cable externo, afectando a la uniformidad de la densidad de corriente. Este fenómeno es provocado por la inductancia mutua entre cables. Por otro lado, la repulsión o atracción de las cargas que experimentan dos conductores próximos también generan una discontinuidad en el reparto interno de la densidad de corriente en los conductores. El resultado es una reducción en la sección eficaz del cable, aumento de la resistencia y por ello aumento de las pérdidas eléctricas.

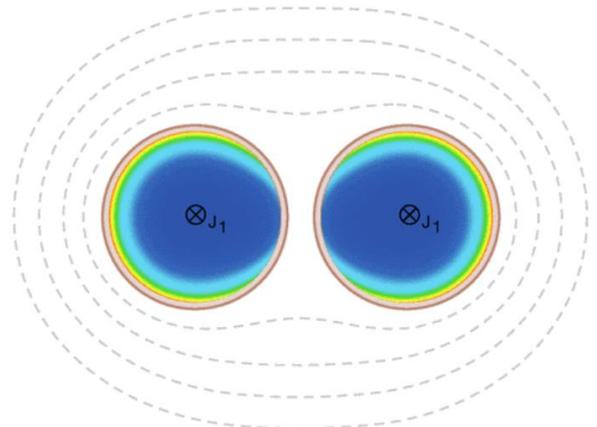


Figura 18 Densidad de corriente decreciente del color azul al color rojo [10]

3.2.3 EFECTO PELICULAR y_s

Este efecto también es conocido como efecto piel o efecto Kelvin y no se produce en cables de corriente continua. Para los conductores de corriente alterna la interacción de los campos eléctricos y magnéticos dentro del conductor origina una distribución no homogénea de la densidad de corriente siendo ésta mayor en la superficie y cercanías del conductor. Este efecto aumenta con el aumento de la frecuencia. El resultado, como en el efecto proximidad es una reducción en la sección eficaz del cable, aumento de la resistencia y por ello aumento de las pérdidas eléctricas

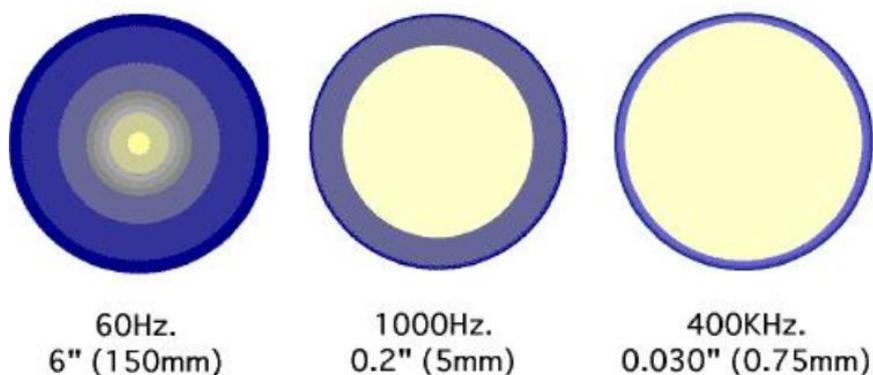


Figura 19 Aumento del efecto piel con el aumento de la frecuencia. Intensidad (azul) [11]

3.2.4 PÉRDIDAS EN EL DIELECTRICO W_d

Las pérdidas dieléctricas originan un calentamiento y deterioro del dieléctrico. Deben tenerse muy en cuenta para cables de tensión elevada ya que son proporcionales al cuadrado de la tensión U^2 . Se producen por tres fenómenos.

1- Por rozamiento de cargas debido a la oscilación de estas como consecuencias del campo alterno al que están sometidas generando calor.

2- Por la corriente de fuga I_{fuga} que provoca pérdidas reales que se disipan en forma de calor.

3- Por efecto capacitivo, debido a que el aislante se encuentra entre capas conductoras de distinto potencial, apareciendo la corriente de fuga capacitiva I_C

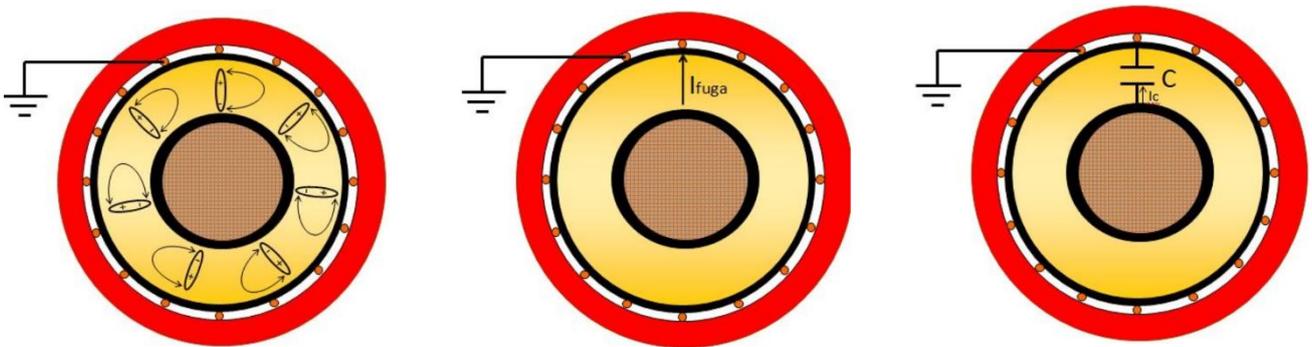


Figura 20 Fenómenos dieléctricos 1,2,3 [12]

3.2.5 PÉRDIDAS EN LAS PANTALLAS λ_1

Consisten en las pérdidas originadas por las corrientes de circulación λ'_1 y por las corrientes de Eddy o Foucault λ''_1 de forma que $\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$. La forma de conexión a tierra es determinante para que se produzca un tipo de pérdida u otra

-Corrientes de circulación: Se producen en conexiones Both ends. La corriente que circula por el conductor induce corrientes sobre la pantalla

-Corrientes de Foucault: Para conexiones Single Point y en conexiones Crossbonding. Se generan debido a tensiones inducidas por las pantallas de las demás conexiones a tierra

3.2.6 MODELO TERMO-ELÉCTRICO DE UN CABLE

Para el cálculo de la ampacidad según el modelo termo-eléctrico de un cable, se divide el sistema en varias capas que van desde el eje longitudinal del cable (conductor, capas semiconductoras, aislamiento, pantalla...) hasta el medio externo que lo rodea incluido. Debido a la circulación de corriente por el conductor se genera un flujo de calor hacia el exterior que origina incrementos de temperatura entre las distintas capas ocasionando pérdidas eléctricas y dieléctricas. Estos incrementos de temperatura tienen que ser iguales a la diferencia de temperaturas entre el conductor y el medio exterior y limitarán la corriente máxima que puede transportar el cable sin comprometer su vida útil.

En este modelo se sustituyen:

- Las fuentes generadoras de calor $Q(W) \rightarrow$ Fuentes eléctricas de intensidad $I(A)$
- Las resistencias térmicas $R_T(K/W) \rightarrow$ Resistencias eléctricas $R(\Omega)$
- La temperatura entre las diferentes capas $\Delta T(K) \rightarrow$ Tensión en cada nodo $\Delta v(v)$

De esta forma la ley de Ohm se traduce a su símil térmico, conocida como ley de Ohm térmica.

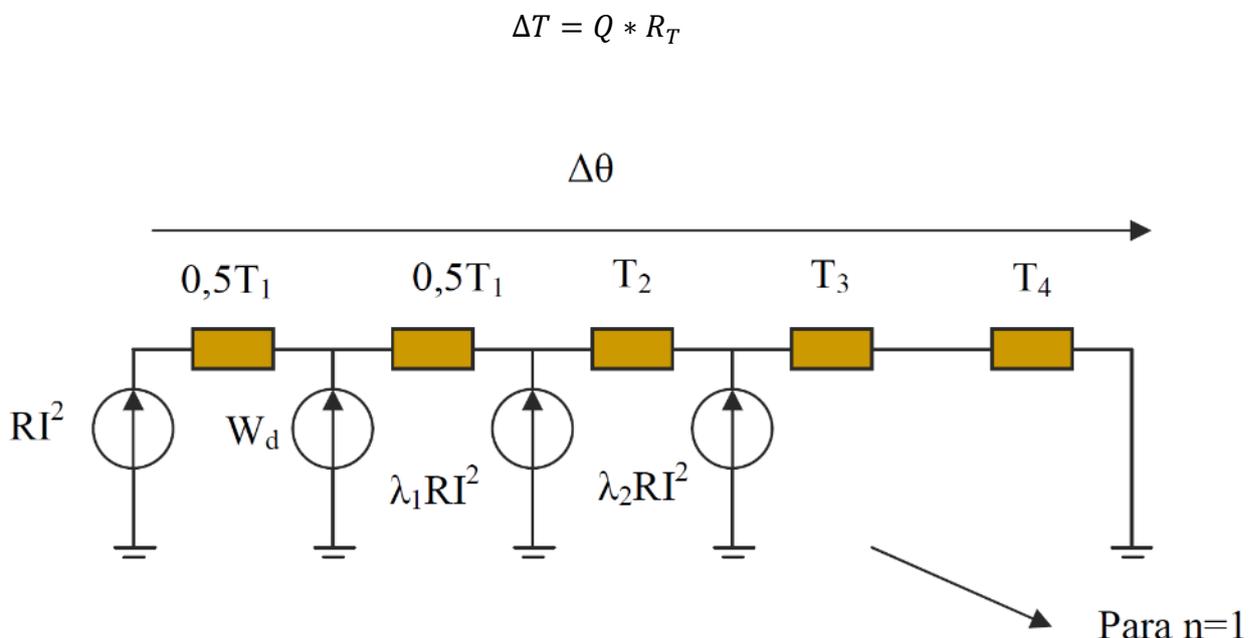


Figura 21 Modelo termo-eléctrico de un cable [9]

Donde

- $\Delta\theta$: Incremento de temperatura del conductor por encima de la temperatura ambiente (K)
- R : Resistencia (AC) del conductor a la máxima temperatura de funcionamiento (Ω/m)
- $T1$: R. Térmica por unidad de longitud, entre conductor y envolvente (Km/W)
- $T2$: R. Térmica por unidad de longitud, entre envolvente y la armadura (Km/W)
- $T3$: R. Térmica por unidad de longitud, del revestimiento (Km/W)
- $T4$: R. Térmica por unidad de longitud, del terreno (Km/W)
- Wd : Pérdidas dieléctricas para el aislamiento que rodea al conductor (W/m)
- n : Número de conductores portadores de carga
- $\lambda1$: Relación de pérdidas de la pantalla respecto a las pérdidas totales de todos los conductores en el cable.
- $\lambda2$: Relación de pérdidas de la armadura respecto a las pérdidas totales de todos los conductores en el cable.

3.3 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

La norma distingue 3 escenarios en función del tipo de terreno en el que se encuentren enterrados los cables subterráneos:

- Cables enterrados donde la desecación del suelo no ocurre
- Cables enterrados donde se evita la desecación del terreno.
- Cables enterrados donde se produce desecación parcial del terreno.

Consideraremos el primero de los 3 escenarios. En las siguientes secciones se detallarán los procedimientos para el cálculo de los parámetros R , $T1$, $T2$, $T3$, $T4$, Wd , $\lambda1$ y $\lambda2$. Una vez calculados los parámetros se determinará la ampacidad.

3.3.1 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

La norma deduce la ampacidad de un cable a partir de la expresión del calentamiento de un conductor por encima de la temperatura ambiente

$$\Delta\theta = (I^2R + 0.5Wd)T1 + [I^2R(1 + \lambda1) + Wd]nT2 + [I^2R(1 + \lambda1 + \lambda2) + Wd]n(T3 + T4)$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - Wd[0.5T1 + n(T2 + T3 + T4)]}{RT1 + nR(1 + \lambda1)T2 + nR(1 + \lambda1 + \lambda2)(T3 + T4)}}$$

3.3.2 RESISTENCIA DEL CONDUCTOR R

La resistencia del conductor por unidad de longitud en corriente alterna y a la temperatura máxima de servicio viene dada por (4.3)

$$R = R'(1 + y_s + y_p)$$

- R es la resistencia del conductor a la temperatura máxima de servicio (Ω/m);
- R' es la resistencia del conductor con corriente continua a la temperatura máxima de servicio (Ω/m);
- y_s es el factor de efecto pelicular;
- y_p es el factor de efecto de proximidad.

$$R' = R_0(1 + \alpha_{20}(\theta - 20))$$

- R_0 es la resistencia del conductor en corriente continua a 20 °C (Ω/m).
- α_{20} es el coeficiente de variación a 20 °C de la resistividad en función de la temperatura, por Kelvin.
- θ es la temperatura máxima de servicio en grados (°C)

3.3.3 FACTORES DE EFECTO PELICULAR y_s Y EFECTO PROXIMIDAD y_p

El factor y_s depende de la frecuencia de la corriente de alimentación y de la resistencia del conductor en corriente continua. Este factor viene dado por :

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}$$

Donde:

- $x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'10^7}} k_s$
- f es la frecuencia de alimentación (Hz)
- K_s es un valor tabulado que se obtiene de la tabla 2 en 21144_1-1

El factor de efecto proximidad se calcula diferente dependiendo si el cable es bipolar o tripolar, para el caso tripolar (o tres cables unipolares) muy común en media y alta tensión y_p se calcula:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \times \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right]$$

Donde:

- $x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'10^7}} k_p$
- S es la distancia entre ejes de los conductores (mm)
- d_c es el diámetro del conductor (mm)
- K_p es un valor tabulado que se obtiene de la tabla 2 en UNE 21144_1-1

3.3.4 FACTORES DE PÉRDIDAS EN EL DIELECTRICO W_d

Como se ha comentado en la sección de fundamentos teóricos estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la tensión U^2 por lo que habrá que tenerlas muy en cuenta para las líneas de alta tensión. Las pérdidas dieléctricas, por unidad de longitud y en cada fase (W/m) vienen dadas por:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$$

Donde:

- ω es $2\pi f$ (1/s)
- C es la capacidad por unidad de longitud (F/m)
- U_0 es la tensión con relación a tierra (V)
- ε es la permitividad relativa del aislamiento
- D_i es el diámetro exterior del aislamiento (con exclusión de la pantalla) (mm)
- $\tan \delta$ es el factor de pérdidas tabulado en la tabla 3 en UNE 21144_1-1
- d_c es el diámetro del conductor (mm)
- $C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} * 10^{-9}$ (F/m)

3.3.5 FACTORES DE PÉRDIDAS EN LAS PANTALLAS λ_1

La relación de pérdidas en las pantallas metálicas λ_1 es consecuencia de:

- Las pérdidas originadas por las corrientes de circulación λ_1'
- Las pérdidas originadas por las corrientes de Eddy o Foucault λ_1''

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

Se puede considerar que:

- Para conexión de las pantallas single point $\rightarrow \lambda_1' = 0 \quad \lambda_1'' \neq 0$
- Para conexión de las pantallas both ends $\rightarrow \lambda_1' \neq 0 \quad \lambda_1'' = 0$
- Para conexión de las pantallas crossbonding $\rightarrow \lambda_1' = 0 \quad \lambda_1'' \neq 0$

Debido a que existen varias tipologías de conexión de las pantallas con respecto a tierra y en consecuencia para cada una de ellas un procedimiento de cálculo para λ'_1 nos centraremos para el caso de 3 cables unipolares dispuestos en capa con conexión en cortocircuito en ambos extremos (both ends $\lambda''_1=0$) $\rightarrow \lambda_1 = \lambda'_1$. Por otro lado se tomará $\lambda_2 = 0$ debido a que consideraremos cables sin armadura.

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} * \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

Donde:

- ω es $2\pi f$ (1/s)
- X_1 es la reactancia por unidad de longitud de la pantalla (Ω/m)
- S es la distancia entre los ejes del conductor en la sección considerada (mm)
- d es el diámetro medio de la cubierta metálica (mm)
- R_s es la resistencia de la pantalla a su temperatura máxima de funcionamiento (Ω/m)
- R_{s0} es la resistencia de la pantalla a su temperatura a 20°C
- θ_{sc} es la temperatura máxima de servicio de la pantalla ($^\circ\text{C}$)
- θ_c es la temperatura del conductor ($^\circ\text{C}$)
- W_d son las pérdidas dieléctricas por unidad de longitud (W/m)
- T_1 es la resistencia térmica del aislamiento que se encuentra entre conductor-cubierta (Km/W)

Los valores X_1 , R_s , θ_{sc} son simultáneamente:

- $X_1 = 2\omega \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} * \left(\frac{S}{d}\right) \right\} * 10^{-7}$
- $R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)]$
- $\theta_{sc} = \theta_c - (I^2 R + 0.5 W_d) * T_1$

3.3.6 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

Los cables de potencia están formados por varios niveles de aislamiento y capas de diferentes materiales. Cada uno de estos materiales tiene asociada una resistividad térmica y en función de ésta obstaculizará más o menos la disipación de calor generada por el conductor hacia el exterior, con el fin de alcanzar el equilibrio térmico (como consideraremos cables sin armadura $T_2=0$)

La resistencia térmica total T será $\rightarrow T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$

- T_1 resistencia térmica del aislamiento que se encuentra entre el conductor y la envolvente
- T_2 resistencia térmica de la cubierta que se encuentra entre el aislamiento y la armadura solo para cables con armadura
- T_3 resistencia térmica de la cubierta externa
- T_4 resistencia externa

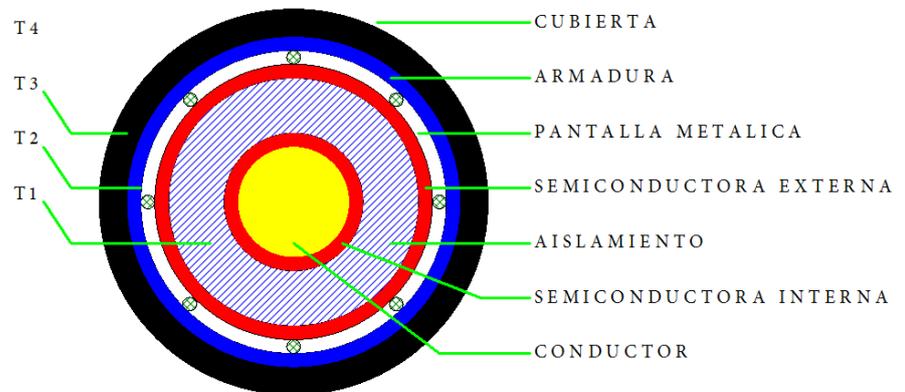


Figura 22 Diferentes capas de un cable con su resistencia térmica asociada [autor]

RESISTENCIA TÉRMICA T1

La norma diferencia cables unipolares, bipolares y tripolares. Para cables unipolares:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} * \ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right)$$

- T_1 resistencia térmica del aislamiento que se encuentra entre el conductor y la envolvente (K·m/W)
- ρ_T es la resistividad térmica del aislamiento (K·m/W)
- d_c es el diámetro del conductor (mm)
- t_1 es el espesor del aislamiento entre conductor y envolvente (mm)

RESISTENCIA TÉRMICA T3

Las cubiertas exteriores están formadas generalmente por capas concéntricas. La norma no distingue entre cables unipolares y tripolares.

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} * \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D'_a}\right)$$

- T3 parámetro de la resistencia térmica de la cubierta exterior (K·m/W)
- ρ_T es la resistividad térmica del aislamiento (K·m/W)
- t_3 es el espesor del revestimiento exterior (mm)
- D'_a para cables no armados es el diámetro exterior del componente inmediatamente debajo, por ejemplo, una cubierta, pantalla o revestimiento (mm)

RESISTENCIA TÉRMICA T4

Es la resistencia externa al cable y se reparte en varios factores.

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

Como consideraremos cables directamente enterrados los parámetros T'_4 y T''_4 desaparecen de la ecuación y $T_4 = T'''_4$

- T'_4 Es la resistencia térmica del aire entre la cubierta externa del cable y el ducto (K·m/W)
- T''_4 Es la resistencia térmica del ducto (K·m/W)
- T'''_4 Es la resistencia externa al ducto, la resistencia del terreno. (K·m/W)

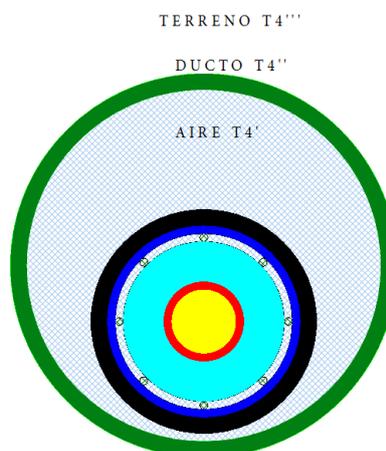


Figura 23 Representación de los diferentes factores del parámetro T4 [autor]

La norma distingue entre cables unipolares y tripolares.

Para cables unipolares:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} * \rho_T * \ln \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right)$$

- ρ_T es la resistividad térmica del suelo (K·m/w)
- L es la distancia de la superficie del suelo al eje del cable (mm)
- D_e es el diámetro exterior del cable (mm)
- $u = \frac{2L}{D_e}$

Para cables tripolares:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} * \rho_T * \left\{ \ln \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

- s_1 es la distancia entre ejes de los cables adyacentes (mm)
- Cuando el valor de u es superior a 10 el término $u + \sqrt{u^2 - 1}$ puede sustituirse por $2u$

3.3.7 FACTORES DE CORRECCIÓN

Una vez determinados los parámetros mencionados en las secciones anteriores y calculada la ampacidad es necesario aplicar factores de corrección. Partiendo del valor teórico de ampacidad I_a en condiciones especificadas por la norma, se multiplica la ampacidad por cada uno de los denominados factores de corrección. Estos factores de corrección se extraen de la norma UNE 211435 equivalente a la IEC 60502, de forma que la ampacidad I para cables directamente enterrados será:

$$I = I_a * FC_{Profundidad} * FC_{Ambiente} * FC_{Tsuelo} * FC_{Rtérmica}$$

A continuación, se muestran las tablas necesarias para la obtención de los factores de corrección.

- $FC_{profundidad} * FC_{Tambiente}$ para tendidos con temperatura del medio ambiente diferentes a 40°C y temperatura del terreno diferente de 25°C

Temperatura máxima del conductor, °C	Temperatura del aire ambiente								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
90	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77
105	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83
Temperatura máxima del conductor, °C	Temperatura del terreno en cables soterrados, °C								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
90	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
105	1,09	1,06	1,03	1,00	0,97	0,94	0,90	0,87	0,83

Figura 24 Norma UNE_21144 Tabla A6 [13]

- $FC_{Rtérmica}$ para terrenos con resistividad térmica diferente de 1.5 k·m/w

Cables directamente soterrados en triángulo en contacto							
Sección del conductor mm ²	Resistividad del terreno						
	0,8 K · m/W	0,9 K · m/W	1 K · m/W	1,5 K · m/W	2 K · m/W	2,5 K · m/W	3 K · m/W
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
400	1,30	1,24	1,19	1,00	0,88	0,79	0,73

Figura 25 Norma UNE_21144 Tabla A7 [13]

- $FC_{Profundidad}$ para tendidos a diferente profundidad de 1m

Cables de 3,6/6 kV a 18/30 kV. Profundidad tipo 1 m				
Profundidad m	Soterrados		En tubular	
	≤ 185 mm ²	> 185 mm ²	≤ 185 mm ²	> 185 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

Figura 26 Norma UNE_21144 Tabla A8 [13]

4 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS

Como se explicó en la primera sección, utilizaremos la teoría de grafos con el fin de (entre todas las combinaciones posibles) trazar la ruta óptima en cuanto a resistividad térmica del terreno para maximizar la ampacidad. En esta sección se explicarán conceptos básicos sobre los grafos utilizados y la forma en que se han implementado en este trabajo con Matlab.

4.1 DEFINICIÓN

La teoría de grafos es una rama de las matemáticas discretas, aplicadas y ciencias de la computación que estudia las propiedades de los grafos. Un grafo $G = (V, A)$ es una pareja ordenada en la que V es un conjunto no vacío de vértices y A es un conjunto de aristas. A consta de pares no ordenados de vértices de la forma (u, v) donde $u, v \in V$, entonces se dice que u, v son adyacentes y en el grafo se representa mediante una línea no orientada que une dichos vértices. Si el grafo es dirigido, se llama dígrafo, denotado por $D = (V, A)$, entonces el par (u, v) es ordenado y en el grafo se representa mediante una línea orientada que une dichos vértices. La forma de las aristas y posición de los vértices no es relevante, sólo importa a que vértices están unidas las aristas. Se puede variar la posición de los vértices-aristas con el fin de obtener un dibujo más claro. Los grafos son muy utilizados para la creación de mapas conceptuales, topología de redes de ordenadores, sociograma de redes sociales, planos de autopistas...

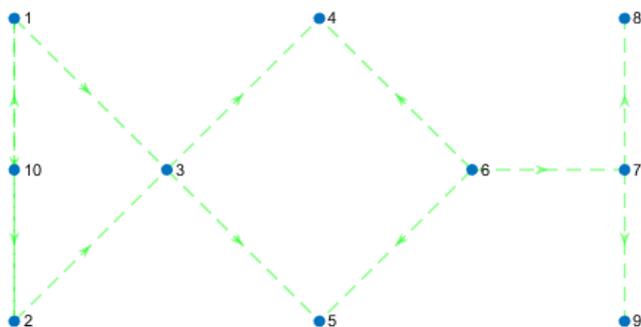


Figura 27 Grafo dirigido [autor]

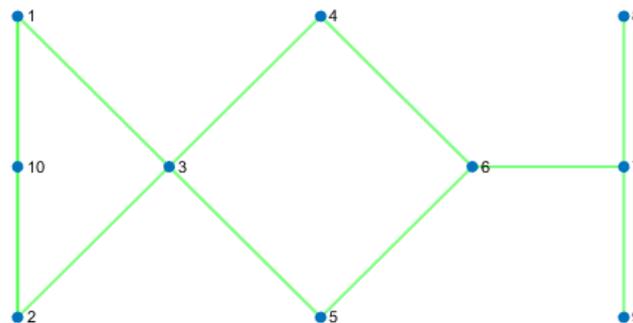


Figura 28 Grafo no dirigido [autor]

4.2 GRAFOS PONDERADOS

Existen muchos tipos de grafos (simple, multígrafo, hipergrafo, grafo plano, regular...). Para éste trabajo utilizaremos grafos no dirigidos ponderados. En los grafos ponderados se atribuye a cada arista un numero específico (normalmente entero o decimal) conocido como peso de la arista.

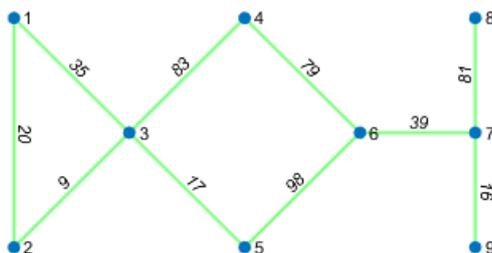


Figura 29 Ejemplo de grafo ponderado no dirigido [autor]

A la hora de representar los grafos, los vértices suelen llevar asociada una información. Ésta se almacena en una lista y solo será necesario para acceder a ella utilizar el índice del vértice. En lo que sigue la representación hacen referencia a las aristas con su peso asociado y a los vértices con su índice. Las dos representaciones más comunes para los grafos son:

Matriz de adyacencia

Se utiliza una matriz cuadrada de $n \times n$ (n es el número de vértices) donde las filas y las columnas hacen referencia a los vértices para almacenar en cada celda el peso de la arista asociada. Por ejemplo, en la matriz de adyacencia de la figura 25 la fila 3 (vértice 3) y columna 4 (vértice 4) $M(3,4)=83$ se corresponde con el peso en la figura 24 entre los vértices 3-4. Los elementos de la diagonal siempre son cero ya que no tiene sentido una ponderación entre el mismo vértice. Si fuera de la diagonal un elemento es 0 significa que no existe conexión entre vértices.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
V1	0	20	35	0	0	0	0	0	0
V2	20	0	9	0	0	0	0	0	0
V3	35	9	0	83	17	0	0	0	0
V4	0	0	83	0	0	79	0	0	0
V5	0	0	17	0	0	98	0	0	0
V6	0	0	0	79	98	0	39	0	0
V7	0	0	0	0	0	39	0	81	16
V8	0	0	0	0	0	0	81	0	0
V9	0	0	0	0	0	0	16	0	0

Figura 30 Matriz de adyacencia para el grafo de la figura 24 [autor]

Lista de adyacencia

Se utiliza una lista cuya dimensión es el número de aristas. En la primera columna (dividida en dos columnas) se almacenan los pares de vértices entre los que hay conexión y en la segunda columna el peso asociado a la arista. Los pares de vértices son ordenados, empezando por el vértice 1 seguido de todas sus conexiones, hasta el vértice n con todas sus conexiones. Por ejemplo, en la lista de adyacencia de la figura 26 (que se corresponde con el grafo de la figura 24) en la fila 3 la pareja de vértices (2,3) tiene un peso asociado de 9 como se puede comprobar en el grafo. Utilizaremos este tipo de representación

EndNodes		Weight
1	2	20
1	3	35
2	3	9
3	4	83
3	5	17
4	6	79
5	6	98
6	7	39
7	8	81
7	9	16

Figura 31 Lista de adyacencia, grafo de la figura 24 [autor]

4.2 PROBLEMA DE LA RUTA ÓPTIMA (SHORTEST PATH)

Objetivo: Dado un grafo ponderado encontrar la ruta óptima (la de menor longitud) entre los vértices i y j . La solución consistirá en proporcionar una lista con la secuencia de vértices $V_1 \dots V_K \dots V_P$ que forman la ruta óptima donde $V_1 = i$, $V_P = j$.

- Se define longitud (coste de un camino) como la suma de los pesos de aristas que recorre el camino.
- De esta forma se puede definir longitud como:

$$long([v_1, \dots, v_p]) = \sum_{k=1}^{p-1} coste(k, k+1)$$

- Se define ruta óptima entre los vértices i y j como el camino de longitud mínima entre los vértices i y j

4.2.1 ALGORITMO DE DIJKSTRA

Con este algoritmo se calcula la ruta óptima desde un nodo origen S a todos los demás vértices del grafo. Tiene como requisito que no existan pesos negativos (para grafos con pesos negativos se puede utilizar el algoritmo de Floyd-Warshall). A medida que se va conociendo una distancia mejor desde el vértice j al origen, se actualizan las mejores distancias conocidas a todos los vértices adyacentes a j.

PSEUDOCÓDIGO 1

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INIZIALIZACIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

S = Nodo origen

N = Número de nodos

Q = Lista de nodos (dimensión inicial = N) para los que no se ha encontrado el camino más corto. Al finalizar el algoritmo la lista se encuentra vacía

d = Vector (dimensión = N) en el que se almacenan las distancias del nodo S al resto de nodos.

```

d(S)=0
para todo v in N, pero S
    d(v) = ∞

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% BUCLE PRINCIPAL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

mientras $Q \neq \{\emptyset\}$

```

    u vértice en Q con  $\min\{d(v)\}$ 
    borrar u de Q
    para todo v en Q adyacente a u
        sí  $d(v) > d(u) + c(u,v)$ 
             $d(v) = d(u) + c(u,v)$ 
            prev(v) = u
        fin si

```

fin para

fin mientras

en la siguiente figura se representa un ejemplo sencillo de aplicación del algoritmo de Dijkstra generado con Matlab.

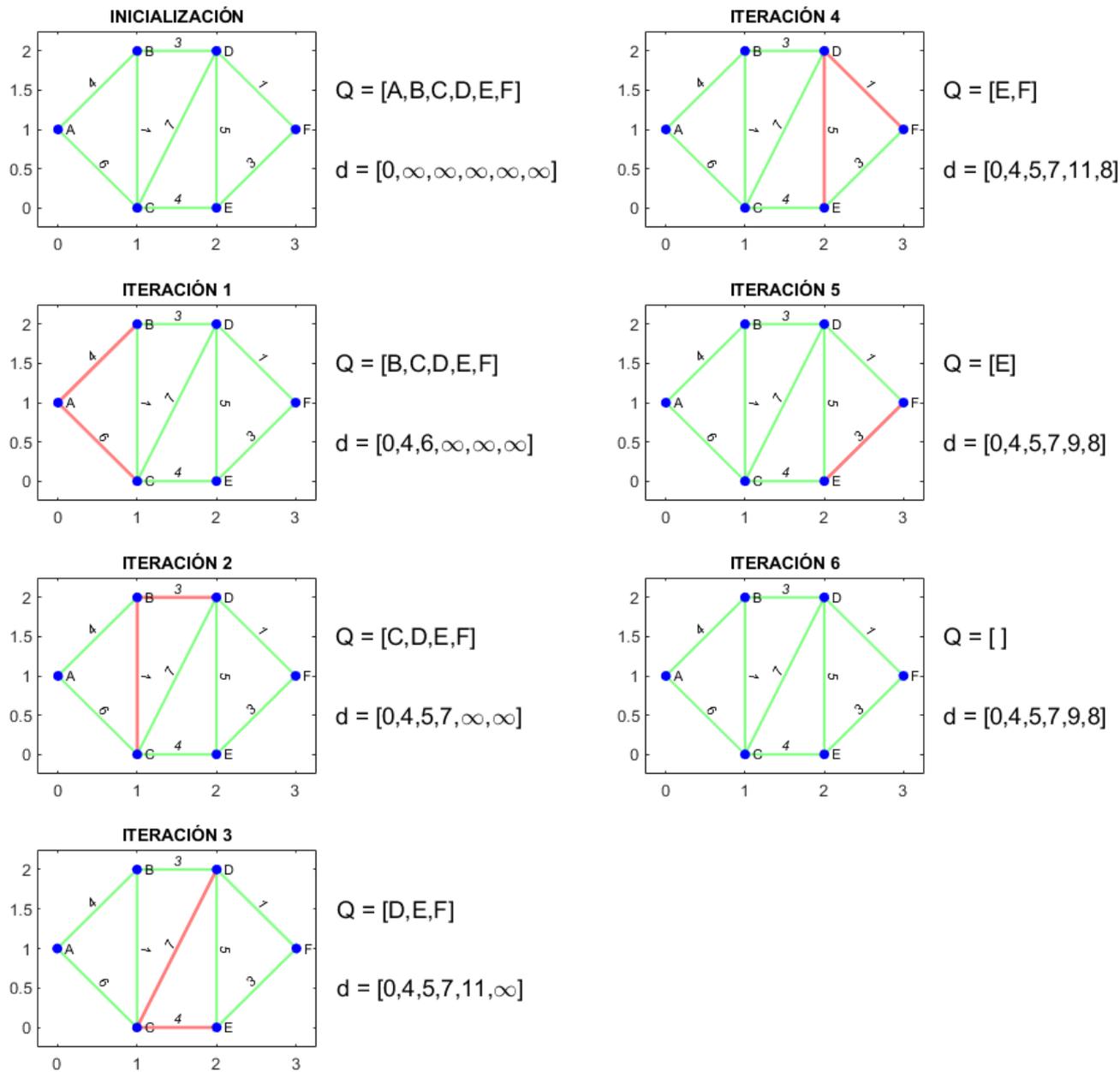


Figura 32 Ejemplo de aplicación A.DIJKSTRA [autor]

Si aplicamos el algoritmo entre los nodos 1 y 6 se devuelve:

- La mínima distancia entre $d(1,6) = 8$
- La secuencia de vértices que forman la ruta más corta $v = [1\ 2\ 4\ 6]$ se colorean en rojo en la figura

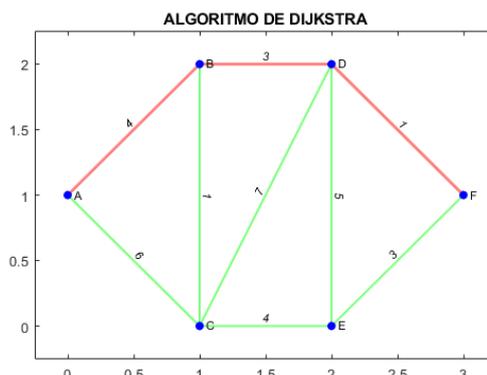


Figura 33 [autor]

4.3 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS 2D

Como se explicó en la definición la forma de las aristas y posición de los vértices no es relevante para la definición del grafo, sólo importa a qué vértices están unidas las aristas y su ponderación. Sin embargo, variando la posición de los vértices-aristas, se puede obtener una tipología abstracta del grafo que aporte más información. A la hora de representar los grafos, los vértices suelen llevar asociada una información. Esta se almacena en una lista y sólo será necesario para acceder a ella utilizar el índice del vértice.

El siguiente ejemplo generado con Matlab representa un sistema de ciudades de tipología radial respecto a la ciudad central, la capital. La distancia entre las ciudades en Km se generará con un número aleatorio entre los valores [100,500].

- El conjunto de vértices lleva asociada una información, el nombre de la ciudad. Se puede acceder a ella con el índice del vértice

$$V = [Ciudad_A, Ciudad_B, Ciudad_C, \dots, Ciudad_V]$$

- En la siguiente figura se muestran las aristas con su par de vértices (ciudades) y el peso asociado (distancia en km)

CIUDADES QUE SE COMUNICAN	DISTANCIA
Ciudad_A (1) --> Ciudad_B (2)	246 Km
Ciudad_A (1) --> Ciudad_C (3)	176 Km
Ciudad_A (1) --> Ciudad_D (4)	144 Km
Ciudad_A (1) --> Ciudad_E (5)	261 Km
Ciudad_A (1) --> Ciudad_F (6)	205 Km
Ciudad_A (1) --> Ciudad_G (7)	218 Km
Ciudad_B (2) --> Ciudad_C (3)	126 Km
Ciudad_B (2) --> Ciudad_G (7)	193 Km
Ciudad_B (2) --> Ciudad_H (8)	243 Km
Ciudad_C (3) --> Ciudad_D (4)	214 Km
Ciudad_C (3) --> Ciudad_I (9)	190 Km
Ciudad_D (4) --> Ciudad_E (5)	294 Km
Ciudad_D (4) --> Ciudad_J (10)	176 Km
Ciudad_E (5) --> Ciudad_F (6)	230 Km
Ciudad_E (5) --> Ciudad_K (11)	132 Km
Ciudad_F (6) --> Ciudad_G (7)	190 Km
Ciudad_F (6) --> Ciudad_L (12)	169 Km
Ciudad_G (7) --> Ciudad_M (13)	236 Km
Ciudad_H (8) --> Ciudad_I (9)	449 Km
Ciudad_H (8) --> Ciudad_M (13)	456 Km
Ciudad_H (8) --> Ciudad_S (19)	366 Km
Ciudad_I (9) --> Ciudad_J (10)	310 Km
Ciudad_I (9) --> Ciudad_R (18)	442 Km
Ciudad_J (10) --> Ciudad_K (11)	397 Km
Ciudad_J (10) --> Ciudad_Q (17)	446 Km
Ciudad_K (11) --> Ciudad_L (12)	402 Km
Ciudad_K (11) --> Ciudad_P (16)	426 Km
Ciudad_L (12) --> Ciudad_M (13)	320 Km
Ciudad_L (12) --> Ciudad_O (15)	449 Km
Ciudad_M (13) --> Ciudad_N (14)	423 Km
Ciudad_N (14) --> Ciudad_S (19)	218 Km
Ciudad_N (14) --> Ciudad_U (21)	294 Km
Ciudad_O (15) --> Ciudad_P (16)	173 Km
Ciudad_O (15) --> Ciudad_V (22)	266 Km
Ciudad_P (16) --> Ciudad_V (22)	274 Km
Ciudad_Q (17) --> Ciudad_R (18)	176 Km
Ciudad_Q (17) --> Ciudad_T (20)	237 Km
Ciudad_R (18) --> Ciudad_T (20)	255 Km
Ciudad_S (19) --> Ciudad_U (21)	275 Km

Figura 34 Tabla de aristas-peso [autor]

Para saber cuál es la ruta óptima y la distancia mínima entre la ciudad_L (vértice 12) y la ciudad_T (vértice 20) aplicamos Dijkstra entre los nodos [12-20] .Como resultado la ruta es :

- $V = [20,18,9,3,1,6,12] \rightarrow [T,R,I,C,A,F,L]$
- Distancia óptima = 1904km

Se puede observar como el grafo abstracto aporta más información acerca de la tipología radial .

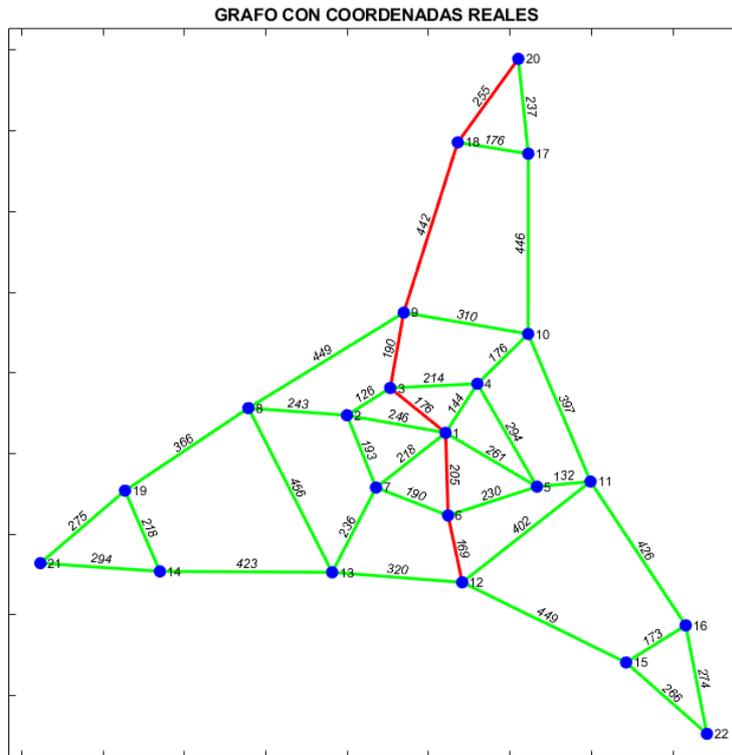


Figura 35 Grafo con coordenadas reales [autor]

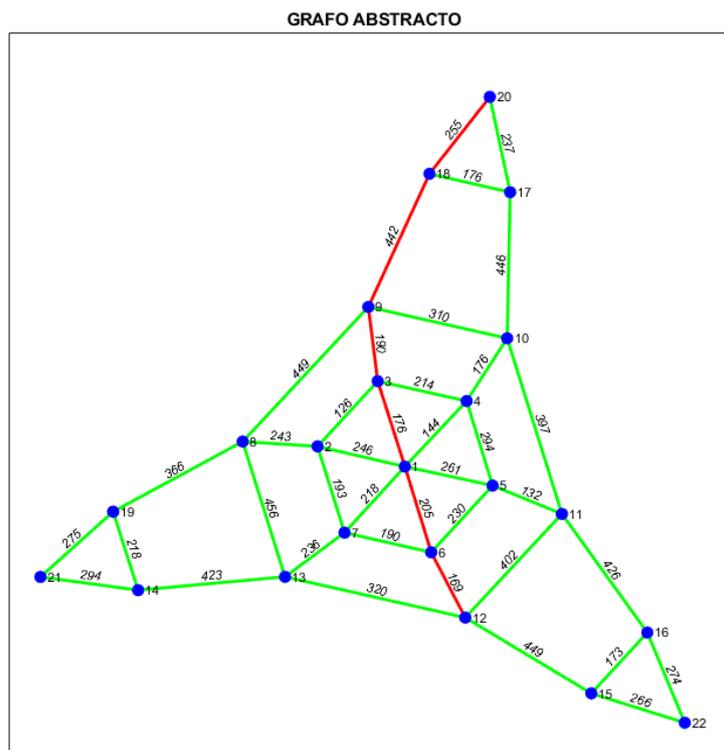


Figura 36 Grafo abstracto [autor]

4.4 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS TIPO MALLA

Los grafos que utilizaremos se obtienen de una malla regular en la que el paso es fijo e igual a CellSize. A partir de esta malla regular se puede construir una matriz R en el que cada elemento (i,j) correspondiente a un vértice de la malla lleva asociado un valor de resistividad térmica del terreno. Conociendo las coordenadas Xcenter, Ycenter del suroeste de la malla (esquina inferior izquierda) se pueden generar los vectores de coordenadas X e Y para determinar la posición de los elementos i, j de la matriz.

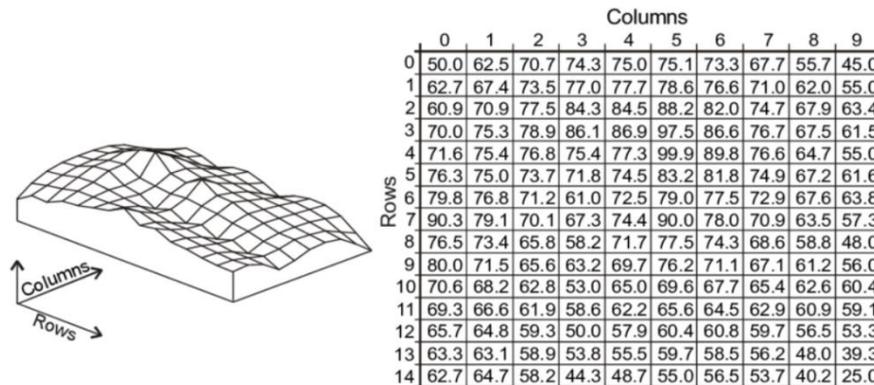


Figura 37 Ejemplo de un modelo digital de elevaciones con malla regular [14]

En la figura se representa un modelo digital de elevaciones con malla regular. Cada elemento i,j de la matriz representa una altura $z \rightarrow Z = f(x, y)$

De la misma forma para nuestra matriz R, cada elemento i,j representará una resistividad térmica $r \rightarrow R_T = f(x, y)$

Los vértices en el grafo se almacenan secuencialmente en los índices lineales de la matriz como se representa en la figura 32. Vertice1=IndiceLineal1, Vertice2=IndiceLineal2... Verticen=IndiceLinealn

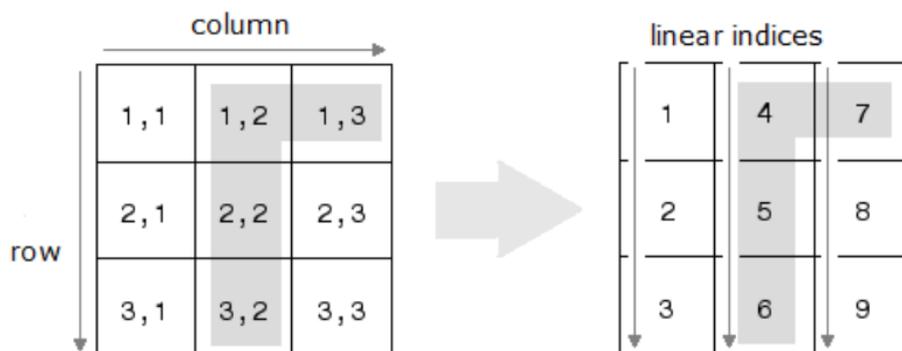


Figura 38 Subíndices de una matriz e índices lineales [15]

A continuación, se muestra la relación entre índices lineales, coordenadas y subíndices mediante un ejemplo sencillo para una matriz de números aleatorio 3x3. Se posicionarán los datos y nodos según las coordenadas Xcenter, Ycenter y paso de malla CellSize

- Coordenadas (x,y) → **cor_indice_**
- Subíndices (i,j) de la malla → **subíndices**
- Índices lineales → **índices_lineales**

PSEUDOCÓDIGO 2

```

                24    45    77
Matriz_de_datos = 12    46    35
                61    66    66

CellSize = Paso de malla           = 5m
Nr        = Número de filas         = 3
Nc        = Número de columnas      = 3
Xcenter   = Coordenada x suroeste de la malla = 300
Ycenter   = Coordenada y suroeste de la malla = 700

X = Xcenter+[0:Nc-1]*CellSize --> 300    305    310
Y = Ycenter+[0:Nr-1]*CellSize --> 700    705    710

[matX,matY]=meshgrid(X,Y)

    matX--> 300    305    310           matY--> 700    700    700
           300    305    310           705    705    705
           300    305    310           710    710    710

cor_indice_x   = reshape(matX,[NROWS*NCOLS 1])
cor_indice_x   = 300    300    300    305    305    305    310    310    310
índices_lineales = 1     2     3     4     5     6     7     8     9
subíndices     = (1,2) (2,1) (3,1) (1,2) (2,2) (3,2) (1,3) (2,3) (3,3)

cor_indice_y   = reshape(matY,[NROWS*NCOLS 1])
cor_indice_y   = 710    705    700    710    705    700    710    705    700
índices_lineales = 1     2     3     4     5     6     7     8     9
subíndices     = (1,2) (2,1) (3,1) (1,2) (2,2) (3,2) (1,3) (2,3) (3,3)

```

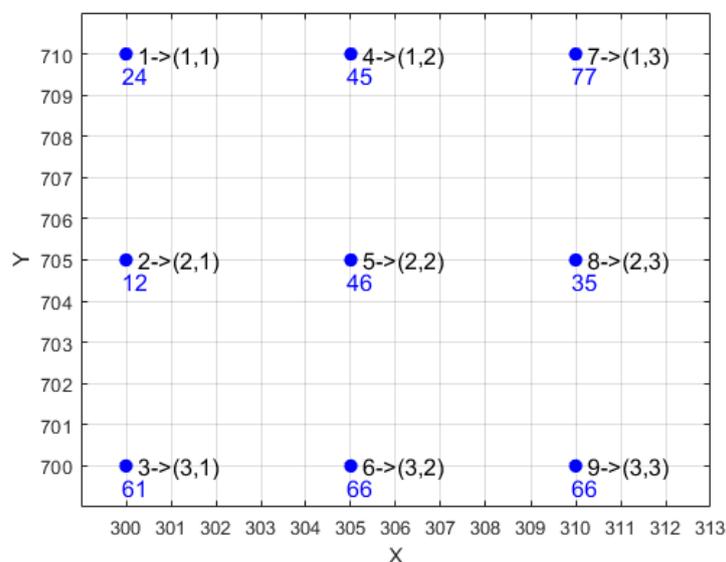


Figura 39 Representación de la matriz de datos en función de sus coordenadas Xcenter, Ycenter [autor]

4.5 GENERACIÓN DEL GRAFO

Para generar el grafo hay que conectar todos los vértices con sus adyacentes. En función de la posición del vértice el número de vértices adyacentes varía.

- Los vértices de "las esquinas" tienen 3 adyacentes.
- Los vértices de "los bordes" tienen 5 adyacentes.
- El resto de vértices tiene 8 adyacentes.

Se recorrerá la matriz teniendo en cuenta cuatro tipologías de aristas, de modo que al finalizar tendremos guardado en la lista de adyacencia todas las conexiones con sus parejas de vértices y peso asignado.

PSEUDOCÓDIGO 3

```
nc      = ncols
nr      = nrows
sub2ind = traductor de subíndices(i,j)
          a índices lineales 1,2,3...nc*nr
(u,v)   = pareja de vértices
lista_ady = lista de adyacencia vacía {(u,v),p}

%|% ARISTAS VERTICALES
para column desde 1 hasta nc
  para row desde uno hasta nr-1
    u = sub2ind(row,column)
    v = sub2ind(row+1,column)
    p = peso asignado a la lista
    se añaden (u,v) y p a lista_ady

%-% ARISTAS HORIZONTALES
para column desde 1 hasta nc-1
  para row desde uno hasta nr
    u = sub2ind(row,column)
    v = sub2ind(row,column+1)
    p = peso asignado a la lista
    se añaden (u,v) y p a lista_ady

%|% ARISTAS DIAGONAL 1
para column desde 1 hasta nc-1
  para row desde uno hasta nr-1
    u = sub2ind(row,column)
    v = sub2ind(row+1,column+1)
    p = peso asignado a la lista
    se añaden (u,v) y p a lista_ady

%/% ARISTAS DIAGONAL 2
para column desde 2 hasta nc
  para row desde uno hasta nr-1
    u = sub2ind(row,column)
    v = sub2ind(row+1,column-1)
    p = peso asignado a la lista
    se añaden (u,v) y p a lista_ady
```

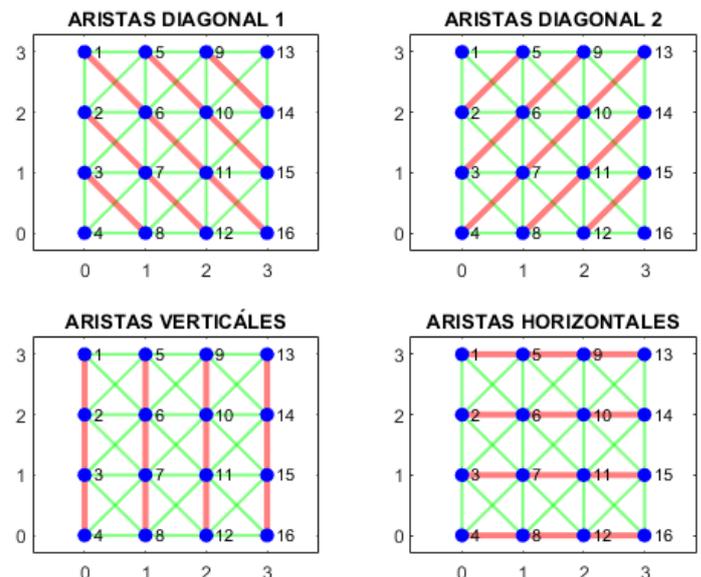


Figura 40 Topología de aristas utilizadas [autor]

4.6 ASIGNACIÓN DE PESOS A LAS ARISTAS

Existen varias formas de asignar peso a las aristas, como puede ser la distancia euclídea entre vértices, suma de datos entre vértices, producto, media.... El algoritmo de Dijkstra nos devuelve la suma de pesos de las aristas que forman la ruta óptima. Cuando las aristas no se ponderan en función de la distancia euclídea habrá que calcular esta distancia por medio de los índices de la ruta óptima que nos devuelve Dijkstra.

En el siguiente pseudocódigo se muestra el procedimiento:

PSEUDOCÓDIGO 4

```
[rutu_optima,suma_de_pesos] = Dijkstra(lista_ady, na, nb)--->FUNCION
```

Inputs

```
lista_ady = lista de adyacencia
na        = nodo fuente
nb        = nodo final
```

Outputs

```
rutu_optima = vector en el que se almacenan por orden los
              índices de la ruta optima na...nx1...nx2...nb
suma_de_pesos = escalar
```

```
dis_eucl = Distancia euclídea de la ruta desde el na a nb
cor_x    = Vector en el que se almacenan las coordenadas x de los vértices
cor_y    = Vector en el que se almacenan las coordenadas y de los vértices
```

```
para i desde n hasta numero_indices(rutu_optima)-1
```

```
  x1 = cor_x(ruta_optima(i))
  x2 = cor_x(ruta_optima(i))
```

```
  y1 = cor_y(ruta_optima(i))
  y2 = cor_y(ruta_optima(i))
```

```
  dis_eucl = dis_eucl + sqrt((x1-x2)^2+(y1-y2)^2)
```

```
fin para
```

En el siguiente ejemplo sencillo para una malla-matriz de números aleatorios se ponderan dos grafos a partir de la matriz de datos Mdatos. En el grafo suma las aristas se ponderan como suma de valores entre vértices. En el grafo producto las aristas se ponderan como producto de valores entre vértices. Se calcula:

- Mediante Dijkstra: Ruta óptima y suma de pesos
- Mediante el anterior pseudocódigo: Distancia euclídea de la ruta optima

```
Mdatos = 12  2  5  2
         = 10  7  9  11
         =  4  8  12  5
         = 10  9  1  5
```

```
CellSize = Paso de malla = 5m
Nr        = Numero de filas = 4
Nc        = Numero de columnas = 4
Xcenter   = Coordenada x suroeste de la malla = 300
Ycenter   = Coordenada y suroeste de la malla = 700
```

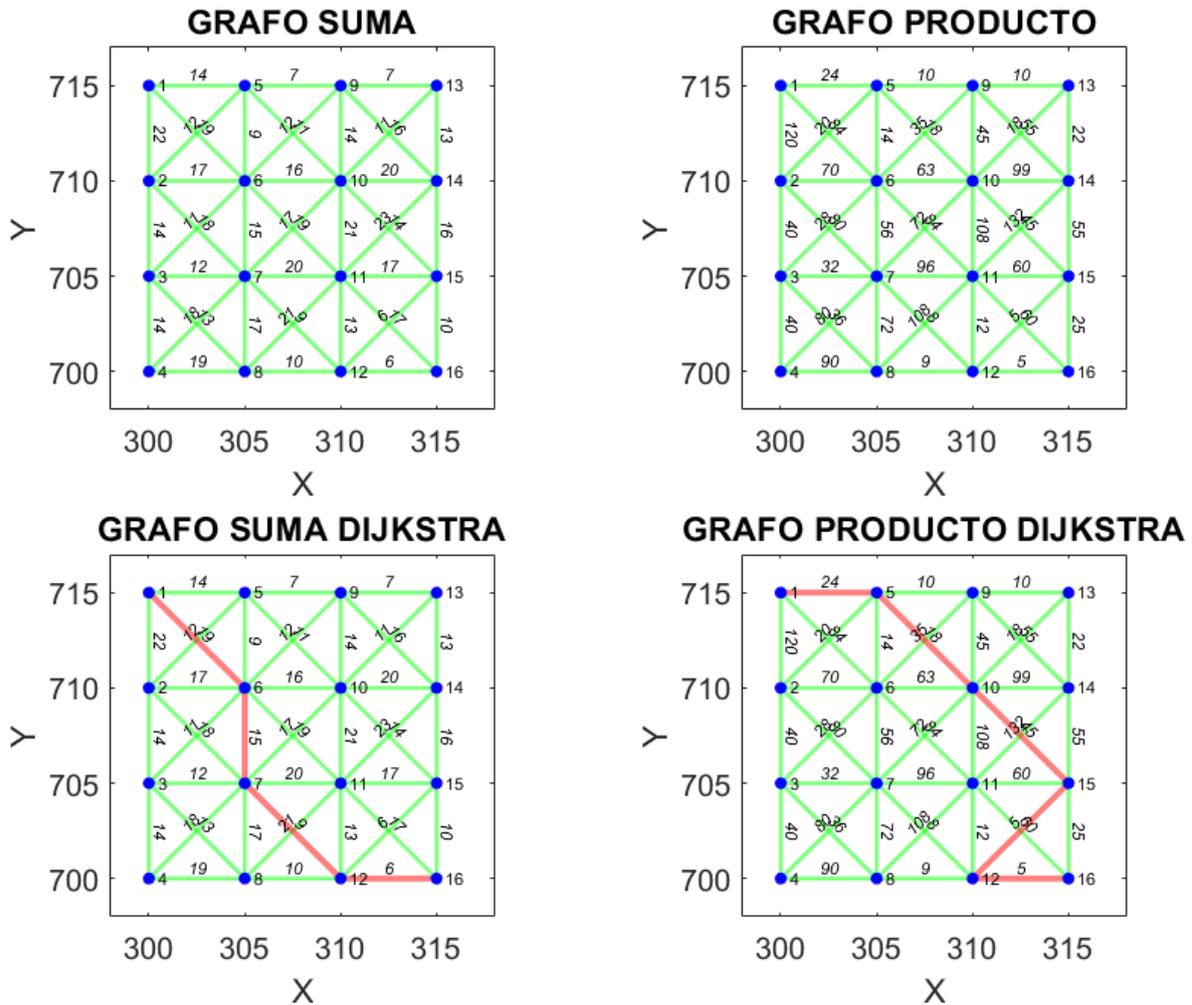


Figura 41 Comparativa entre el grafo suma y el grafo producto [autor]

	Índices	Suma de pesos	Distancia euclídea
Ruta óptima Grafo suma	1,6,7,12,16	49	48.84
Ruta óptima Grafo producto	1,5,10,15,12,16	97	62.42

5 MODELO ARTIFICIAL DEL TERRENO

El objetivo es desarrollar un modelo artificial del terreno simplificado respecto a los mapas geológicos, con propiedades reales. A continuación, se explicará cómo se crea este modelo con Matlab y cuáles son sus características.

5.1 MAPA GEOLÓGICO

Los mapas geológicos son la representación sobre una base topográfica de los diferentes tipos de rocas y minerales que se encuentran en la superficie, así como su disposición en el espacio y las relaciones existentes entre ellos. Cada color en el mapa representa un tipo de roca (unidad geológica). En la leyenda se ordenan según su edad, de más antiguo (abajo) a más moderno (arriba). Para evitar problemas de confusión entre colores se suele asignar un código a cada color. Éstos mapas están disponibles en la sección de descargas de <https://mapas.cantabria.es/> apartado de geología, geomorfología y procesos activos en formato SHP.

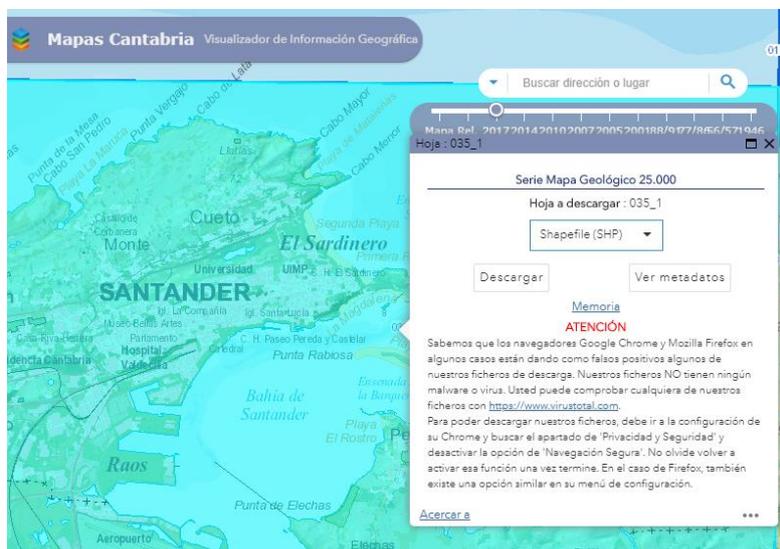


Figura 42 Mapa geológico de Santander [16]

En el formato shp, las diferentes unidades geológicas vienen delimitadas por una polilínea cerrada de número finito de vértices, a esta polilínea se la conoce como "polígono". Para visualizar y exportar los datos es necesario utilizar **QGIS**.

La información por tratar se obtiene de la tabla de atributos de la capa Unidades Geológicas

1. Se extraen los vértices de los polígonos (Vectorial, Herramientas de geometría, Extraer nodos) .
2. Se generan los vectores de coordenadas X e Y para posicionar los vértices de los polígonos con la calculadora de campos.
3. Se exportan los datos formato CSV .

En la siguiente imagen se pueden visualizar los vértices de los polígonos una vez extraídos con la calculadora de campos de QGIS



Figura 43 Visualización de vértices con QGIS para el mapa geológico de Santander [autor]

Unidades geológicas con su código de identificación , se extraen de la tabla de atributos de la capa Unidades Geológicas. Todos los polígonos de igual unidad geología se referenciarán con el mismo código.

CÓDIGO	UNIDAD GEOLÓGICA
351000	Masa de agua
351001	Arcillas abigarradas, yesos, sales, Facies Keuper
351002	Lutitas, limolitas rojas, ocre y grises, con niveles de areniscas
351003	Calcarenitas
351004	Calizas con requienidos
351005	Lutitas, limolitas grises, ocre y rojas y areniscas
351006	Calizas grises con ostreidos, margas
351007	Calizas con miliolidos, rudistas
351008	Calcarenitas con glauconita, calizas, areniscas
351009	Areniscas, limolitas, lutitas carbonosas y piritosas
351010	Calcarenitas
351011	Margas
351012	Margas, calizas margosas
351013	Calizas arenosas, calcarenitas localmente tableadas con Micraster
351014	Margas, calizas arenosas con Micraster
351015	Calizas arenosas, calcarenitas localmente tableadas con Micraster
351016	Calizas arenosas
351017	Dolomías microcristalinas
351018	Calcarenitas, calcarenitas arenosas laminadas con algas
351019	Calizas con algas rodofíceas
351020	Calizas con Alveolinas, Nummulites
351021	Calizas arenosas
351022	Limos, arcillas, arenas con cantos rodados
351023	Limos, arcillas, arenas con cantos rodados de arenisca
351024	Limos, arcillas, arenas con cantos rodados de caliza
351025	Arcillas, limos con edificación y encostramiento
351026	Arcillas, limos con cantos de composición variable
351027	Limos, arcillas con cantos rodados de areniscas y calizas
351028	Arcillas, limos, arenas con cantos
351029	Arcillas, limos
351030	Arenas, limos eólicos
351031	Arenas, limos con abundante materia orgánica
351032	Arenas cuarzosas, bioclásticas
351033	Terrenos ganados al mar, áreas remodeladas por el hombre

Figura 44 Unidades geológicas para el mapa geológico de Santander 1:25000 [autor]

El fichero CSV exportado de QGIS se lee y procesa con Matlab. Para ello se crea una lista 'CELL' con número de filas igual al número de polígonos y estructura de columnas:

Código numérico	Nombre Unidad Geológica	Color de referencia	Vector de N.º de índice de los vértices	Vector de Coordenadas X de los vértices	Vector de Coordenadas Y de los vértices
-----------------	-------------------------	---------------------	---	---	---

Con la función polygon se crean los polígonos a partir de la lista de datos y se representan con Matlab según las coordenadas espaciales de sus vértices. Hay que tener especial atención a la hora de generar los vectores de coordenadas ya que si un vértice de un polígono invade otro polígono dará error y no se podrá representar el mapa

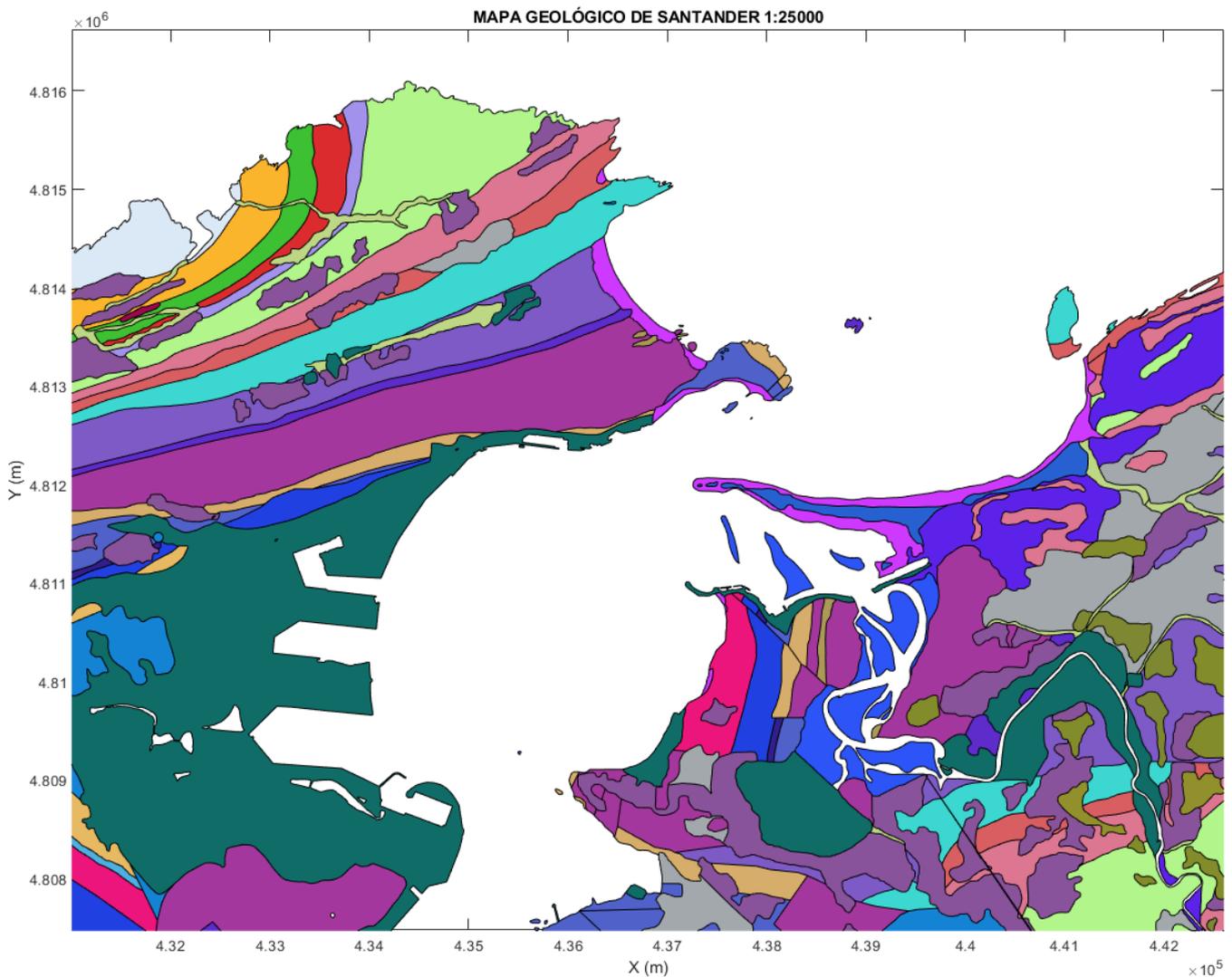


Figura 45 Mapa geológico de Santander 1:250000 [autor]

5.2 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO ARTIFICIAL DEL TERRENO

Tras procesar y representar los datos del archivo SPH se propone un modelo simplificado por las siguientes razones:

1. El número de unidades geológicas es elevado ,y esto implica dar valor de resistividad térmica a cada unidad geológica, lo cual no es viable ya que no hay valores tabulados para materiales tan específicos
2. Se encuentran polígonos que en ocasiones miden varios km, por lo que dar un valor de resistividad térmica al polígono no es acertado ya que ésta puede variar por zonas en las que la porosidad del terreno, humedad o temperatura varíe.
3. El coste computacional es muy grande, ya que se encuentran polígonos con cientos de vértices y cuando se intente verificar si un nodo del grafo pertenece o no a un determinado polígono las funciones de Matlab tendrán que tratar al polígono en su totalidad, con todos sus vértices.

Para ello se propone la creación de un modelo artificial del terreno al que asociaremos un grafo con las siguientes características:

1. Estará formado por polígonos aleatorios, como la naturaleza de los polígonos del mapa geológico. Se utilizará un área cuadrada de 1km de lado de cota constante.
2. El tamaño y densidad de polígonos en un área dada se podrá variar con funciones propias.
3. El número de vértices de cada polígono será del orden de la decena (con ello el coste computacional se reducirá).
4. El número de unidades geológicas será 6, a las que asociaremos resistividades térmicas desde 0.5 a 3K·m/W (figura 40). El valor de resistividad definirá al polígono y se considerará constante en toda su área.

Rt(λ) (Km)/W	
■	0.5
■	1
■	1.5
■	2
■	2.5
■	3

Figura 46 Unidades geológicas que se utilizaran para el modelo artificial del terreno [autor]

5.3 GENERACIÓN DEL MODELO ARTIFICIAL DEL TERRENO

En las siguientes secciones se desarrollan los pasos a seguir para generar el escenario con las características propuestas en la sección 5.2

5.3.1 DIAGRAMAS DE VORONOI

Los diagramas de Voronoi son uno de los métodos de interpolación más simple, basados en la distancia euclídea, tomando como base una serie de puntos espaciados. A cada punto se le asocia una región, polígono o área de influencia. Estos polígonos se forman mediante la intersección de las mediatrices entre puntos vecinos, de forma que el perímetro de los polígonos sea equidistante a los puntos vecinos. En el siguiente ejemplo creado con Matlab se crea un diagrama de Voronoi a partir de una serie de puntos x,y aleatorios. Si incluimos **un punto verde** (no se tiene en cuenta para realizar el diagrama) en una zona cercana al perímetro de una región, a simple vista es difícil de distinguir a qué punto vecino está más cercano. Tras realizar el diagrama no hay lugar a duda, ya que el punto cae dentro del área de influencia de uno de los puntos.

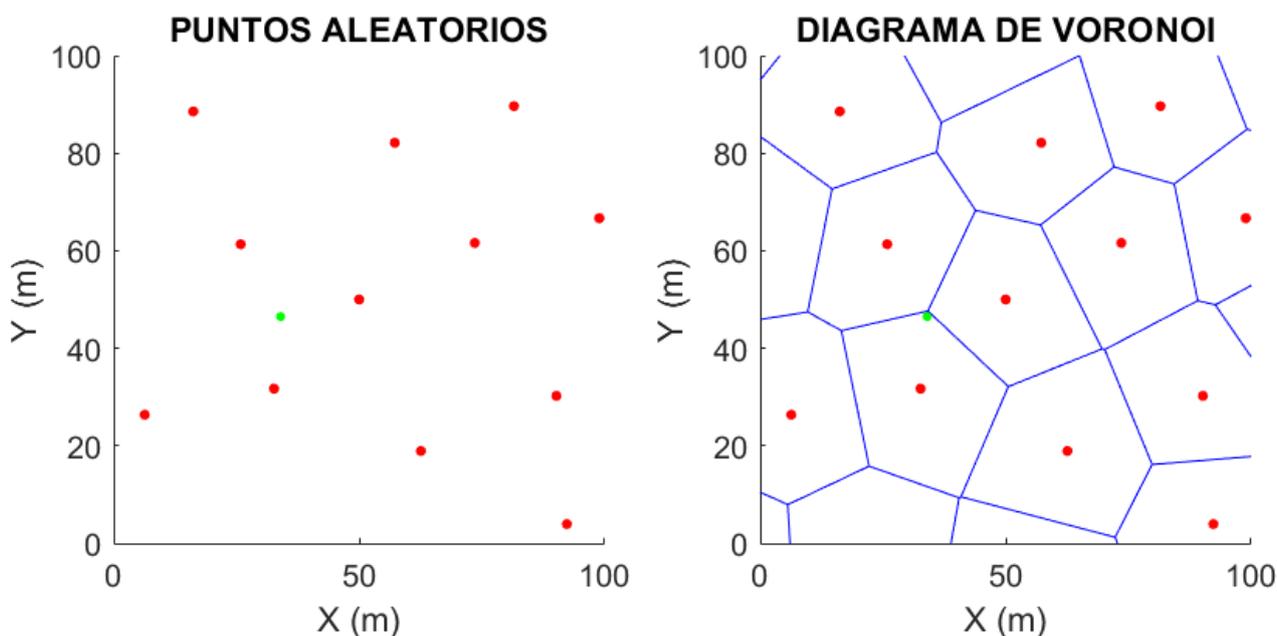


Figura 47 Diagrama de Voronoi creado a partir de puntos aleatorios [autor]

Con el fin de evitar solapamientos entre polígonos contiguos se creará una función en Matlab que espaciará los puntos aleatorios a una distancia d , de esta forma podremos variar las dimensiones de los polígonos y controlar la densidad de puntos por medio del parámetro n_puntos .

```
[ptos]=ptos_espaciados(vector_posicionamiento,n_puntos,distancia);
```

Inputs:

```
vector_posicionamiento = [Nc, Nr, Xcenter, Ycenter, CellSize]
distancia = Distancia de separación entre puntos
n_puntos = Número de puntos para el área seleccionada
```

Outputs:

```
ptos = Matriz de dimensión (2*n_puntos)
1ª Columna: Coordenada x de los puntos
2ª Columna: Coordenada y de los puntos
```

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de la función. Para comprobar su funcionamiento se trazan circunferencias de radio $d/2$. Para que no se produzca solapamiento no puede haber intersección entre circunferencias. En las figuras de la izquierda se representan los puntos ,espaciados y no espaciados y a la derecha su diagrama de Voronoi.

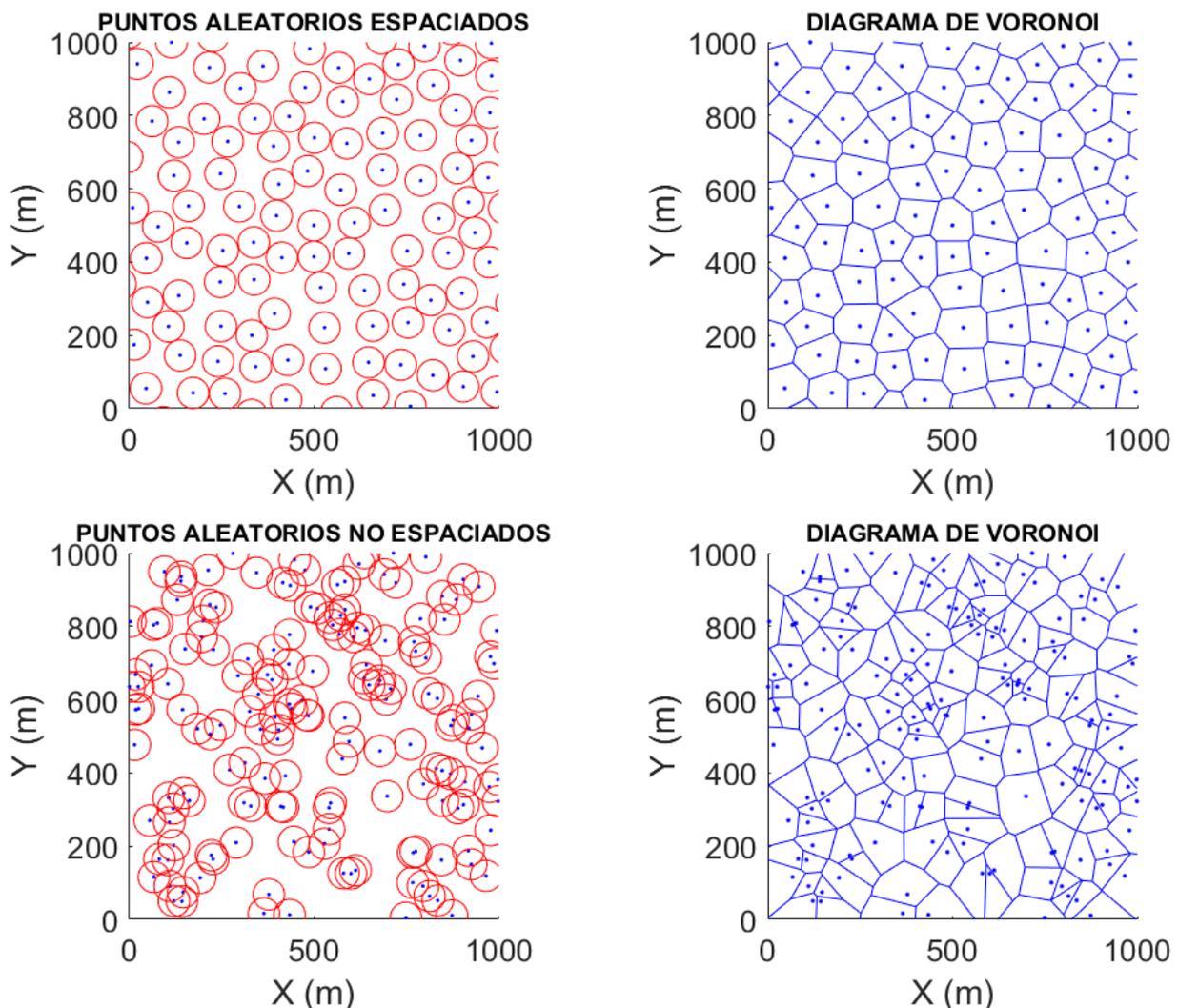


Figura 48 Comparación entre puntos aleatorios espaciados y no espaciados [autor]

5.3.2 ASIGNACIÓN DE VALORES DE RESISTIVIDAD TÉRMICA A LOS POLÍGONOS

Una vez procesados los polígonos del diagrama de Voronoi sin que se produzca ningún solapamiento se almacenan en una lista de número de filas igual al número de polígonos. La estructura de las columnas es:

Valor de resistividad térmica	Color de referencia	Vector de N.º de índice de los vértices	Vector de Coordenadas X de los vértices	Vector de Coordenadas Y de los vértices
-------------------------------	---------------------	---	---	---

Aleatoriamente se asigna un valor de resistividad térmica a los polígonos entre los siguientes valores [0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3] k·m/w que irá asociado a un color y se representa con Matlab. Se eliminan los bordes de los polígonos en la representación porque en la realidad no existe esa "barrera física".

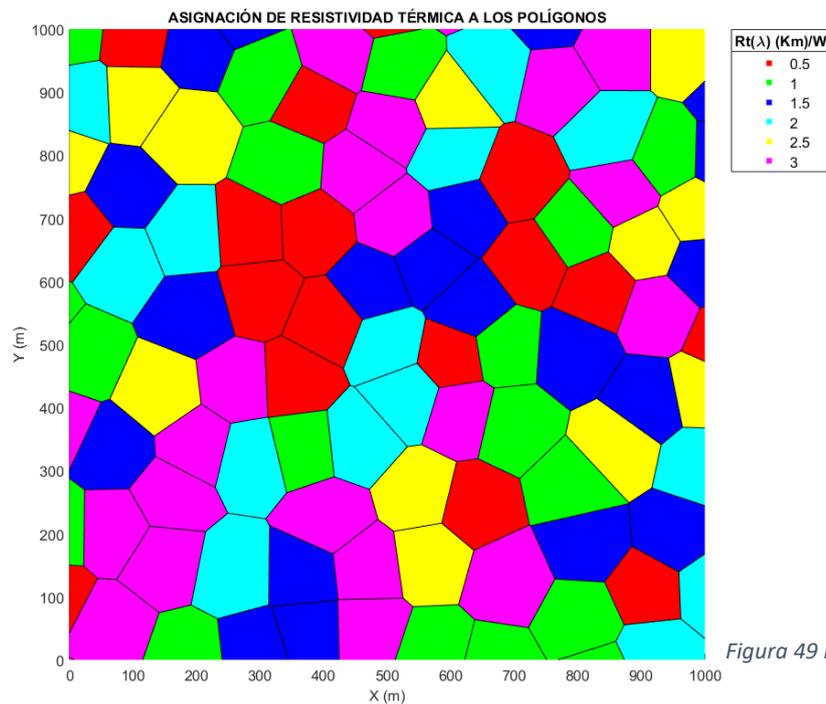


Figura 49 Polígonos con borde [autor]

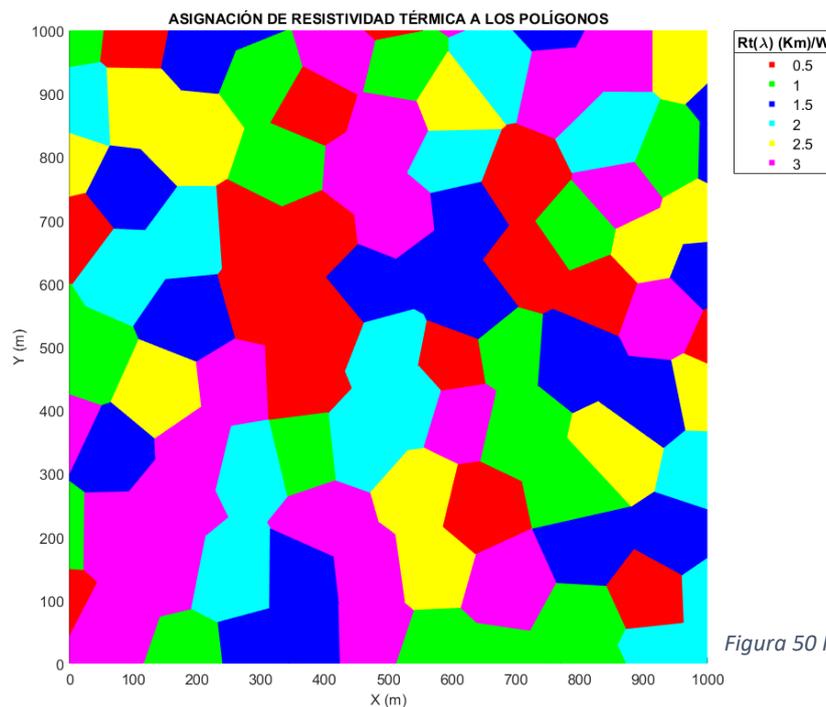


Figura 50 Polígonos sin borde [autor]

5.3.3 MODELADO DEL GRAFO: RESISTIVIDADES TÉRMICAS

Una vez asignadas las resistividades a los polígonos se crea una malla regular como se ha explicado en la sección 4.4. Para cada coordenada x,y de la malla se busca en la lista de polígonos el ubicado en esa coordenada y se guarda en la celda correspondiente de la matriz de resistividades la resistividad térmica por unidad de longitud (resistividad unitaria) del polígono. El peso entre vértices será la resistividad media unitaria R_{Umed} de las celdas por la longitud entre celdas.

$$Peso = R_{Umed} * distancia\ entre\ nodos = R_{Total} (k/w)$$

A continuación, se muestra un ejemplo sencillo de aplicación para un grafo simple con las mismas características que los grafos que utilizaremos con miles de nodos. Se comprueba el proceso de asignación de peso para dos aristas.

- Verde: Arista con vértices **8-9** dentro de un polígono
- Rojo: Arista con vértices **8-15** en distintos polígonos

```

CellSize = Paso de malla           = 10m
Nr       = Numero de filas         = 6
Nc       = Numero de columnas      = 6
Xcenter  = Coordenada x suroeste de la malla = 0
Ycenter  = Coordenada y suroeste de la malla = 0

Mat_res  = Matriz de resistividades =
3.0  3.0  1.5  3.0  0.5  0.5
2.5  2.5  1.5  1.5  0.5  3.0
2.5  2.5  1.5  1.5  2.0  3.0
1.0  1.0  2.0  2.0  2.0  2.0
1.5  1.5  2.0  2.0  1.5  1.5
3.0  1.5  1.5  1.5  1.5  1.5
    
```

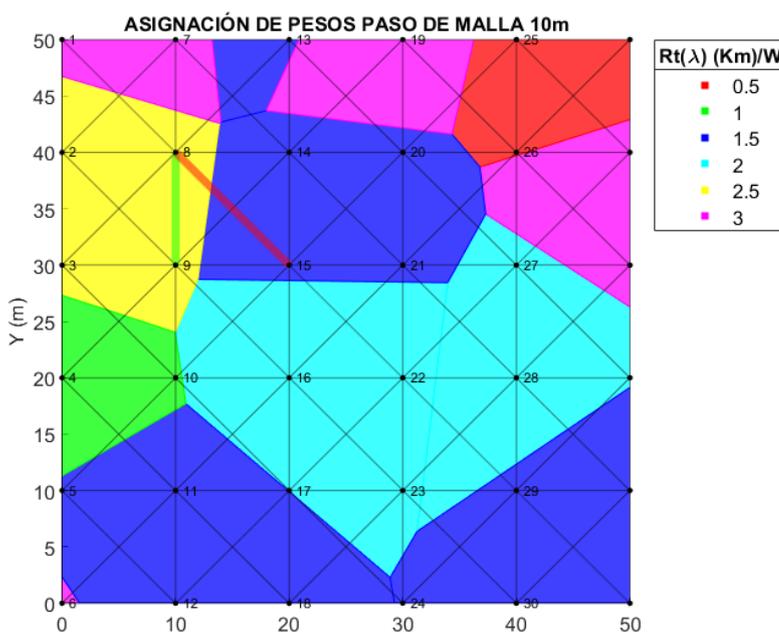


Figura 51 Ejemplo de asignación de pesos a las aristas [autor]

$$R_{Umed(8-9)} = \frac{R_8 + R_9}{2} = \frac{2.5 + 2.5}{2} = 2.5 \frac{Km}{W}$$

$$R_{Total(8-9)} = R_{Umed(8-9)} * distancia\ entre\ nodos$$

$$R_{Total(8-9)} = 2.5 \frac{Km}{W} * 10m = 25 \frac{K}{W}$$

$$R_{Umed(8-15)} = \frac{R_8 + R_{15}}{2} = \frac{2.5 + 1.5}{2} = 2 \frac{Km}{W}$$

$$R_{Total(8-15)} = R_{Umed(8-15)} * distancia\ entre\ nodos$$

$$R_{Total(8-14)} = 2 \frac{Km}{W} * 10 * \sqrt{2} m = 28.28 \frac{K}{W}$$

EndNodes	Weight
1 2	27.5
1 7	30
1 8	38.891
2 3	25
2 7	38.891
2 8	25
2 9	35.355
3 4	17.5
3 8	35.355
3 9	25
3 10	24.749
4 5	12.5
4 9	24.749
4 10	10
4 11	17.678
5 6	22.5
5 10	17.678
5 11	15
5 12	21.213
6 11	31.82
6 12	22.5
7 8	27.5
7 13	22.5
7 14	31.82
8 9	25
8 13	28.284
8 14	20
8 15	28.284
9 10	17.5
9 14	28.284

Se comprueba en la lista de adyacencia que los valores calculados en el ejemplo anterior son los mismos que los que asigna la función propia creada con Matlab.

Una vez ponderado el grafo ,cuando se aplique Dijkstra el valor que obtendremos será la suma de resistividades K/W de la ruta óptima. Pero para el cálculo de la ampacidad ,el parámetro T4 se calcula por medio de la resistividad por unidad de longitud K·m/W. Para ello dividimos el valor suma de pesos entre la longitud de la ruta óptima y se obtiene de esa forma un valor medio de resistividad térmica por unidad de longitud.

$$R_{media} = \frac{Resistividad\ Total}{Longitud\ de\ la\ ruta\ óptima} = \frac{K \cdot m}{W}$$

A continuación, se muestran dos grafos ejemplo con paso de malla exagerado 25 y 50m para comparar la densidad de nodos. Para correr el algoritmo se utilizarán grafos de entre 1-5m de paso de malla. El número de nodos aumenta exponencialmente cuando decrece el paso de malla.

Paso de malla (m)	Número de nodos
50	441
25	1681
10	10201
8	15876
5	40401
2	251001
1	1002001

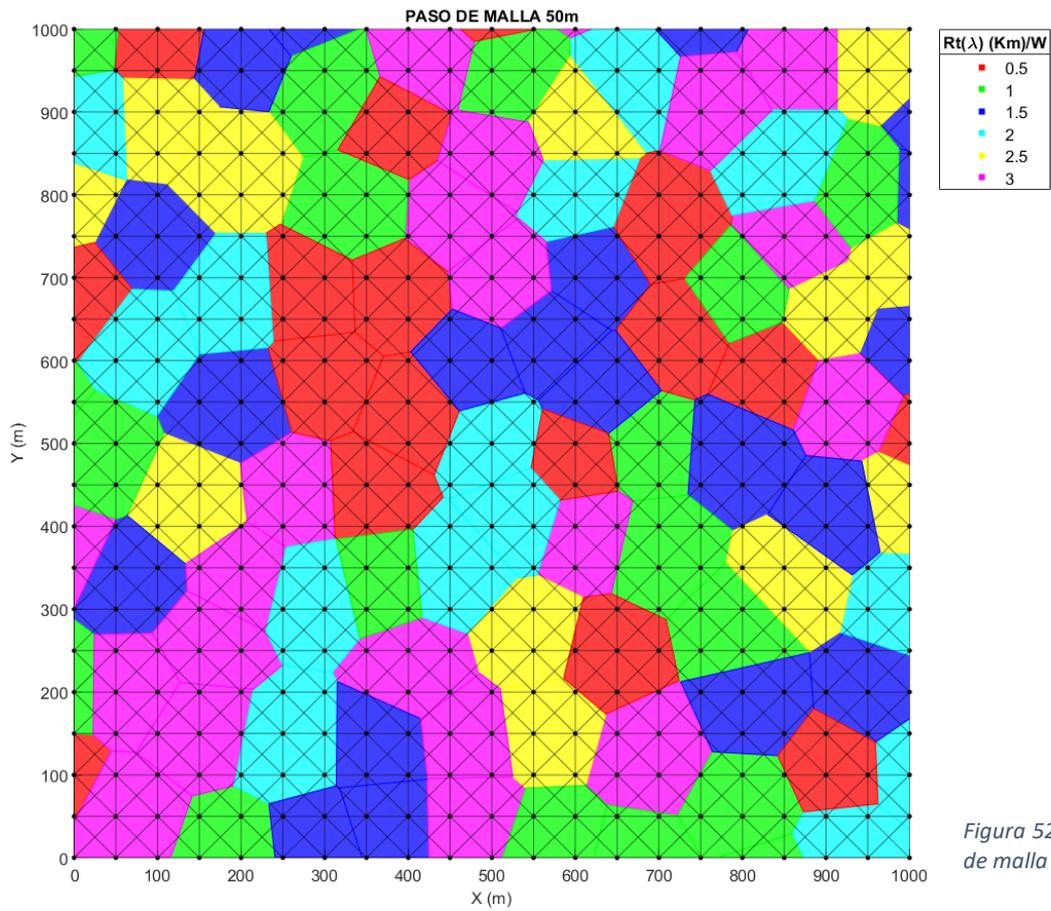


Figura 52 Grafo con paso de malla 50m [autor]

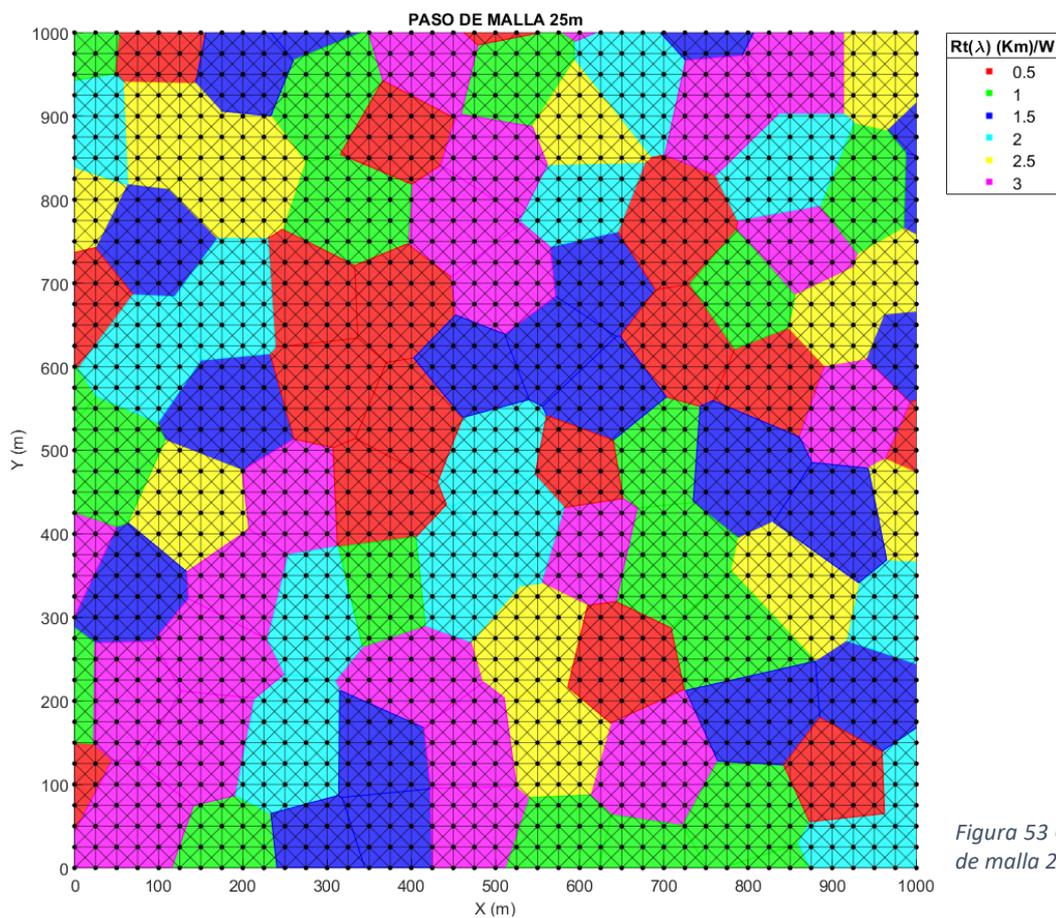


Figura 53 Grafo con paso de malla 25m [autor]

Cuando el paso de malla sea inferior a 10m no se superpondrá el grafo sobre los polígonos, se colorearán los vértices en función a su resistividad térmica.

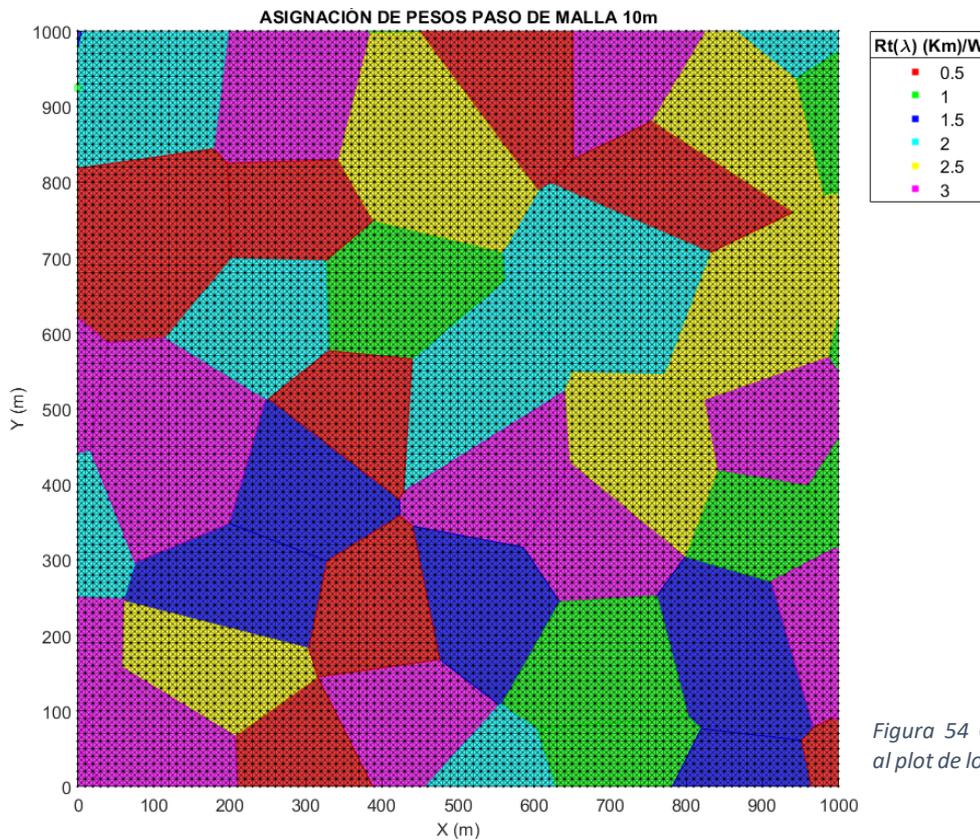


Figura 54 Grafo superpuesto al plot de los polígonos [autor]



Figura 55 Vértices coloreados en función a su polígono [autor]

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el análisis de sensibilidad se determinará lo sensible que es la función ampacidad respecto a la resistividad del terreno para cables de sección diferente. Directamente enterrados y dispuestos en capa. El parámetro T4 depende de factores geométricos relativos al cable (constantes) resistividad del terreno y de la profundidad de tendido. Estudiando el impacto que tiene la variación de resistividad térmica del terreno nos proporcionará el rango de valores en los que se mueve el parámetro T4 .

En la siguiente figura se puede observar una función de cuatro entradas $f(a, b, c, d)$. Cada una de ellas se mueve dentro de un rango de valores y varía en función de otros factores.

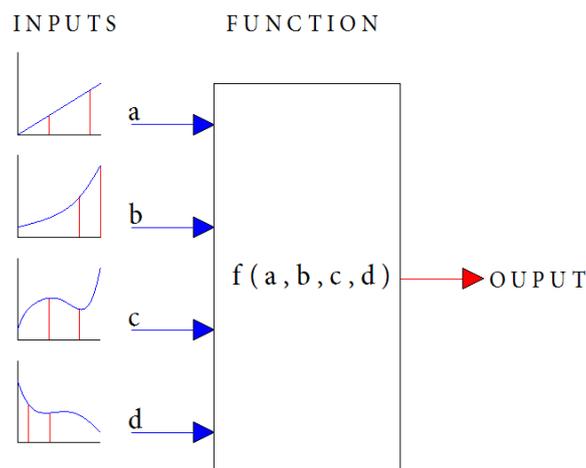


Figura 56 Modelo de función con 4 entradas y una salida [autor]

La sensibilidad de una función f frente a un parámetro p se define como la variación relativa de la función $\Delta f/f$ frente a variaciones relativas del parámetro $\Delta p/p$. De forma que la función sensibilidad de f respecto a p se define como:

$$F_{Sensibilidad} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta f}{f}}{\frac{\Delta p}{p}} = \frac{\partial f}{\partial p} \frac{p}{f}$$

Para la función ampacidad :

$$I = f(T1, T2, T3, T4, \lambda1, \lambda2, R, Wd, \Delta\theta, n)$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - Wd[0.5T1 + n(T2 + T3 + T4)]}{RT1 + nR(1 + \lambda1)T2 + nR(1 + \lambda1 + \lambda2)(T3 + T4)}}$$

Su función de sensibilidad será por definición:

$$F_{Sensibilidad} = \lim_{T4 \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta I}{I}}{\frac{\Delta T4}{T4}} = \frac{\partial I}{\partial T4} \frac{T4}{I}$$

$$F_{Sensibilidad} = - \frac{T4 \left(\frac{nWd}{\alpha c} + \frac{nR \left(\Delta\theta - Wd \left(\frac{T1}{2} + n(T2 + T3 + T4) \right) \right) (1 + \lambda1 + \lambda2)}{\alpha^2} \right)}{\frac{2\Delta\theta - 2Wd \left(\frac{T1}{2} + n(T1 + T2 + T3) \right)}{\alpha}}$$

Donde : $\alpha = RT1 + nRT2(1 + \lambda1) + nR(T3 + T4)(1 + \lambda1 + \lambda2)$

Los cables seleccionados tienen conductores de aluminio y son de la serie AL EPROTENAX H COMPACT del fabricante Prysmian. A continuación, se muestran las características principales del cable y su tendido.

- Cables unipolares de aislamiento HEPR (105°C) sin armadura
- Directamente enterrados a una profundidad de 1m
- Secciones: 50, 95, 150, 240, 400, 630 mm²
- Tensión asignada de 12-20KV
- Disposición en capa con separación de 200mm
- Conexión de las pantallas Both Ends

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES

1 x SECCIÓN CONDUCTOR (Al) / SECCIÓN PANTALLA (Cu) (mm ²)	Ø NOMINAL AISLAMIENTO* (mm)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	Ø NOMINAL EXTERIOR* (mm)	ESPESOR CUBIERTA (mm)
12/20 kV				
1 x 50/16	18,1	4,5	25,8	2,5
1 x 95/16 (1)	20,9	4,3	28,6	2,7
1 x 150/16 (1)	23,8	4,3	32	3
1 x 240/16 (1)	28	4,3	36	3
1 x 400/16 (1)	33,2	4,3	41,3	3
1 x 630/16	41,5	4,5	49,5	2,7

Figura 57 Características dimensionales de los cables AL EPROTENAX H COMPACT [7]

En la siguiente tabla se muestra los parámetros calculados para el cable según UNE 21144. Los parámetros λ_2 y T2 son 0 porque el cable carece de armadura. El incremento de temperatura es :

$\Delta\theta = 65K$ ya que se considera 40°C la tem. ambiente y 105° es la tem. máxima del aislamiento

Sección mm ²	T1 K·m/W	T2 K·m/W	T3 K·m/W	T4 K·m/W	λ_1	λ_2	R Ω/m	Wd W/m	$\Delta\theta$ K	n
50	0.3830	0	0.1714	Variable	0.000834	0	0.000861	0.0000219	65	1
95	0.2953	0	0.1665	Variable	0.000817	0	0.000430	0.0000284	65	1
150	0.2497	0	0.1657	Variable	0.0006501	0	0.000277	0.0000384	65	1
240	0.2043	0	0.1450	Variable	0.0005309	0	0.000168	0.0000412	65	1
400	0.1670	0	0.1249	Variable	0.0004238	0	0.000105	0.0000502	65	1
630	0.1361	0	0.0919	Variable	0.0003674	0	0.0000643	0.0000616	65	1

Una vez determinados los parámetros que definen a los cables se representa T4 en función a la resistividad térmica del terreno para una profundidad de 1m. Son rectas que empiezan en (0,0) por lo que vienen definidas por su pendiente. De esta forma queda definida la influencia que tiene la resistividad sobre el parámetro T4 para el cálculo de la ampacidad.

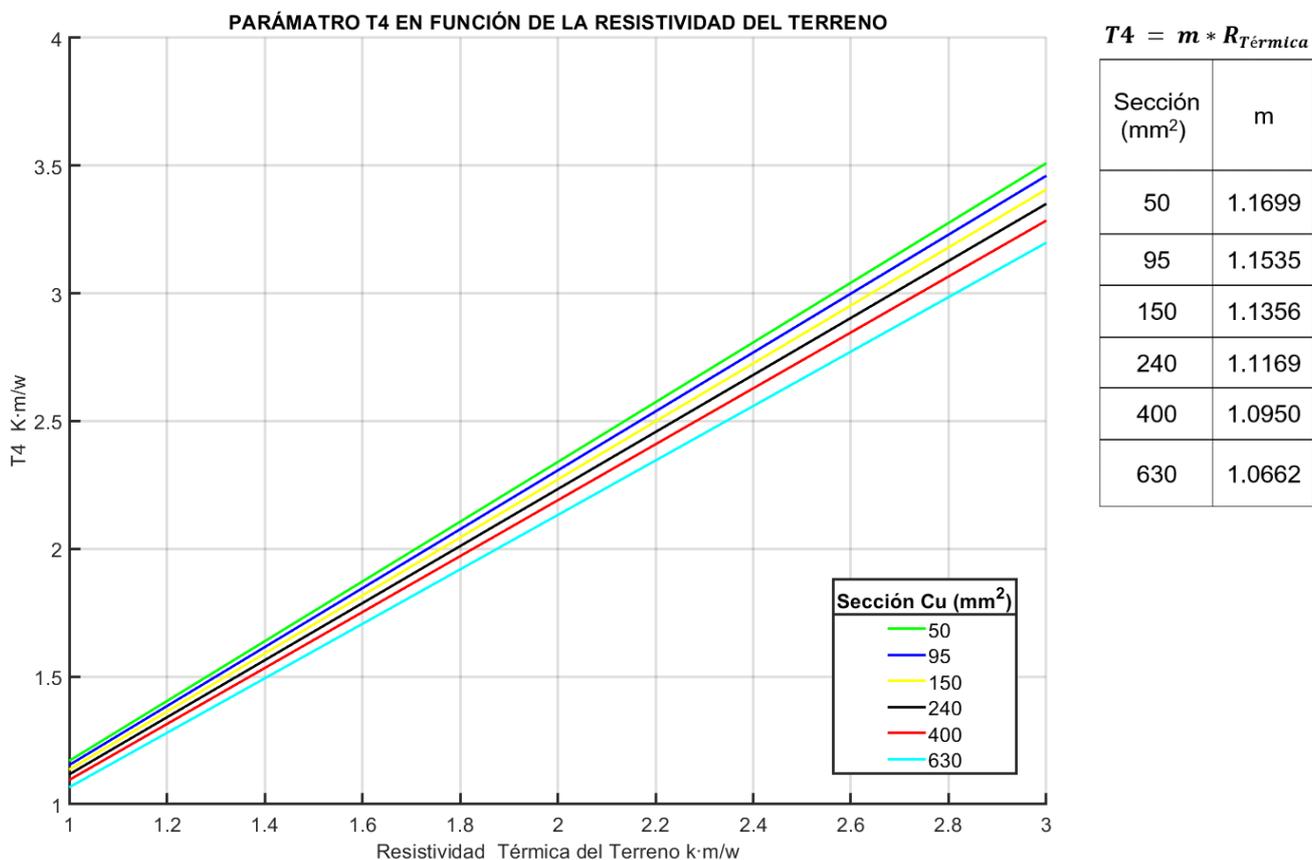


Figura 58 Parámetro T4 en función de la resistividad térmica del terreno [autor]

Una vez determinadas las pendientes para la obtención de T4 se representa como influye la resistividad del terreno en la ampacidad para los cables seleccionados y se comparan con un punto de referencia que da el fabricante para cables directamente enterrados.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

1 x SECCIÓN CONDUCTOR (Al) / SECCIÓN PANTALLA (Cu) (mm ²)	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE BAJO EL TUBO Y ENTERRADO* (A)	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE DIRECTAMENTE ENTERRADO* (A)	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE AL AIRE** (A)
	12/20 kV y 18/30 kV	12/20 kV y 18/30 kV	12/20 kV y 18/30 kV
1 x 50/16	135	145	180
1 x 95/16 (1)	200	215	275
1 x 150/16 (1)	255	275	360
1 x 240/16 (1)	345	365	495
1 x 400/16 (1)	450	470	660
1 x 630/16 (2)	590	615	905

Figura 59 Características eléctricas de los cables AL EPROTENAX H COMPACT [7]

Este punto de referencia se da para una resistividad de 1.5 k·m/W, profundidad de tendido de 1m y temperatura ambiente de 40°C. Se comprueba en la gráfica para cada sección evaluada en el punto de referencia (1.5) que la intensidad calculada no difiere en 2% de la calculada por el fabricante.

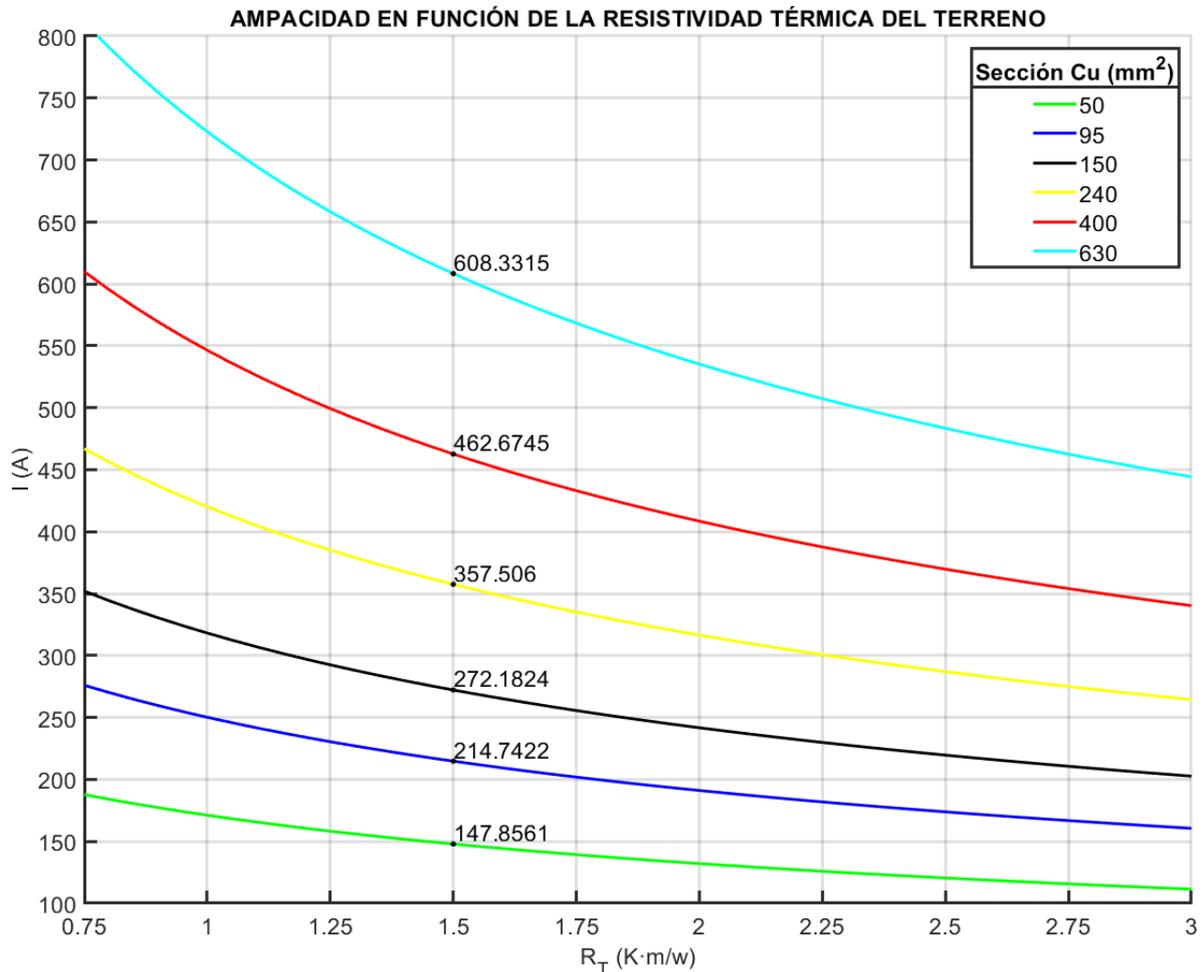


Figura 60 Ampacidad en función de la resistividad térmica del terreno [autor]

Sección (mm ²)	Intensidad máxima admisible para cable directamente enterrado (A)	Intensidad calculada (A)	Desviación (%)
50	145	147.8561	1.9697
95	215	214.7422	0.1198
150	275	272.1824	1.0245
240	365	357.5085	2.0531
400	470	462.6745	1.5586
630	615	608.3315	1.0843

Finalmente se representa el gráfico de variación porcentual de la ampacidad para la variación porcentual de la resistividad térmica del terreno destacando 3 zonas:

- El punto (0,0) representa el punto de referencia de 1.5 k·m/W para el que no hay variación de intensidad ni de resistividad.
- Si nos desplazamos a la derecha supone un aumento de la de la resistividad y una disminución de la ampacidad. Un aumento de la resistividad del 100% supone una resistividad de 3 k·m/W y una disminución de la ampacidad del 25% aproximadamente.
- Si nos desplazamos a la izquierda supone una disminución de la de la resistividad y un aumento de la ampacidad. Una disminución de la resistividad del 50% supone una resistividad de 0.75 k·m/W y un aumento de la ampacidad del 30% aproximadamente.

Se deduce que la ampacidad varía respecto al punto de referencia el doble para disminuciones negativas de resistividad que respecto a las positivas. Ya que para una variación del -50% de resistividad la ampacidad se incrementa un 30% y para una variación positiva de resistividad del 50% la ampacidad disminuye un 15%

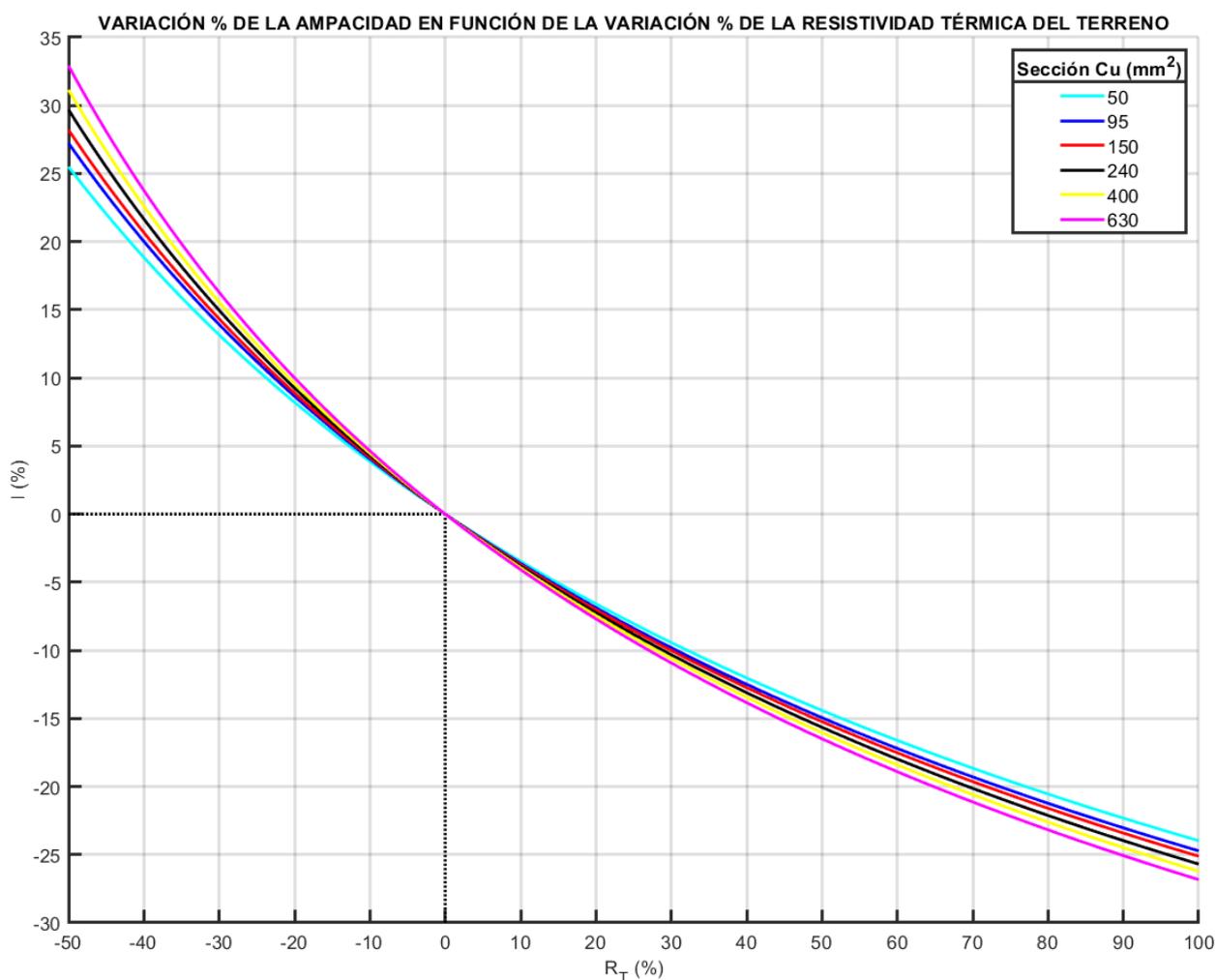


Figura 61 Variación % de la ampacidad respecto a la variación % de la resistividad [autor]

6.2 TRAZADO DE LA RUTA ÓPTIMA Y EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL PASO DE MALLA

El objetivo es demostrar que la ruta de óptima en cuanto a resistividad térmica maximizará la ampacidad respecto la ruta de mínima distancia. Partiendo del área cuadrada el algoritmo de Dijkstra se aplicará sobre los índices $1 \rightarrow A$ y $(\text{número de nodos})^2 \rightarrow B$. Se trazarán dos rutas:

- La ruta de mínima distancia (rojo) será la diagonal, ya que el modelo es plano. Si fuese un modelo digital de elevaciones con diferentes cotas para cada x,y la ruta de mínima distancia no tendría por qué ser la diagonal.
- La ruta de mínima resistividad térmica media (negro). El algoritmo nos devolverá las coordenadas y representará la ruta sobre el modelo.

Como se comentó anteriormente para cada ruta se calculará:

- Distancia de la ruta (m)
- Resistividad térmica media (k·m/w)

En los siguientes ejemplos se compara el resultado obtenido para el mismo escenario, pero variando el paso de malla 8,4 y 2m respectivamente. Los resultados son:

RUTA	Resistividad Térmica Media K·m/w	Disminución % respecto a la resistividad de la ruta mínima distancia	Distancia m	Aumento % respecto a la ruta de mínima distancia
PASO DE MALLA 8m → NÚMERO DE NODOS 15876				
Óptima Distancia	1.826	0	1414.214	0
Óptima Resistividad	0.918	50.27	1639.156	15.9
PASO DE MALLA 4m → NÚMERO DE NODOS 63001				
Óptima Distancia	1.815	0	1414.214	0
Óptima Resistividad	0.923	50.85	1636.812	15.74
PASO DE MALLA 2m → NÚMERO DE NODOS 251001				
Óptima Distancia	1.821	0	1414.214	0
Óptima Resistividad	0.917	50.35	1637.984	15.82

Variando el paso de malla se obtienen resistividades 0.918,0.923,0.917 km-/w como se muestra en la tabla anterior para la ruta óptima. Estas resistividades no varían más de 1% entre sí, por lo que aumentar el mallado no aumenta la precisión del cálculo de la resistividad media, pero si aumenta el ajuste de los nodos al borde físico de los polígonos como se puede comprobar en los siguientes gráficos para 8,4 y 2 metros de paso de malla. Por lo que se buscará un equilibrio entre el ajuste de los nodos a los bordes físicos y el coste computacional (ya que este aumenta conforme disminuye el paso de malla) eligiendo un paso de malla de 4m.

Longitud R-Óptima (m): Longitud ruta Óptima resistividad

Longitud D-Óptima (m): Longitud ruta mínima distancia

Rt R-Óptima (k·m/w): Resistividad térmica media ruta Óptima resistividad

Rt D-Óptima (k·m/w): Resistividad térmica media ruta mínima distancia

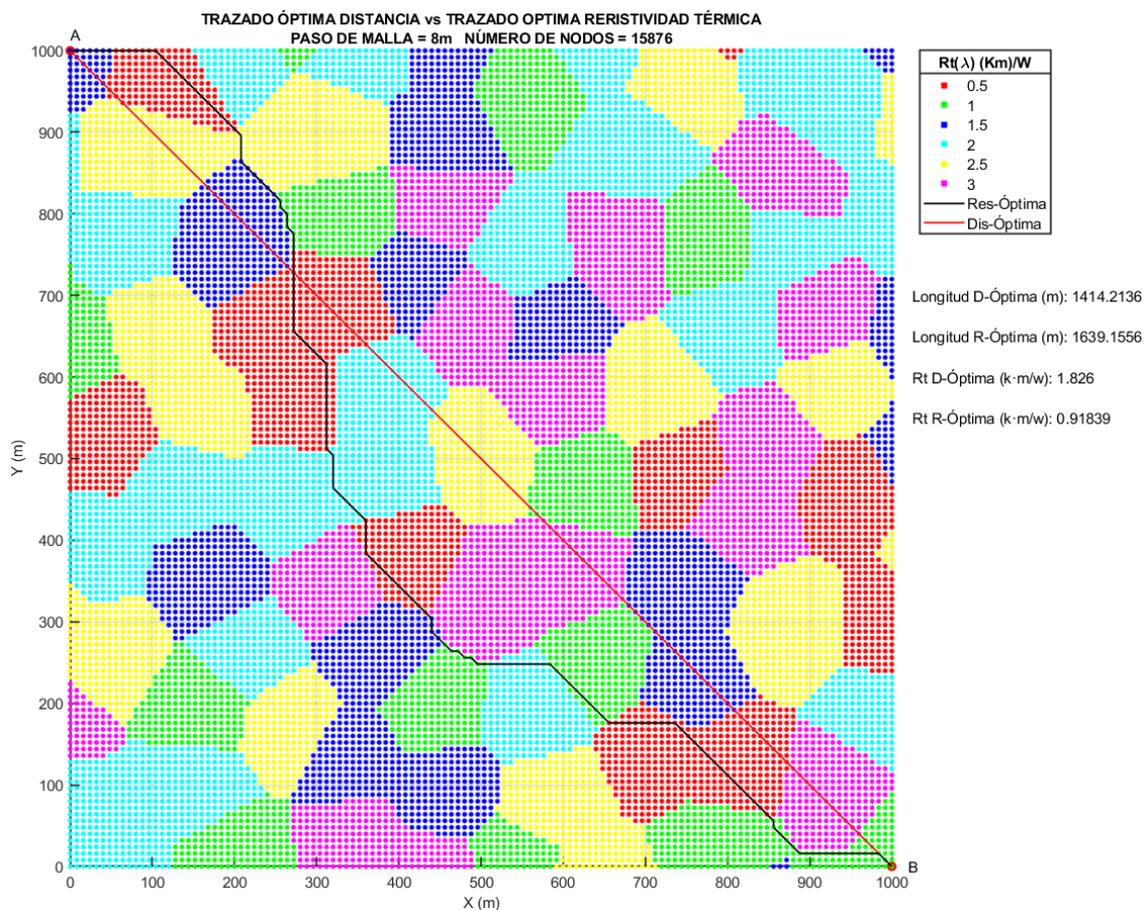


Figura 62 Trazado óptimo vs Trazado mínima distancia. Paso de malla 8m [autor]

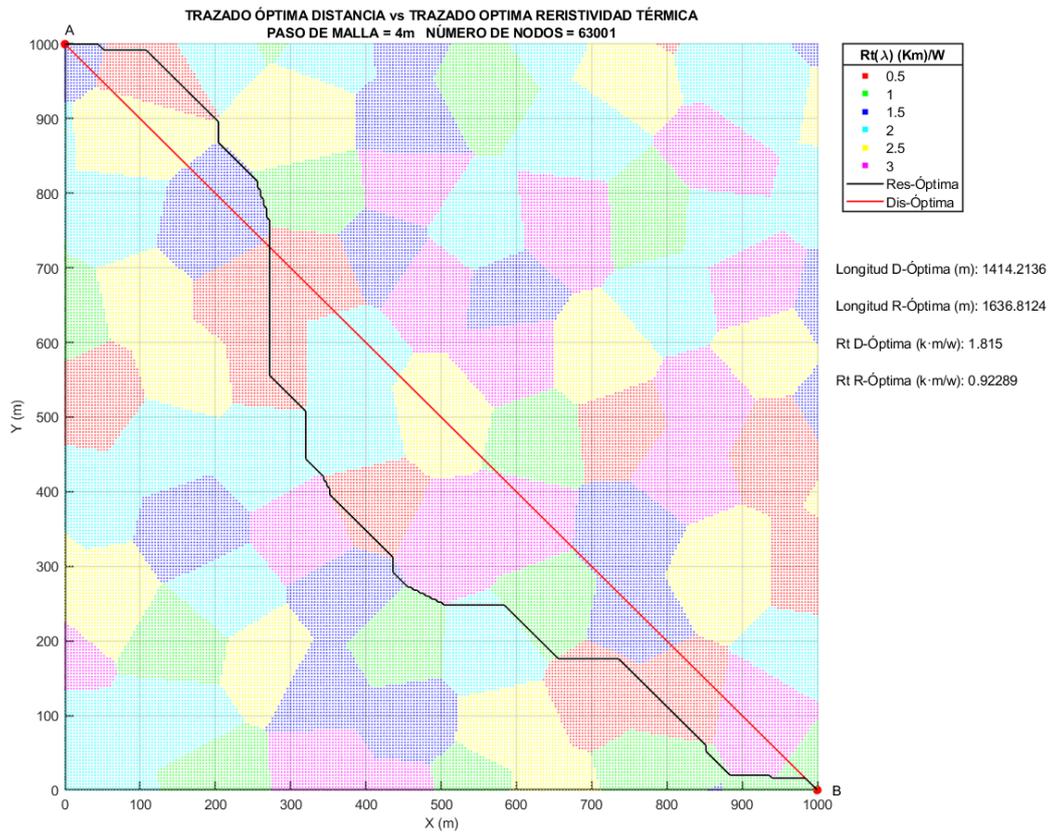


Figura 63 Trazado óptimo vs Trazado mínima distancia. Paso de malla 4m [autor]

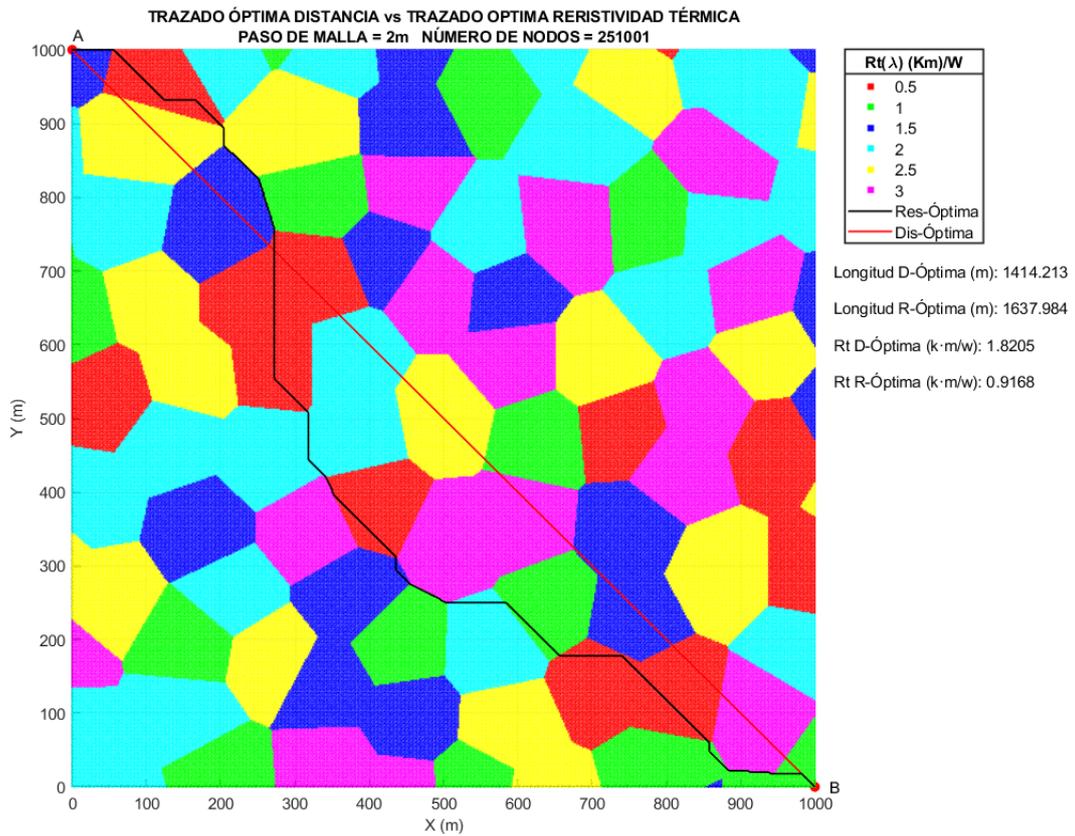


Figura 64 Trazado óptimo vs Trazado mínima distancia. Paso de malla 2m [autor]

6.3 ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO T4 Y CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

A continuación, se calculará parámetro T4 y la ampacidad para los cables seleccionados para 6 escenarios. El cálculo se realizará de dos formas distintas.

- Partiendo de la resistividad media que ofrece el grafo para la ruta de mínima distancia y para la ruta óptima.
- Mediante la resistividad crítica. Para ello es necesario trazar un gráfico (figura 65) que nos ofrezca los diferentes polígonos por orden de paso por los que transcurre el trazado, así como la distancia dentro del polígono. Se seleccionará como resistencia térmica crítica a la máxima de las resistencias térmicas para un polígono en el que el trazado a su paso supere una longitud del 2% de la longitud total de la ruta. Cuando el trazado a su paso por un polígono no supere el 2% de la longitud total se despreciará esa resistividad para estimar la crítica.

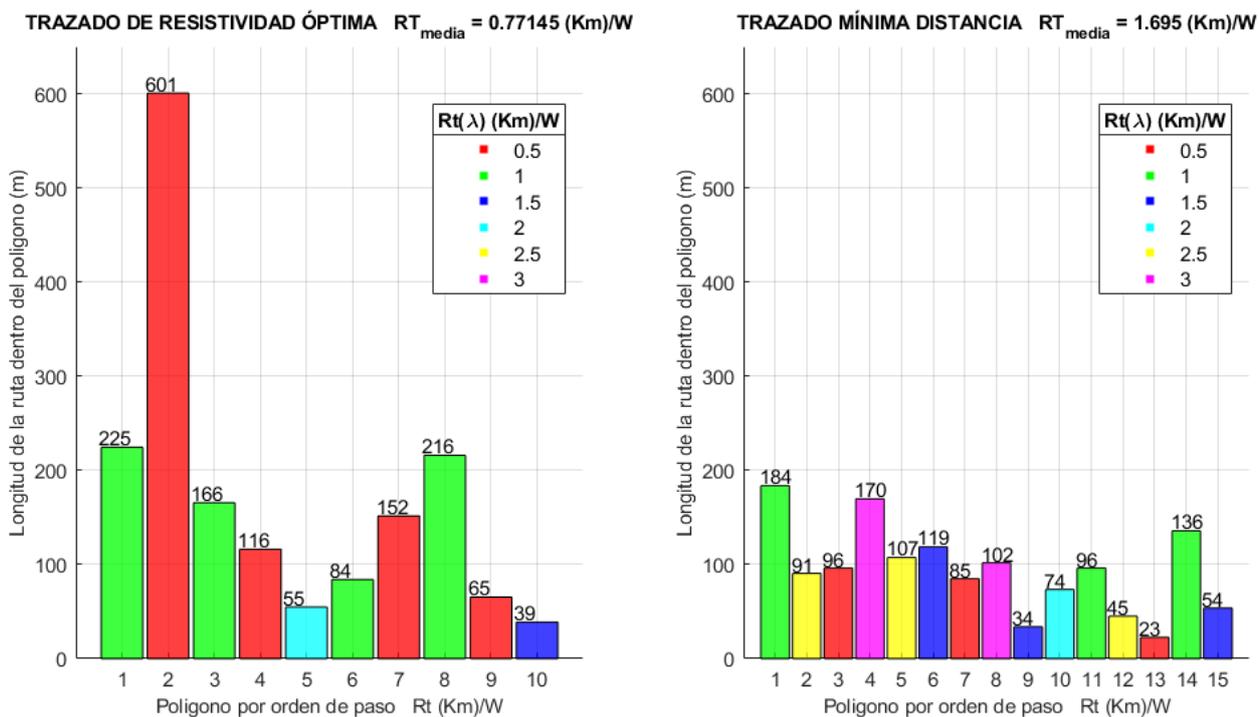


Figura 65 Gráfico en el que se representan los polígonos por orden de paso con su distancia de paso para las dos rutas [autor]

Es interesante representar en un gráfico de barras (figura 66) la longitud total acumulada de resistencia térmica común. Por ejemplo, para la figura 65 izquierda (trazado de resistividad óptima) los polígonos por orden de paso de resistividad 0.5 son 601,116,152,65 m que sumados acumulan una distancia de 934m como se representa en la figura 66. Se comprueba que la ruta de resistividad óptima acumula más longitud para resistividades bajas, mientras que la ruta de mínima distancia acumula más longitud para resistividades elevadas. Las longitudes acumuladas de resistividad térmica común se representarán en la leyenda de las figuras que representen el escenario de prueba como se muestra en la figura 67

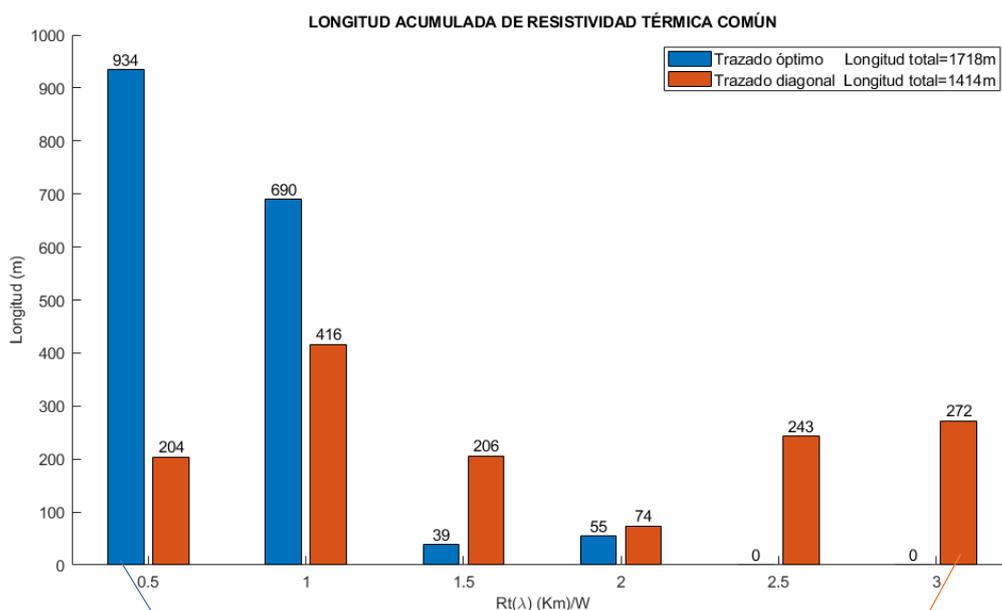


Figura 66 Longitud acumulada de resistividad térmica común [autor]

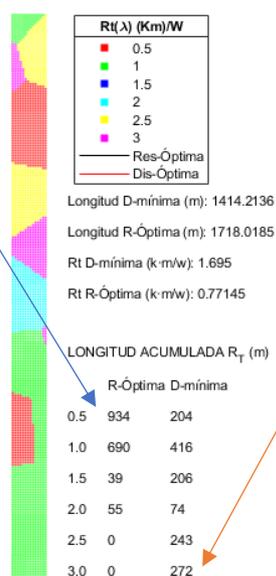


Figura 67 Leyenda de longitud acumulada de resistividad térmica común [autor]

La tabla de la figura 68 representa el resumen de los resultados. Para cada uno de los escenarios se aplica el cálculo para las secciones 50,95,150,400,630 mm². La estructura de las columnas representa los valores medios.

- Disminución Rt % :Representa la disminución porcentual media de la resistencia térmica de la ruta optima respecto a la ruta de mínima distancia aplicada a todos los escenarios.
- Aumento ampacidad % :Representa el aumento porcentual medio de la ampacidad para todas las secciones de la ruta óptima (para todos los cables) respecto a la ruta de mínima distancia aplicada a todos los escenarios.
- Aumento Distancia de la ruta %: Es igual para ambos casos y representa el aumento % de longitud de la ruta optima respecto a la ruta de mínima distancia.

	Disminución Rt %	Aumento ampacidad %	Aumento Distancia de la ruta %
Resistividad térmica media	44.792	21.001	16.272
Resistividad térmica crítica	35.000	17.421	16.272

Figura 68 Tabla resumen de resultados [autor]

De forma que se obtienen valores de disminución de resistividad y aumento de la ampacidad mayores utilizando la resistividad media. Para una línea de alta o media tensión real el cálculo deberá realizarse con la resistividad crítica ya que es más restrictiva. Se han realizado los cálculos con la resistividad media porque si el modelo fuera un escenario real como el del mapa geológico mostrado en la sección 5.1 el valor crítico estaría más cerca del valor medio. Debido a que el número de unidades geológicas sería mayor y por tanto más variedad de unidades geológicas respecto a los valores discretos del modelo artificial 0.5,1,1.5,2,2.5,3 .

A continuación, se muestra:

- Las tablas de resultados completas en función a la resistividad térmicas media y en función de la resistividad térmica crítica.
- Los gráficos de los escenarios utilizados aplicando el modelo artificial del terreno.

6.3.1 Tabla de resultados 1: En función de la Resistividad térmica media

Escenario	Sección (mm2)	Rt Ruta óptima (K-m/W)	Rt Ruta Mín distancia (K-m/W)	Disminución Rt (%)	T4 Ruta Óptima (K-m/W)	T4 Ruta Min Distancia (K-m/W)	I Ruta Óptima (A)	I Ruta Min Distancia (A)	Aumento I (%)	Dis Ruta óptima (m)	Dis Ruta mínima distancia (m)	Aumento Dis (%)
1	50.000	0.920	1.413	34.872	1.077	1.653	175.941	151.231	14.045	1626.067	1414.214	13.029
	95.000	0.920	1.413	34.872	1.062	1.630	257.613	219.840	14.663	1626.067	1414.214	13.029
	150.000	0.920	1.413	34.872	1.045	1.605	327.871	278.771	14.976	1626.067	1414.214	13.029
	240.000	0.920	1.413	34.872	1.028	1.578	433.485	366.413	15.473	1626.067	1414.214	13.029
	400.000	0.920	1.413	34.872	1.008	1.547	564.500	474.523	15.939	1626.067	1414.214	13.029
	630.000	0.920	1.413	34.872	0.981	1.507	747.837	624.400	16.506	1626.067	1414.214	13.029
2	50.000	0.909	1.511	39.833	1.064	1.768	176.648	147.450	16.529	1613.381	1414.214	12.345
	95.000	0.909	1.511	39.833	1.049	1.743	258.707	214.129	17.231	1613.381	1414.214	12.345
	150.000	0.909	1.511	39.833	1.032	1.716	329.301	271.393	17.585	1613.381	1414.214	12.345
	240.000	0.909	1.511	39.833	1.015	1.688	435.456	356.433	18.147	1613.381	1414.214	12.345
	400.000	0.909	1.511	39.833	0.995	1.655	567.168	461.256	18.674	1613.381	1414.214	12.345
	630.000	0.909	1.511	39.833	0.969	1.611	751.537	606.403	19.312	1613.381	1414.214	12.345
3	50.000	1.118	1.768	36.776	1.308	2.068	164.660	138.740	15.742	1737.568	1414.214	18.610
	95.000	1.118	1.768	36.776	1.289	2.039	240.267	201.038	16.327	1737.568	1414.214	18.610
	150.000	1.118	1.768	36.776	1.269	2.008	305.256	254.521	16.620	1737.568	1414.214	18.610
	240.000	1.118	1.768	36.776	1.248	1.975	402.446	333.696	17.083	1737.568	1414.214	18.610
	400.000	1.118	1.768	36.776	1.224	1.936	522.674	431.141	17.513	1737.568	1414.214	18.610
	630.000	1.118	1.768	36.776	1.192	1.885	690.145	565.720	18.029	1737.568	1414.214	18.610
4	50.000	0.750	1.825	58.910	0.877	2.135	187.790	137.009	27.041	1644.812	1414.214	14.020
	95.000	0.750	1.825	58.910	0.865	2.105	276.035	198.447	28.108	1644.812	1414.214	14.020
	150.000	0.750	1.825	58.910	0.852	2.072	352.024	251.187	28.645	1644.812	1414.214	14.020
	240.000	0.750	1.825	58.910	0.838	2.038	466.940	329.218	29.495	1644.812	1414.214	14.020
	400.000	0.750	1.825	58.910	0.821	1.998	609.975	425.225	30.288	1644.812	1414.214	14.020
	630.000	0.750	1.825	58.910	0.800	1.946	811.244	557.757	31.247	1644.812	1414.214	14.020
5	50.000	0.939	1.801	47.865	1.098	2.107	174.773	137.730	21.195	1855.225	1414.214	23.771
	95.000	0.939	1.801	47.865	1.083	2.077	255.809	199.526	22.002	1855.225	1414.214	23.771
	150.000	0.939	1.801	47.865	1.066	2.045	325.513	252.575	22.407	1855.225	1414.214	23.771
	240.000	0.939	1.801	47.865	1.049	2.012	430.237	331.081	23.047	1855.225	1414.214	23.771
	400.000	0.939	1.801	47.865	1.028	1.972	560.107	427.686	23.642	1855.225	1414.214	23.771
	630.000	0.939	1.801	47.865	1.001	1.920	741.750	561.068	24.359	1855.225	1414.214	23.771
6	50.000	0.853	1.723	50.496	0.998	2.016	180.349	140.154	22.287	1680.690	1414.214	15.855
	95.000	0.853	1.723	50.496	0.984	1.987	264.440	203.158	23.174	1680.690	1414.214	15.855
	150.000	0.853	1.723	50.496	0.969	1.957	336.806	257.249	23.621	1680.690	1414.214	15.855
	240.000	0.853	1.723	50.496	0.953	1.924	445.822	337.364	24.328	1680.690	1414.214	15.855
	400.000	0.853	1.723	50.496	0.934	1.887	581.220	435.989	24.987	1680.690	1414.214	15.855
	630.000	0.853	1.723	50.496	0.909	1.837	771.064	572.254	25.784	1680.690	1414.214	15.855
MEDIAS		0.915	1.674	44.792	1.027	1.879			21.001	1692.957	1414.214	16.272

Figura 69 Tabla de resultados 1 [autor]

6.3.2 Tabla de resultados 2: En función de la Resistividad térmica crítica

Escenario	Sección (mm2)	Rt Ruta óptima (K-m/W)	Rt Ruta Mín distancia (K-m/W)	Disminución Rt (%)	T4 Ruta Óptima (K-m/W)	T4 Ruta Min Distancia (K-m/W)	I Ruta Óptima (A)	I Ruta Min Distancia (A)	Aumento I (%)	Dis Ruta óptima (m)	Dis Ruta mínima distancia (m)	Aumento Dis (%)
1	50.000	1.500	2.500	40.000	1.755	2.925	147.860	120.460	18.531	1626.067	1414.214	13.029
	95.000	1.500	2.500	40.000	1.730	2.884	214.748	173.826	19.056	1626.067	1414.214	13.029
	150.000	1.500	2.500	40.000	1.703	2.839	272.192	219.616	19.316	1626.067	1414.214	13.029
	240.000	1.500	2.500	40.000	1.675	2.792	357.513	287.010	19.720	1626.067	1414.214	13.029
	400.000	1.500	2.500	40.000	1.643	2.738	462.690	369.729	20.092	1626.067	1414.214	13.029
	630.000	1.500	2.500	40.000	1.599	2.666	608.345	483.443	20.532	1626.067	1414.214	13.029
2	50.000	2.000	2.500	20.000	2.340	2.925	132.074	120.460	8.794	1613.381	1414.214	12.345
	95.000	2.000	2.500	20.000	2.307	2.884	191.075	173.826	9.028	1613.381	1414.214	12.345
	150.000	2.000	2.500	20.000	2.271	2.839	241.717	219.616	9.143	1613.381	1414.214	12.345
	240.000	2.000	2.500	20.000	2.234	2.792	316.517	287.010	9.322	1613.381	1414.214	12.345
	400.000	2.000	2.500	20.000	2.190	2.738	408.479	369.729	9.487	1613.381	1414.214	12.345
	630.000	2.000	2.500	20.000	2.132	2.666	535.258	483.443	9.680	1613.381	1414.214	12.345
3	50.000	2.500	3.000	16.667	2.925	3.510	120.460	111.453	7.476	1737.568	1414.214	18.610
	95.000	2.500	3.000	16.667	2.884	3.461	173.826	160.537	7.645	1737.568	1414.214	18.610
	150.000	2.500	3.000	16.667	2.839	3.407	219.616	202.646	7.727	1737.568	1414.214	18.610
	240.000	2.500	3.000	16.667	2.792	3.351	287.010	264.465	7.855	1737.568	1414.214	18.610
	400.000	2.500	3.000	16.667	2.738	3.285	369.729	340.257	7.971	1737.568	1414.214	18.610
	630.000	2.500	3.000	16.667	2.666	3.199	483.443	444.248	8.107	1737.568	1414.214	18.610
4	50.000	1.500	3.000	50.000	1.755	3.510	147.860	111.453	24.622	1644.812	1414.214	14.020
	95.000	1.500	3.000	50.000	1.730	3.461	214.748	160.537	25.244	1644.812	1414.214	14.020
	150.000	1.500	3.000	50.000	1.703	3.407	272.192	202.646	25.550	1644.812	1414.214	14.020
	240.000	1.500	3.000	50.000	1.675	3.351	357.513	264.465	26.026	1644.812	1414.214	14.020
	400.000	1.500	3.000	50.000	1.643	3.285	462.690	340.257	26.461	1644.812	1414.214	14.020
	630.000	1.500	3.000	50.000	1.599	3.199	608.345	444.248	26.974	1644.812	1414.214	14.020
5	50.000	2.000	3.000	33.333	2.340	3.510	132.074	111.453	15.613	1855.225	1414.214	23.771
	95.000	2.000	3.000	33.333	2.307	3.461	191.075	160.537	15.982	1855.225	1414.214	23.771
	150.000	2.000	3.000	33.333	2.271	3.407	241.717	202.646	16.164	1855.225	1414.214	23.771
	240.000	2.000	3.000	33.333	2.234	3.351	316.517	264.465	16.445	1855.225	1414.214	23.771
	400.000	2.000	3.000	33.333	2.190	3.285	408.479	340.257	16.701	1855.225	1414.214	23.771
	630.000	2.000	3.000	33.333	2.132	3.199	535.258	444.248	17.003	1855.225	1414.214	23.771
6	50.000	1.500	3.000	50.000	1.755	3.510	147.860	111.453	24.622	1680.690	1414.214	15.855
	95.000	1.500	3.000	50.000	1.730	3.461	214.748	160.537	25.244	1680.690	1414.214	15.855
	150.000	1.500	3.000	50.000	1.703	3.407	272.192	202.646	25.550	1680.690	1414.214	15.855
	240.000	1.500	3.000	50.000	1.675	3.351	357.513	264.465	26.026	1680.690	1414.214	15.855
	400.000	1.500	3.000	50.000	1.643	3.285	462.690	340.257	26.461	1680.690	1414.214	15.855
	630.000	1.500	3.000	50.000	1.599	3.199	608.345	444.248	26.974	1680.690	1414.214	15.855
MEDIAS		1.833	2.833	35.000	2.059	3.181			17.421	1692.957	1414.214	16.272

Figura 70 Tabla de resultados 2 [autor]

Escenario 1

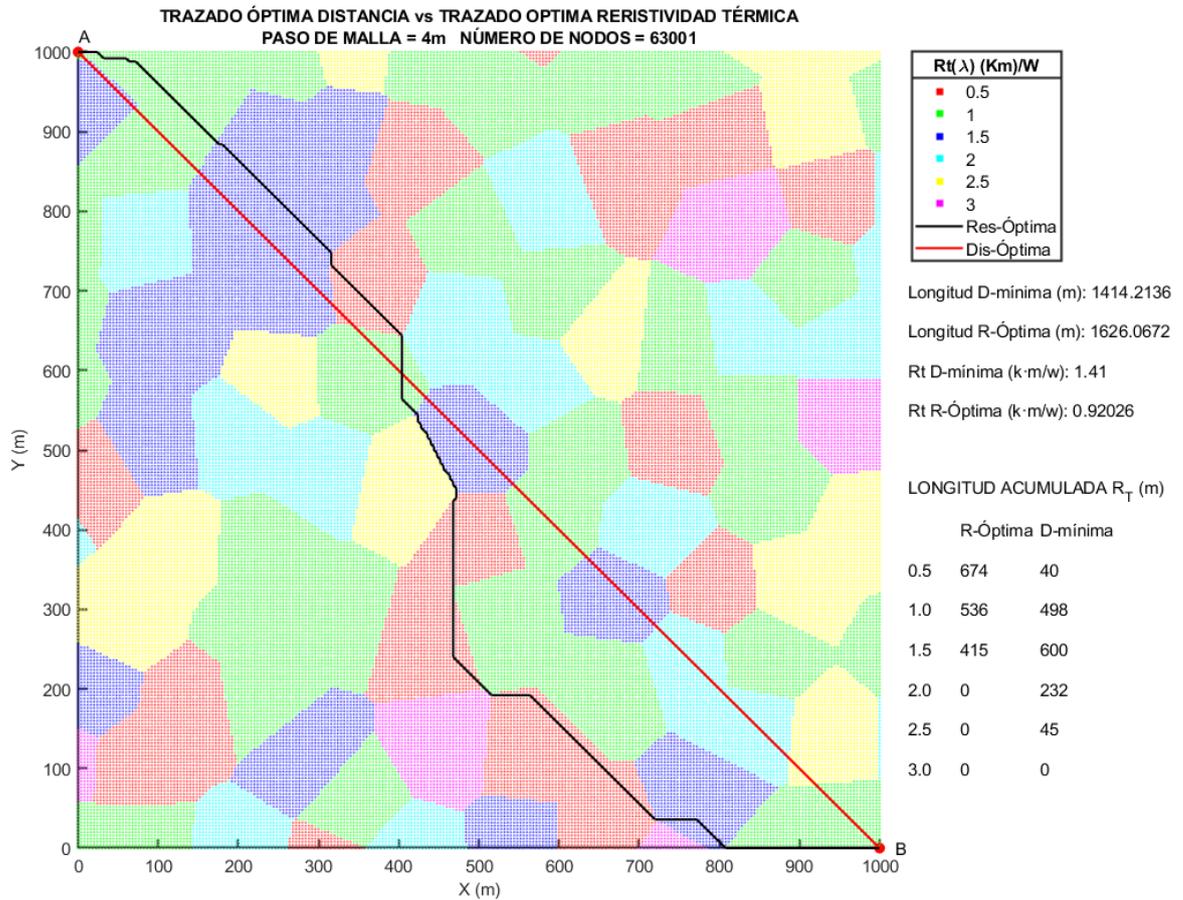


Figura 71 Escenario 1 [autor]

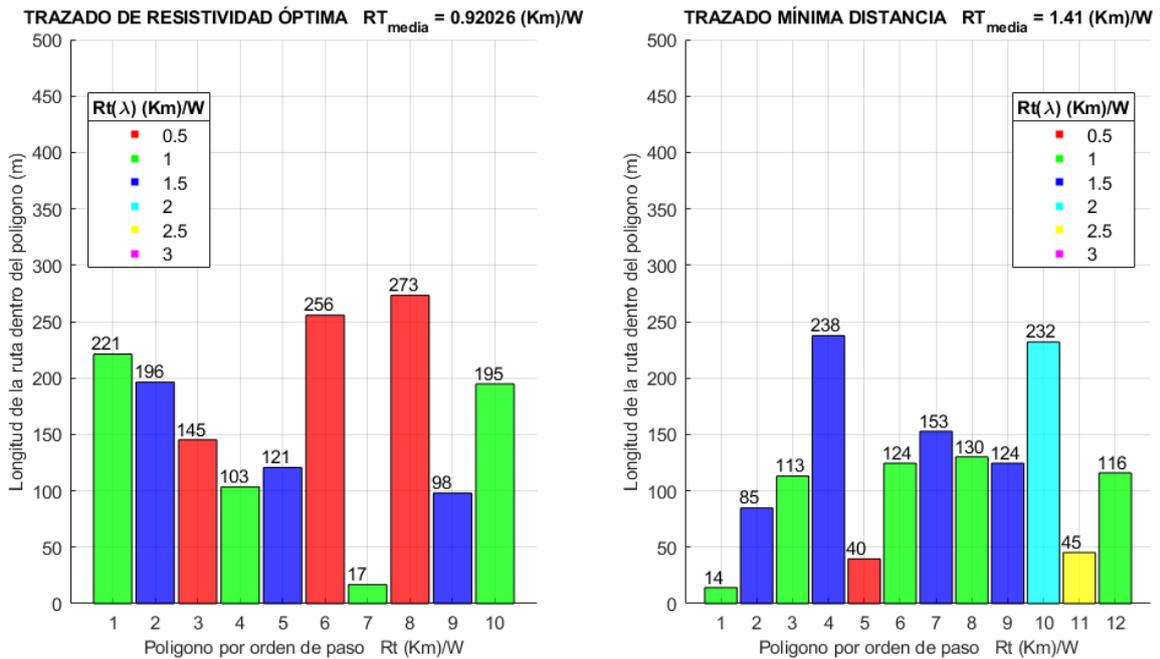


Figura 72 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 1 [autor]

Escenario 2

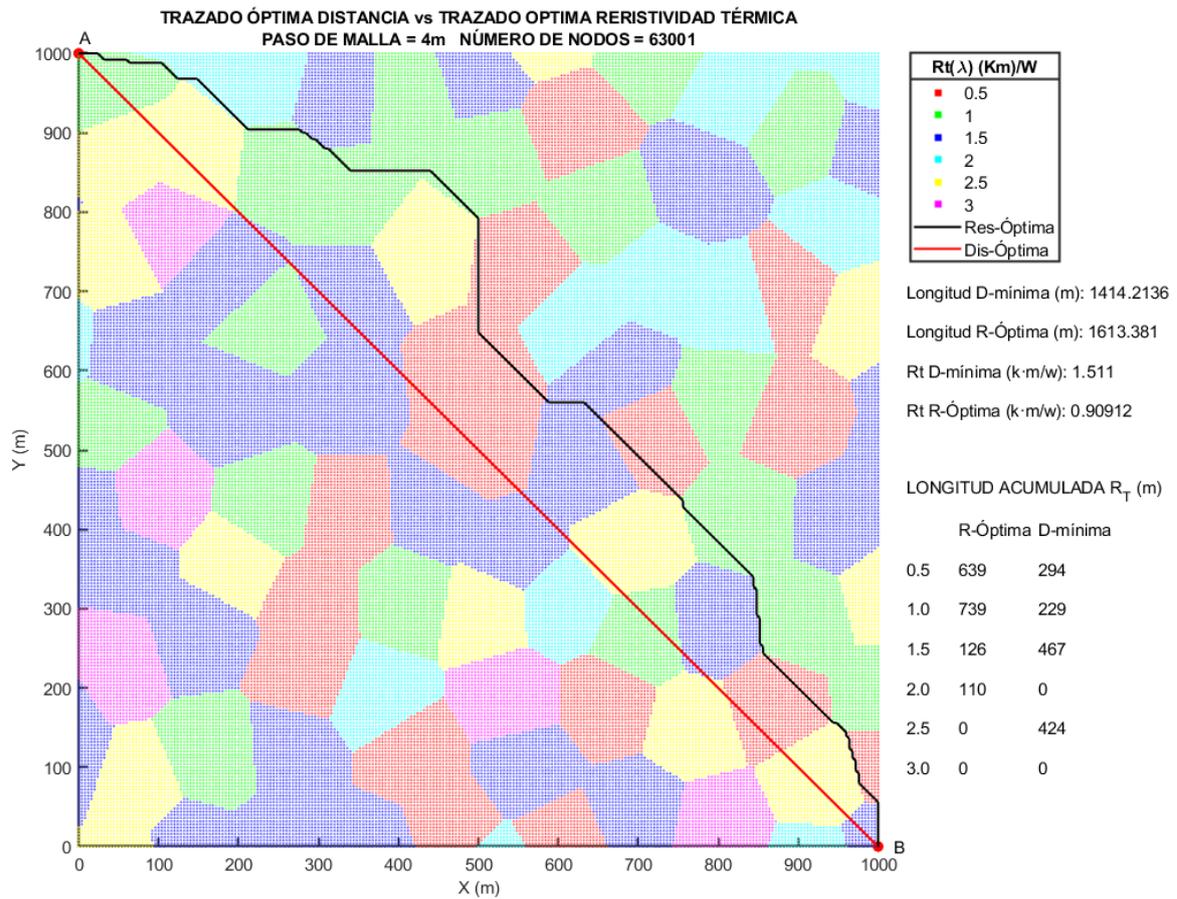


Figura 73 Escenario 2 [autor]

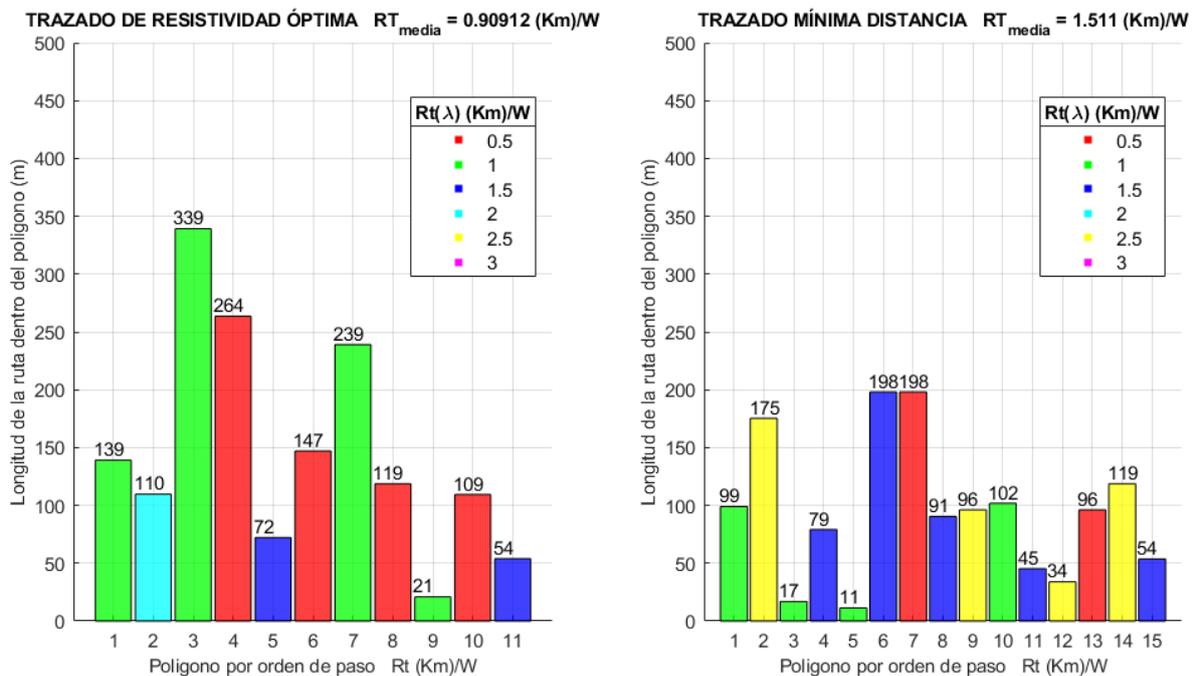


Figura 74 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 2 [autor]

Escenario 3

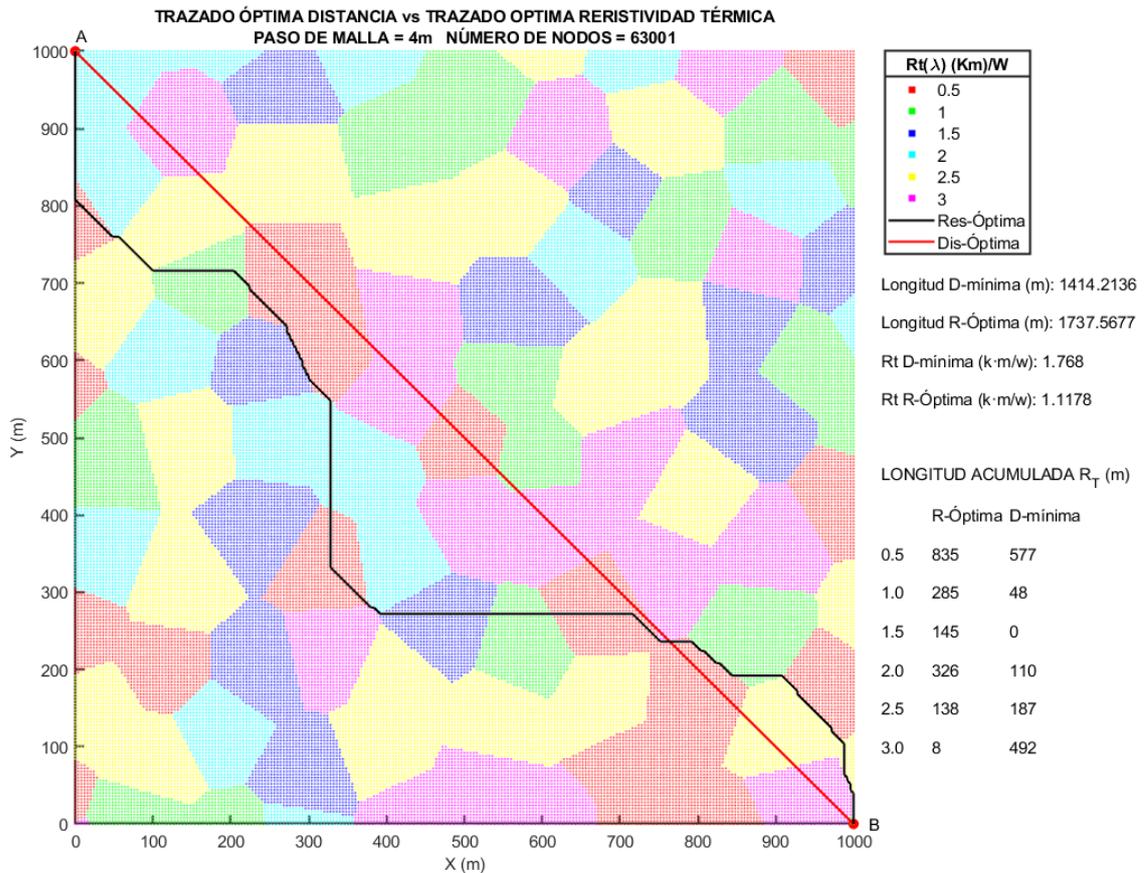


Figura 75 Escenario 3 [autor]

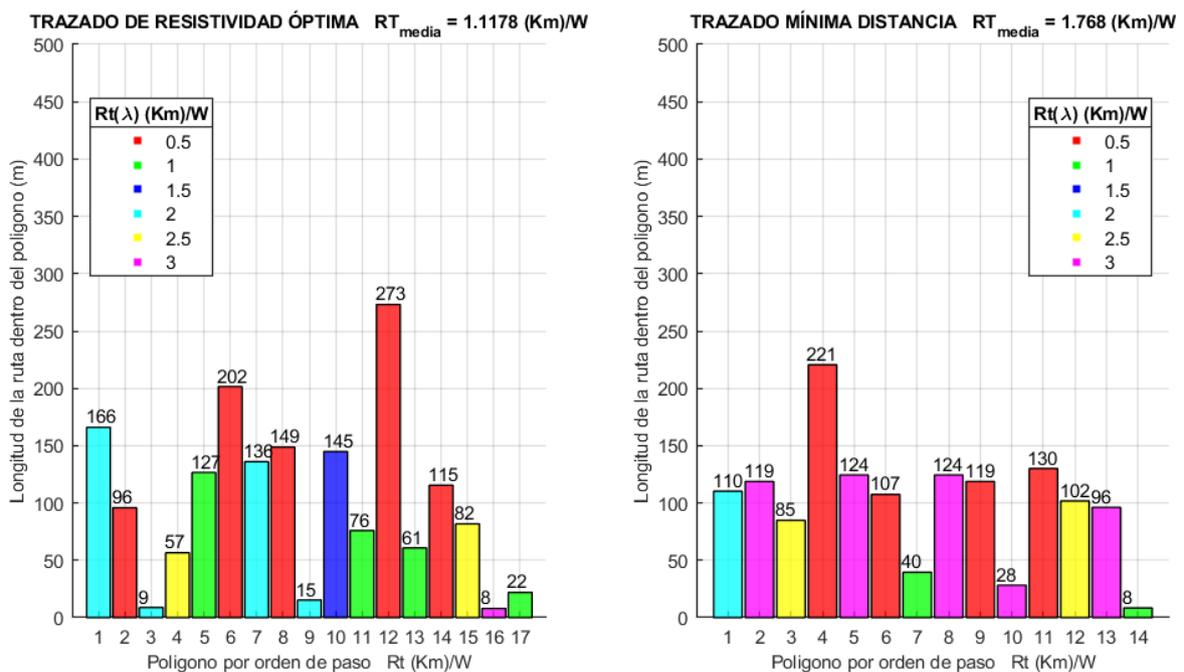


Figura 76 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 3 [autor]

Escenario 4

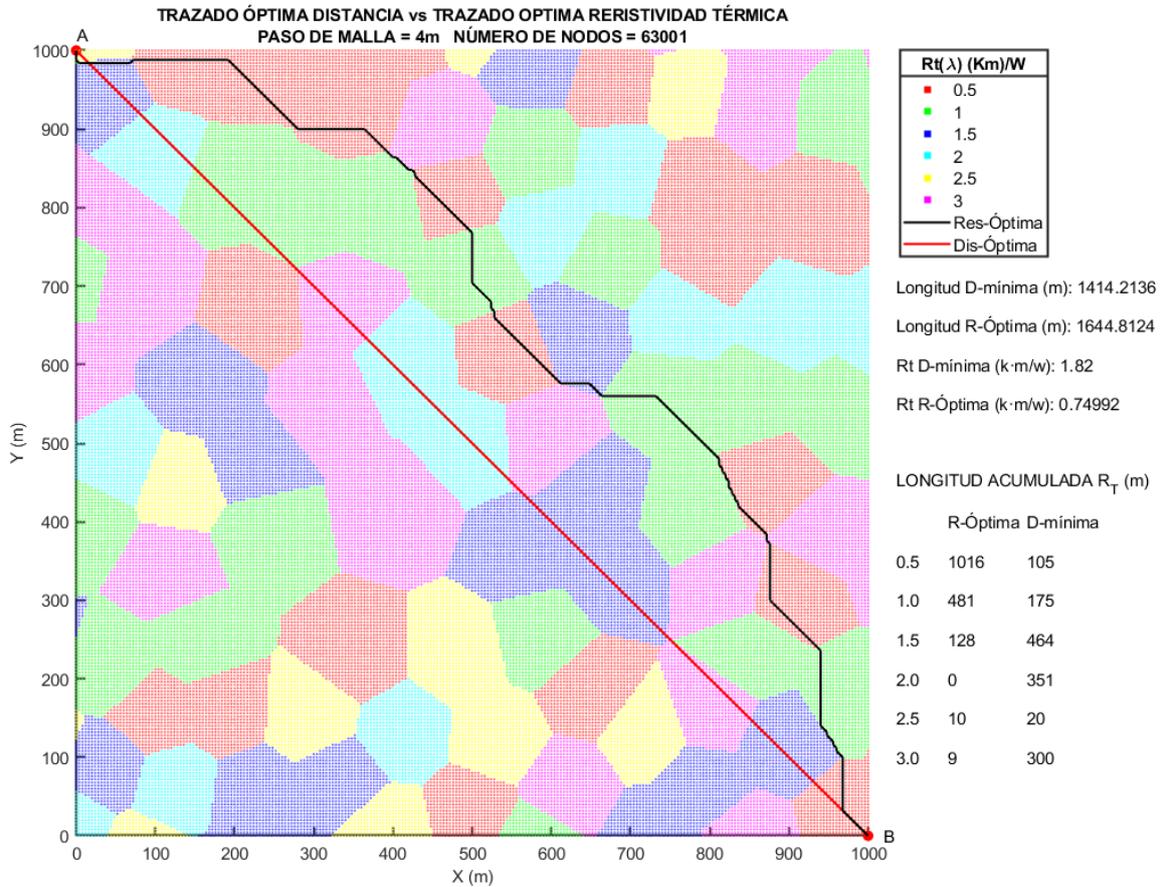


Figura 77 Escenario 4 [autor]

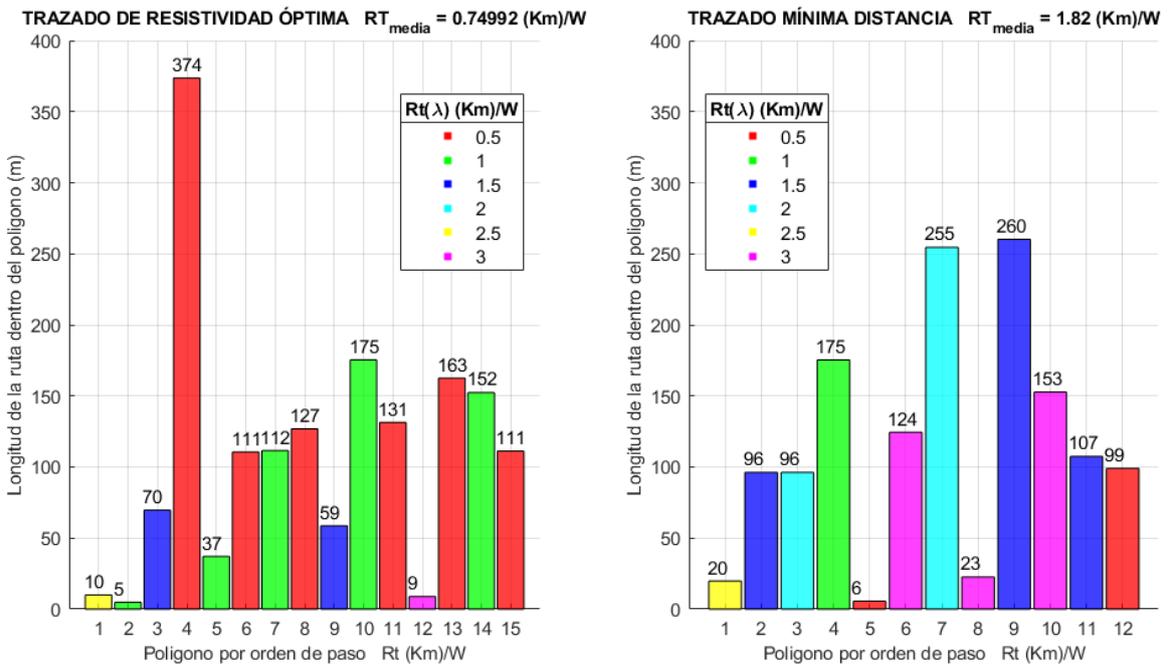


Figura 78 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 4 [autor]

Escenario 5

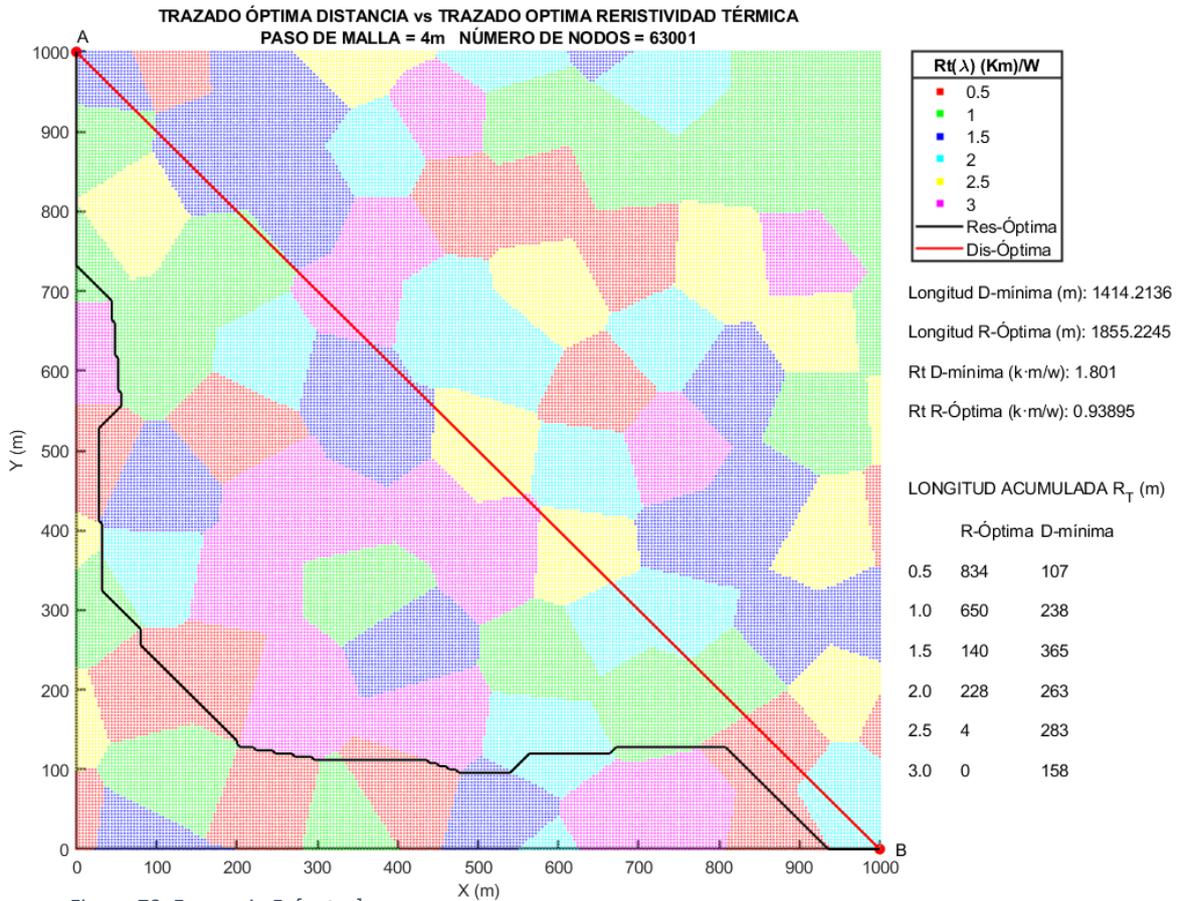


Figura 79 Escenario 5 [autor]

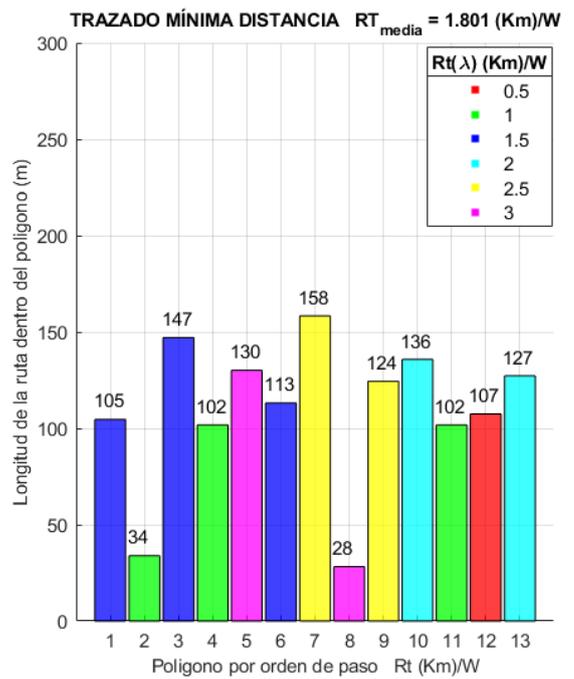
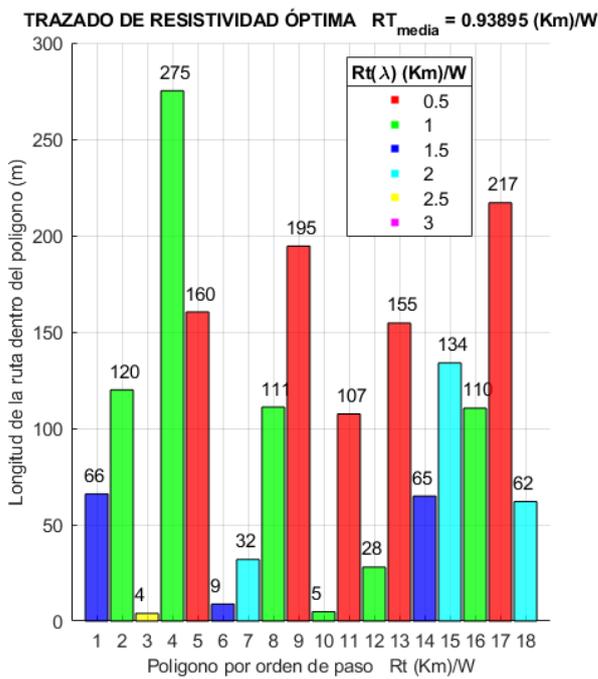


Figura 80 Gráfico Polígonos por orden de paso para el Escenario 5 [autor]

Escenario 6

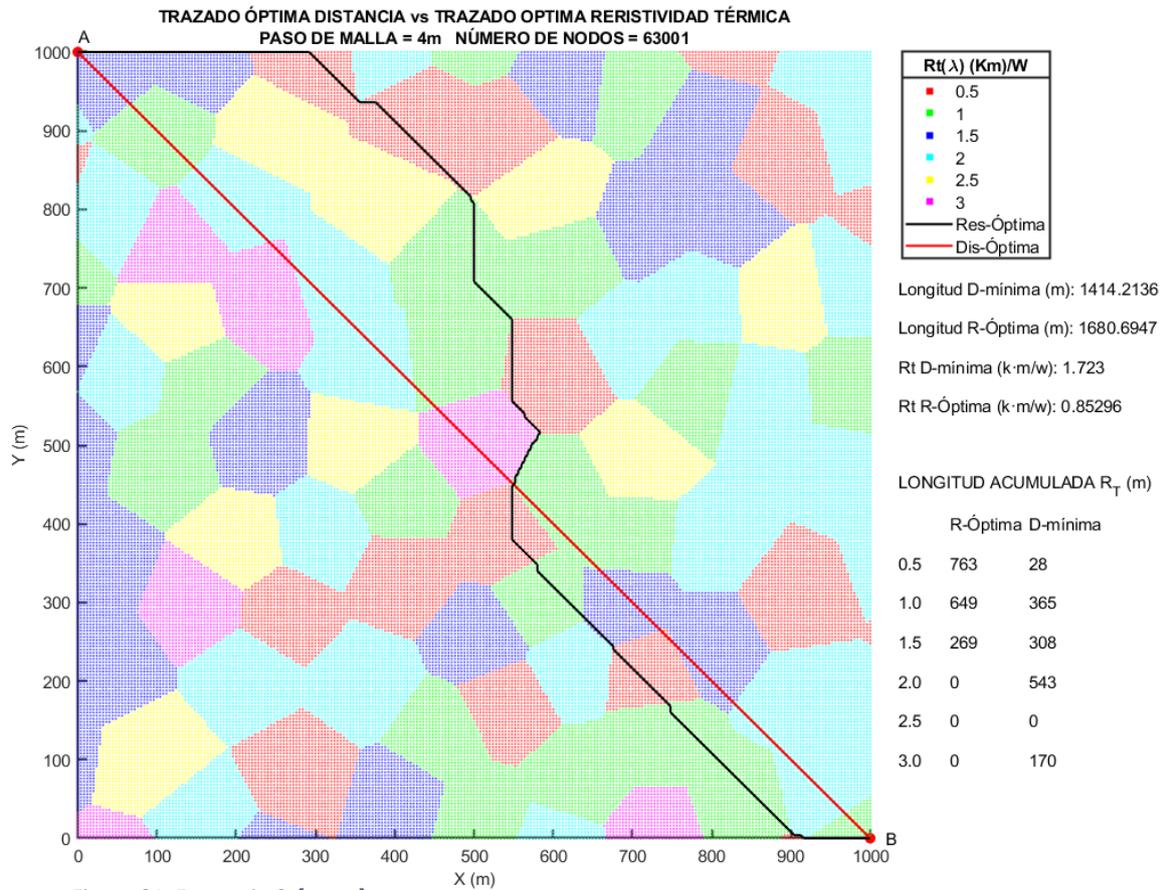


Figura 81 Escenario 6 [autor]

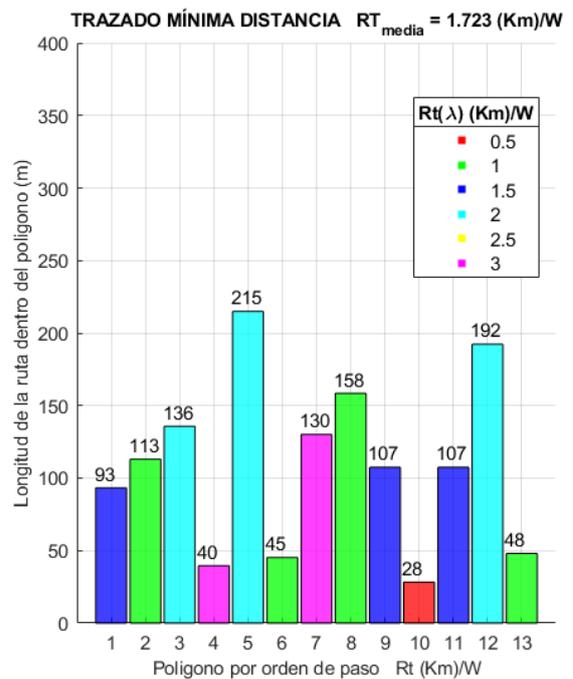
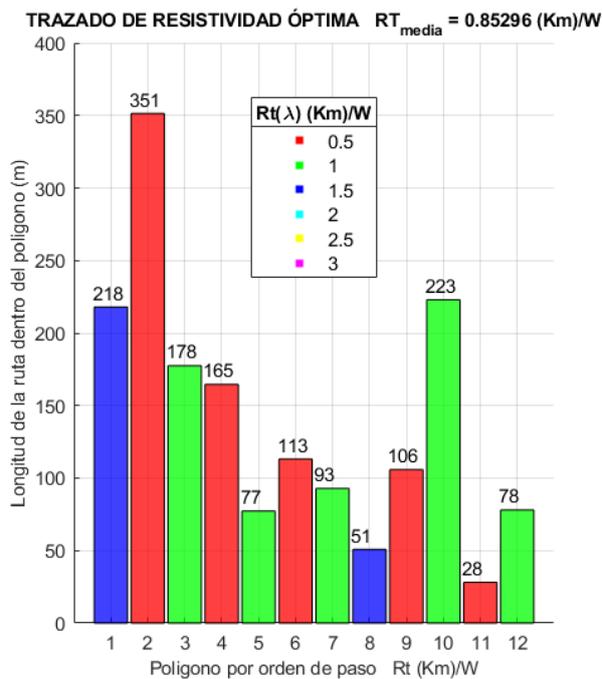


Figura 82 Gráfico Poligonos por orden de paso para el Escenario 6 [autor]

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se han desarrollado un conjunto de técnicas para la construcción de un modelo artificial del terreno tomando como base la naturaleza del mapa geológico y la utilización de los diagramas de Voronoi. Sobre este modelo artificial se ha generado un grafo mallado con paso de malla variable al se han aplicado algoritmos de encadenamiento para la obtención de rutas mínimas obteniendo:

- Trazados para líneas eléctricas subterráneas (simplificando para el caso de cables directamente enterrados) en los que se reduce la resistividad térmica del trazado en un 33% respecto al trazado de mínima distancia.
- Como consecuencia de esa reducción de resistividad térmica para los cables ensayados el aumento de la ampacidad ha sido de un 17% respecto a al trazado de mínima distancia euclídea.

El conjunto de procedimientos y algoritmos desarrollados en este trabajo toman como base la generación de polígonos aleatorios dispuestos sobre un área de terreno plana. Existen distintos aspectos sobre los que se podrían desarrollar futuras líneas de investigación con el fin de que el modelo propuesto se parezca más a un modelo real :

- Inclusión de datos LIDAR :Con una nube de puntos se podría generar un modelo digital del terreno (MDT) sobre el que posicionar los polígonos y representar de esa forma un escenario real del terreno .
- Mapa geológico: Proporcionaría información real al sobre el tipo de terreno al que habría que someter a medidas para estimar la resistividad térmica.
- Filtrado de vértices: Consiste en la generación de un algoritmo que dada un área evite la comunicación de los vértices interiores con los exteriores. De esa forma se podrían filtrar edificios, carreteras, zonas de difícil acceso ...para evitar que el trazado de la línea transcurra por ellos.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] «<http://manuals.decagon.com>» [En línea]. Available:

[/http://manuals.decagon.com/Application%20Guides/SoilThermalResistivity_Web.pdf](http://manuals.decagon.com/Application%20Guides/SoilThermalResistivity_Web.pdf)

[Último acceso:12 de Julio 2020]

[2] «<https://es.prysmiangroup.com>» [En línea]. Available:

<https://www.prysmianclub.es/catalogos/catalogo-y-guia-media-tension/>

[Último acceso:12 de Julio 2020]

[3] «<https://www.voltimum.es>» [En línea]. Available:

<https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/teoria-componentes-cables-media>

[Último acceso:14 de Julio 2020]

[4] AENOR UNE_21144_2_1 Tabla 1.Mayo 1997

[5] AENOR UNE_21144_1_1 Tabla 3. Octubre 2012

[6] M. S. Tenorio ,Soterramiento parcial de una línea eléctrica DC 132 Kv

[En línea]. Available:

proyectos/abreproy/5210/fichero/VOLUMEN+1%252FDOC+2_Linea+Subterranea+AT

[Último acceso:14 de Julio 2020]

[7] «<https://es.prysmiangroup.com>» [En línea].Available:

<https://www.prysmianclub.es/wp-content/uploads/2018/05/2018/Prysmian/Meda-Tension>

[Último acceso:14 de Julio 2020]

[8] M.Llorente, Sistemas de cables de energía para media y alta tensión

[En línea]. Available:

<https://es.slideshare.net/fnuno/sesion-4-curso-de-formacion-en-cables-de-energia-para-media-y-alta-tension> [Último acceso:14 de Julio 2020]

[9] P.M. Cofré ,Cálculo de cables subterráneos. [En línea]. Available:

<https://es.slideshare.net/universidadcarabobo/calculo-decables-subterraneos>

[Último acceso:16 de Julio 2020]

[10] «<https://www.elektrisola.com>». [En línea]. Available:

<https://www.elektrisola.com/es/alambres-litz/productos/terminologia-basicos/bases-tecnicas-y-calculos.html#c6616> .[Último acceso:16 de Julio 2020]

[11] «<https://www.ecured.cu/>». Efecto Pelicular. [En línea]. Available:

https://www.ecured.cu/Efecto_pelicular#/media/File:Efecto_pelicular.JPG

[Último acceso:5 de agosto 2020]

[12] «www.voltimum.es». Pérdidas en el dieléctrico de los cables aislados.

[En línea]. Available: <https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/perdidas-dielectrico-cables>.

[Último acceso:12 de agosto 2020]

[13] AENOR UNE_211435. Mayo 2011

[14] «<https://www.researchgate>»DEM-based GIS algorithms for automatic creation of hydrological models data. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/DEM-representation-using-regular-grid_fig1_228359287. [Último acceso:12 de agosto 2020]

[15] «<https://www.mathworks.com>» Convert subscripts to linear indices. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/sub2ind.html>

[Último acceso:12 de agosto 2020]

[16] Mapa Geológico 1:25000.Hoja 035_1 [En línea]. Available:

<https://mapas.cantabria.es/> .[Último acceso:20 de agosto 2020]

[17] R. A. Calvo, Redes de comunicaciones, Tema 2 algoritmos de encadenamiento.

[En línea]. Available: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/301/course/section/239/tema_02.pdf

[Último acceso:23 de agosto 2020]

[18] C.C.Zurita, Aplicación informática para el cálculo de la ampacidad de transporte para cables subterráneos de potencia según la norma UNE 21144. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/12243> .[Último acceso:20 de agosto 2020]

[19] I.D.Blanco ,Funciones de Sensibilidad. [En línea].

Available: <http://isa.uniovi.es/~idiaz/TemasDocentes/Sensibilidad.pdf> .

[Último acceso:20 de agosto 2020]

[20] A. Saltelli, Stefano Tarantola, Francesca Campolongo, Marco Ratto “Sensitivity Analysis in Practice” 2004.