

Proyecto Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Caracterización Eléctrica de Cables Trifásicos Submarinos

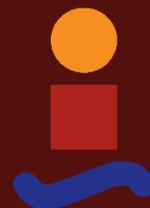
Autor: Daniel González Canca

Tutor: Juan Carlos del Pino López

Pedro Luis Cruz Romero

**Departamento. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Caracterización Eléctrica de Cables Trifásicos Submarinos

Autor:

Daniel González Canca

Tutor:

Juan Carlos del Pino López

Pedro Luis Cruz Romero

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

A mi familia.

En especial, a mis abuelos.

Resumen

Este documento tiene como objetivo principal realizar una comparación de los valores de pérdidas de potencia producidos en un cable submarino, tanto de forma analítica, IEC 60287-1-1, que se corresponde con la UNE 21144-1-1, como mediante simulaciones numéricas, a través del programa Comsol Multhipysics. Estos modelos basados en simulaciones serán estudiados tanto de forma bidimensional como tridimensional. Además, se estudiarán las variaciones producidas en las pérdidas al modificar ciertos parámetros de diseño del cable.

Este estudio tiene lugar tras apreciar las diferencias existentes en diversas publicaciones realizadas hasta la fecha. Actualmente existen varios estudios de cables cuyos resultados analíticos difieren con los valores que se obtienen al realizar un estudio mediante simulaciones numéricas tridimensional del cable. Las conclusiones obtenidas de estas publicaciones previas, serán analizadas y comparadas con las obtenidas en este estudio.

Para ello, inicialmente, se presentarán unos modelos de cables tipos a partir de los cuales se van a realizar los estudios, y sus características propias (tensión, intensidad, sección, etc). A partir de ello, se realizará, en primer lugar, un estudio analítico de las pérdidas de potencia originadas basada en la citada norma. Posteriormente, se repetirá este mismo estudio con estos mismos cables pero mediante simulaciones en 2D. Los resultados obtenidos en ambas modalidades permitirán realizar un análisis comparativo y analizar las consecuencias de las posibles variaciones existentes. Este hecho será repetido con modelos 2.5D (modelos bidimensionales forzando a que cumplan ciertas condiciones que suceden en el 3D) y seguidamente se hará lo propio con modelos 3D. Todos estos resultados serán analizados de manera conjunta para establecer las condiciones que provocan las posibles variaciones de los mismos.

Para llegar al estudio de modelos tridimensionales, se realizarán una serie de análisis previos en beneficio de conseguir un modelo más simplificado, dado las complicaciones surgidas en el mallado y ejecución de los modelos con la herramienta Comsol Multhipysics.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. λ_1 y λ_2 para [14]	21
Tabla 2. λ_1 y λ_2 para [10]	22
Tabla 3. λ_1 y λ_2 para [12]	22
Tabla 4. Características cables de estudios	58
Tabla 5. Características cables de estudios	58
Tabla 6. Modelos 2D con fases de hilos	61
Tabla 7. λ_1 y λ_2 para fases de hilos	61
Tabla 8. Modelos 2D con fases macizas	61
Tabla 9. λ_1 y λ_2 para fases macizas	62
Tabla 10. Relación de pérdidas en fases	62
Tabla 11. Pérdidas por cada fase	63
Tabla 12. Pérdidas por cada pantalla	63
Tabla 13. λ_1 por cada relación pantalla-fase y λ_1 media	63
Tabla 14. Comparación lambdas 1	64
Tabla 15. Pérdidas de potencia analíticas	67
Tabla 16. Pérdidas resistivas modelos 2D	70
Tabla 17. λ_1 y λ_2 modelos 2D	70
Tabla 18. Comparación lambdas analítico y de simulación 2D	70
Tabla 19. Comparación lambdas analítico y de simulación 2D	71
Tabla 20. Pérdidas resistivas modelos 2.5D	73
Tabla 21. λ_1 y λ_2 modelos 2.5D	73
Tabla 22. Comparación lambdas analítico y de simulación 2D y 2.5D	74
Tabla 23. Comparación lambdas de simulaciones 2D y 2.5D	75
Tabla 24. Pérdidas pantallas y armaduras modelos 3D	79
Tabla 25. Comparación pérdidas de simulaciones 2D y 3D	81
Tabla 26. Comparación pérdidas pantallas de simulaciones 2.5D y 3D	81
Tabla 27. Pérdidas variación del paso pantallas	86
Tabla 28. Pérdidas variación del paso hilos de armadura	88
Tabla 29. Pérdidas variación del paso pantallas	91
Tabla 30. Pérdidas variación del paso hilos de armadura	94
Tabla 31. N para Dh variable Modelo 1	97
Tabla 32. N para Dh variable Modelo 2	97
Tabla 33. N para Dh variable Modelo 3	97
Tabla 34. N para Dh variable modelo 4	98
Tabla 35. N para Dh variable Modelo 5	98

Tabla 36. N para Dh variable Modelo 6	98
Tabla 37. N para δ variable Modelo 1	98
Tabla 38. N para δ variable Modelo 2	98
Tabla 39. N para δ variable modelo 3	98
Tabla 40. N para δ variable Modelo 4	99
Tabla 41. N para δ variable Modelo 5	99
Tabla 42. N para δ variable Modelo 6	99
Tabla 43. Pérdidas para Dh variable modelo 1	99
Tabla 44. Pérdidas para Dh variable Modelo 2	100
Tabla 45. Pérdidas para Dh variable Modelo 3	101
Tabla 46. Pérdidas para Dh variable Modelo 4	101
Tabla 47. Pérdidas para Dh variable Modelo 5	102
Tabla 48. Pérdidas para Dh variable Modelo 6	103
Tabla 49. Pérdidas para δ variable Modelo 1	104
Tabla 50. Pérdidas para δ variable modelo 2	105
Tabla 51. Pérdidas para δ variable Modelo 3	105
Tabla 52. Pérdidas para δ variable Modelo 4	106
Tabla 53. Pérdidas para δ variable Modelo 5	107
Tabla 54. Pérdidas para δ variable Modelo 6	108
Tabla 55. Pérdidas para Dh variable Modelo 1	110
Tabla 56. Pérdidas para Dh variable Modelo 2	110
Tabla 57. Pérdidas para Dh variable Modelo 3	111
Tabla 58. Pérdidas para Dh variable Modelo 4	111
Tabla 59. Pérdidas para Dh variable Modelo 5	112
Tabla 60. Pérdidas para Dh variable Modelo 6	112
Tabla 61. Pérdidas para δ variable Modelo 1	113
Tabla 62. Pérdidas para δ variable Modelo 2	114
Tabla 63. Pérdidas para δ variable Modelo 3	114
Tabla 64. Pérdidas para δ variable Modelo 4	114
Tabla 65. Pérdidas para δ variable Modelo 5	115
Tabla 66. Pérdidas para δ variable Modelo 6	115
Tabla 67. Pérdidas para Dh variable Modelo 1	117
Tabla 68. Pérdidas para Dh variable Modelo 3	117
Tabla 69. Pérdidas para Dh variable Modelo 4	118
Tabla 70. Pérdidas para δ variable Modelo 1	118
Tabla 71. Pérdidas para δ variable Modelo 3	119
Tabla 72. Pérdidas para δ variable Modelo 4	119

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1): λ_1	23
(2): λ_1 . Pérdidas por corrientes	23
(3): Reactancia	23
(4): Frecuencia angular	23
(5): λ_1 resultante	23
(6): λ_2	24
(7): Resistencia eléctrica	35
(8): Peso del cobre	35
(9): Resistencia equivalente aluminio	35
(10): Peso aluminio	35
(11): Relación de parámetros de la armadura	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proyecto NorNed	27
Figura 2. Cable submarino España - Marruecos	28
Figura 3. Proyecto R	28
Figura 4. Cable submarino	30
Figura 5. Arquitectura del cable submarino	32
Figura 6. Comparación de eficiencia AC/DC	34
Figura 7. Comparación de coste AC/DC	34
Figura 8. Cable en el barco cablero	36
Figura 9. Máquina lineal de instalación	37
Figura 10. Instalación del cable	37
Figura 11. Instalación del cable	38
Figura 12. Instalación del cable	38
Figura 13. Instalación del cable	38
Figura 14. Instalación del cable	39
Figura 15. Módulos de Comsol Multiphysics	44
Figura 16. Físicas de Comsol Multiphysics	44
Figura 17. Relación de materiales	46
Figura 18. Lista de parámetros	47
Figura 19. Definición de dominios	47
Figura 20. Geometría del modelo	48
Figura 21. Aplicación de materiales	48
Figura 22. Introducción de corrientes en conductores	49
Figura 23. Realización del mallado	49
Figura 24. Construcción de un cable submarino	50
Figura 25. Modelo bidimensional	52
Figura 26. Modelo “2.5D”	53
Figura 27. Circuito eléctrico 2.5D	53
Figura 28. Circuito eléctrico 2.5D	54
Figura 29. Trenzado de las pantallas	55
Figura 30. Modelos 3D	55
Figura 31. Cable Modelo 1	56
Figura 32. Cable Modelo 2	57
Figura 33. Cable Modelo 3	57

Figura 34. Cable Modelo 4	58
Figura 35. Cable Modelo 5	58
Figura 36. Cable Modelo 6	59
Figura 37. Fase de hilos	60
Figura 38. Fases macizas	60
Figura 39. Fases de hilos	60
Figura 40. Fases macizas	60
Figura 41. Fase de hilos	61
Figura 42. Fase macizas	61
Figura 43. Fase de hilos	61
Figura 44. Fase macizas	61
Figura 45. Fase de hilos	61
Figura 46. Fase macizas	61
Figura 47. Modelo 3D fase macizas	65
Figura 48. Modelo 3D fase hilos	66
Figura 49. Modelo 1 2D	69
Figura 50. Modelo 1 2D mallado	69
Figura 51. Modelo 2 2D	69
Figura 52. Modelo 2 2D mallado	69
Figura 53. Modelo 3 2D	69
Figura 54. Modelo 3 2D mallado	69
Figura 55. Modelo 4 2D	70
Figura 56. Modelo 4 2D mallado	70
Figura 57. Modelo 5 2D	70
Figura 58. Modelo 5 2D mallado	70
Figura 59. Modelo 6 2D	70
Figura 60. Modelo 6 2D mallado	70
Figura 61. Comparación λ_1 analítico vs 2D	72
Figura 62. Comparación λ_2 analítico vs 2D	72
Figura 63. Circulación de corrientes por hilos de armadura	73
Figura 64. Comparación λ_1 de simulaciones 2D vs 2.5D	75
Figura 65. Comparación λ_2 de simulaciones 2D vs 2.5D	76
Figura 66. Circulación de corrientes por hilos de armadura	77
Figura 67. Modelo 1 3D	78
Figura 68. Modelo 2 3D	78
Figura 69. Modelo 3 3D	79
Figura 70. Modelo 4 3D	79

Figura 71. Modelo 5 3D	80
Figura 72. Modelo 6 3D	80
Figura 73. Flujo de corriente 3D	80
Figura 74. Flujo de corriente ampliado 3D	81
Figura 75. Comparación pérdidas pantallas de simulaciones 2D vs 3D	81
Figura 76. Comparación pérdidas armaduras de simulaciones 2D vs 3D	82
Figura 77. Comparación pérdidas pantallas de simulaciones 2.5D vs 3D	82
Figura 78. Comparación pérdidas armaduras de simulaciones 2.5D vs 3D	83
Figura 79. Circulación de corrientes por hilos	85
Figura 80. Mitad paso fase y pantalla (a)	85
Figura 81. Mitad paso fase y pantalla (b)	85
Figura 82. Mitad paso fase y pantalla (c)	85
Figura 83. Un tercio paso fase y pantalla (a)	85
Figura 84. Un tercio paso fase y pantalla (b)	86
Figura 85. Un tercio paso fase y pantalla (c)	86
Figura 86. Un cuarto paso fase y pantalla (a)	86
Figura 87. Un cuarto paso fase y pantalla (b)	86
Figura 88. Un cuarto paso fase y pantalla (c)	87
Figura 89. Pérdidas por pantallas distintos pasos pantallas	88
Figura 90. Pérdidas por armaduras distintos pasos pantallas	89
Figura 91. Mitad paso hilos armadura (a)	89
Figura 92. Mitad paso hilos armadura (b)	89
Figura 93. Un tercio paso hilos armadura (a)	89
Figura 94. Un tercio paso hilos armadura (b)	90
Figura 95. Pérdidas por pantallas distintos pasos armadura	90
Figura 96. Pérdidas por armadura distintos pasos armadura	91
Figura 97. Mitad paso fase y pantalla (a)	91
Figura 98. Mitad paso fase y pantalla (b)	91
Figura 99. Mitad paso fase y pantalla (c)	91
Figura 100. Un tercio paso fase y pantalla (a)	91
Figura 101. Un tercio paso fase y pantalla (b)	92
Figura 102. Un tercio paso fase y pantalla (c)	92
Figura 103. Un cuarto paso fase y pantalla (a)	92
Figura 104. Un cuarto paso fase y pantalla (b)	92
Figura 105. Un cuarto paso fase y pantalla (c)	93
Figura 106. Pérdidas por pantallas distintos pasos pantallas	93
Figura 107. Pérdidas por armadura distintos pasos pantallas	94
Figura 108. Mitad paso hilos armadura (a)	94

Figura 109. Mitad paso hilos armadura (b)	94
Figura 110. Un tercio paso hilos armadura (a)	94
Figura 111. Un tercio paso hilos armadura (b)	95
Figura 112. Pérdidas por pantallas distintos pasos armadura	95
Figura 113. Pérdidas por armadura distintos pasos armadura	96
Figura 114. Pérdidas por pantallas con variación pasos pantallas	96
Figura 115. Pérdidas por armadura con variación pasos pantallas	97
Figura 116. Pérdidas por pantallas con variación pasos pantallas	97
Figura 117. Pérdidas por armadura con variación pasos pantallas	100
Figura 118. Pérdidas fases Modelo 1	100
Figura 119. Pérdidas pantallas Modelo 1	101
Figura 120. Pérdidas armadura Modelo 1	101
Figura 121. Pérdidas fases Modelo 2	101
Figura 122. Pérdidas pantallas Modelo 2	101
Figura 123. Pérdidas armadura Modelo 2	102
Figura 124. Pérdidas fases Modelo 3	102
Figura 125. Pérdidas pantallas Modelo 3	102
Figura 126. Pérdidas armadura Modelo 3	103
Figura 127. Pérdidas fases Modelo 4	103
Figura 128. Pérdidas pantallas Modelo 4	103
Figura 129. Pérdidas armadura Modelo 4	103
Figura 130. Pérdidas fases Modelo 5	103
Figura 131. Pérdidas pantallas Modelo 5	104
Figura 132. Pérdidas armadura Modelo 5	104
Figura 133. Pérdidas fases Modelo 6	104
Figura 134. Pérdidas pantallas Modelo 6	104
Figura 135. Pérdidas armadura Modelo 6	105
Figura 136. Pérdidas fases Modelo 1	105
Figura 137. Pérdidas pantallas Modelo 1	105
Figura 138. Pérdidas armadura Modelo 1	106
Figura 139. Pérdidas fases Modelo 2	106
Figura 140. Pérdidas pantallas Modelo 2	106
Figura 141. Pérdidas armadura Modelo 2	107
Figura 142. Pérdidas fases Modelo 3	107
Figura 143. Pérdidas pantallas Modelo 3	107
Figura 144. Pérdidas armadura Modelo 3	108
Figura 145. Pérdidas fases Modelo 4	108
Figura 146. Pérdidas pantallas Modelo 4	108

Figura 147. Pérdidas armadura Modelo 4	109
Figura 148. Pérdidas fases Modelo 5	109
Figura 149. Pérdidas pantallas Modelo 5	109
Figura 150. Pérdidas armadura Modelo 5	110
Figura 151. Pérdidas fases Modelo 6	110
Figura 152. Pérdidas pantallas Modelo 6	110
Figura 153. Pérdidas armadura Modelo 6	111
Figura 154. Pérdidas fases Modelo 1	111
Figura 155. Pérdidas pantallas Modelo 1	112
Figura 156. Pérdidas fases Modelo 2	112
Figura 157. Pérdidas pantallas Modelo 2	112
Figura 158. Pérdidas fases Modelo 3	112
Figura 159. Pérdidas pantallas Modelo 3	113
Figura 160. Pérdidas fases Modelo 4	113
Figura 161. Pérdidas pantallas Modelo 4	113
Figura 162. Pérdidas fases Modelo 5	113
Figura 163. Pérdidas pantallas Modelo 5	114
Figura 164. Pérdidas fases Modelo 6	114
Figura 165. Pérdidas pantallas Modelo 6	114
Figura 166. Pérdidas fases Modelo 1	114
Figura 167. Pérdidas pantallas Modelo 1	115
Figura 168. Pérdidas fases Modelo 2	115
Figura 169. Pérdidas pantallas Modelo 2	115
Figura 170. Pérdidas fases Modelo 3	115
Figura 171. Pérdidas pantallas Modelo 3	116
Figura 172. Pérdidas fases Modelo 4	116
Figura 173. Pérdidas pantallas Modelo 4	116
Figura 174. Pérdidas fases Modelo 5	116
Figura 175. Pérdidas pantallas Modelo 5	117
Figura 176. Pérdidas fases Modelo 6	117
Figura 177. Pérdidas pantallas Modelo 6	118
Figura 178. Pérdidas fases Modelo 1	118
Figura 179. Pérdidas pantallas Modelo 1	118
Figura 180. Pérdidas fases Modelo 3	118
Figura 181. Pérdidas pantallas Modelo 3	119
Figura 182. Pérdidas fases Modelo 4	119
Figura 183. Pérdidas pantallas Modelo 4	120
Figura 184. Pérdidas fases Modelo 1	120

Figura 185. Pérdidas pantallas Modelo 1	120
Figura 186. Pérdidas fases Modelo 3	120
Figura 187. Pérdidas pantallas Modelo 3	121
Figura 188. Pérdidas fases Modelo 4	121
Figura 189. Pérdidas pantallas Modelo 4	

Índice de Contenido

Resumen	7
Índice de Tablas	9
Índice de Ecuaciones	11
Índice de Figuras	13
Índice de Contenido	19
1 Estudios previos y objetivos	21
1.1. <i>Consideraciones previas</i>	21
1.2. <i>Formulación analítica. Normativa</i>	22
1.2.1 Cálculo analítico de lambda 1	23
1.2.2 Cálculo analítico de lambda 2	24
1.2.3 Problemática de la normativa	24
1.3. <i>Objetivos</i>	25
2 Introducción	27
2.1 <i>Evolución histórica</i>	27
3 Generalidades del cable submarino	31
3.1 <i>Composición del cable submarino</i>	31
3.2 <i>Clasificación del cable submarino</i>	33
3.3 <i>Conductores. Comparación de cobre y aluminio</i>	35
3.4 <i>Elaboración del cable submarino</i>	36
3.5 <i>Instalación del cable submarino</i>	36
3.6 <i>Ventajas e inconvenientes</i>	39
4 Modelado y simulación del cable submarino	41
4.1 <i>Programas de diseño</i>	41
4.1.1 COMSOL Multphysics	41
4.1.2 Solidworks	48
4.1.3 Matlab	49
4.2 <i>Caracterización de modelos 2D, 2.5D y 3D</i>	50
4.2.1 Modelos 2D	50
4.2.2 Modelo 2.5D	51
4.2.3 Modelo 3D	53
5 Estudio y valoración de pérdidas de potencia	55
5.1 <i>Presentación de modelos</i>	55
5.2 <i>Estudios previos</i>	59
5.2.1 Fases con hilos de cobre vs fases macizas	59
5.2.2 Lambda 1 por pantalla y fase vs lambda 1 para el conjunto de pantallas y fases	62
5.2.3 Problemática del modelo 3D	64
6 Cálculo analítico y de simulación de pérdidas de potencia de cables submarinos	67
6.1 <i>Resultados analíticos</i>	67

6.2	<i>Resultados de los modelos 2D</i>	67
6.2.1	Comparación simulación 2D vs analítico	70
6.3	<i>Resultados de los modelos 2.5D</i>	73
6.3.1	Comparación de simulaciones 2.5D vs 2D y analítico	74
6.4	<i>Resultados de los modelos 3D</i>	77
6.4.1	Comparación de simulación 3D vs 2D, 2.5D y analítico	79
7	Estudio paramétrico del cable submarino	83
7.1	<i>Modificación del paso de pantallas y armaduras en modelos 3D</i>	83
7.1.1	Paso de pantallas variables y paso de armadura constante en el mismo sentido	83
7.1.2	Paso de pantallas constante y paso de armadura variable en el mismo sentido	87
7.1.3	Paso de pantallas variable y paso de armadura constante en sentido opuesto	89
7.1.4	Paso de pantallas constante y paso de armadura variable en sentido opuesto	93
7.1.5	Conclusión	95
7.2	<i>Variación de parámetros físicos del cable en modelos 2D</i>	97
7.2.1	Variación del diámetro de los hilos de la armadura	99
7.2.2	Variación de delta, separación entre hilos de la armadura	104
7.2.3	Conclusión	109
7.3	<i>Variación de parámetros físicos del cable en modelos 2.5D</i>	110
7.3.1	Variación del diámetro de los hilos de la armadura	110
7.3.2	Variación de delta, separación entre hilos de la armadura	113
7.3.3	Conclusión	116
7.4	<i>Variación de parámetros físicos del cable en modelos 3D</i>	116
7.4.1	Variación del diámetro de los hilos de la armadura	116
7.4.2	Variación de delta, separación entre hilos de la armadura	118
7.4.3	Conclusión	120
8	Conclusiones	121
	Referencias	123

1 ESTUDIOS PREVIOS Y OBJETIVOS

Del análisis realizado sobre diversos documentos que estudiaron las pérdidas de potencia en los distintos componentes del cable submarino (fases, pantallas y armaduras), se observa la existencia de cierta incertidumbre en los resultados obtenidos. Además, estos estudios muestran la existencia de una diferencia de dichas pérdidas al ser calculadas de forma analítica y mediante simulaciones computacionales.

Fruto de esta valoración, nace el estudio que se presenta, el cual tiene como principal objetivo valorar esta diferencia de pérdidas existentes según el procedimiento de cálculo, conocer el porqué de este hecho y establecer el modelo óptimo de diseño del cable submarino de forma que las pérdidas de potencia producidas en sus componentes sean las mínimas posibles.

1.1. Consideraciones previas

Existen diversas publicaciones que tratan la problemática producida por la variación de potencia ocasionada a consecuencia de calcular las pérdidas de forma analítica y mediante simulaciones computacionales. Éstas, ponen en duda el procedimiento de diseño de cables submarinos que procede actualmente desde el punto de vista de las pérdidas y señalan que se están desarrollando cables sobredimensionados a causa de este hecho.

En estas publicaciones, se observan cables modelados de forma bidimensional y cables tridimensionales.

El modelo 2D presenta la característica fundamental de que al ser bidimensional, no representa el trenzado de fases, pantallas y armaduras. A consecuencia de ello, el campo magnético generado por las fases induce unas corrientes longitudinales por los hilos de la armadura.

Por su parte, el modelo 3D tiene en cuenta el trenzado del cable, y por consiguiente, apenas existe circulación de corriente longitudinal por los hilos. La variación del campo magnético según el paso del trenzado induce la circulación de corrientes parásitas que originan las pérdidas de potencia en la armadura.

Debido a la complejidad computacional de estos modelos tridimensionales, algunas de estas publicaciones establecen un nuevo escenario de simulación. Éste trata de llevar al modelo bidimensional las características más importantes del modelo 3D. Con ello, este nuevo modelo, definido como modelo 2.5D, se genera como un modelo bidimensional pero forzando a que la circulación de corriente longitudinal por cada hilo de la armadura sea cero. Fruto de ello, se obtiene un modelo 2D que persigue obtener unos resultados similares a los que se obtienen en modelos tridimensionales, pero con un ahorro computacional relevante.

A su vez, en estas publicaciones y de igual manera que en la normativa seguida para la formulación analítica, el procedimiento de análisis de dichas pérdidas se establece mediante dos ratios. El primero de ellos, denominado lambda 1 (λ_1), relaciona las pérdidas en las pantallas y en las fases y el segundo de ellos, lambda 2 (λ_2), hace lo propio con las pérdidas en la armadura y en las fases.

De las publicaciones comentadas anteriormente se observan los siguientes resultados:

➤ Documento 1^[14]

Modelo	λ_1	λ_2
2D	0,3300	0,3500
3D	0,4800	0,1300
Analítico	0,4900	0,5400

Tabla 1. λ_1 y λ_2 para [14]

➤ Documento 2^[10]

Modelo	λ_1	λ_2
2.5D Modelo 1	0,3400	0,1200
2.5D Modelo 2	0,3200	0,0300
2.5D Modelo 3	0,3100	0,0450
2.5D Modelo 4	0,3000	0,0100
Analítico	0,2900	0,4500

Tabla 2. λ_1 y λ_2 para [10]

➤ Documento 3^[12]

Modelo	100 hilos		51 hilos	
	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
2.5D	0,3025	0,0281	0,2898	0,0023
Analítico	0,0000	2,0729	0,0000	1,8917

Tabla 3. λ_1 y λ_2 para [12]

Cabe destacar la inexistencia de información suficiente en estas publicaciones acerca de las dimensiones y propiedades de los modelos estudiados, lo cual imposibilita la posibilidad de corroborar, durante este estudio, los resultados presentados. No obstante, estos resultados ponen de manifiesto lo anteriormente expuesto. Se observa que los valores de λ_1 y λ_2 obtenidos mediante simulaciones y analíticamente, presentan en mayor o menor medida diferencias considerables en cuanto a la magnitud.

A su vez, otra publicación importante [15] defienden la capacidad que tienen los modelos 2.5D de representar al modelo 3D en cuanto a los valores de pérdidas se refiere. Por ello, dichos documentos señalan que los resultados que se obtienen de los modelos 3D están mucho más cerca de los modelos 2.5D que de los modelos 2D.

Uno de los objetivos principales de este estudio es corroborar la información anterior.

1.2. Formulación analítica. Normativa

En el epígrafe anterior, se establece una comparación de los valores de pérdidas de potencia según el procedimiento de cálculo. Tal y como se ha comentado, uno de estos procedimientos consiste en el cálculo analítico. Todas estas publicaciones comentadas y el estudio en desarrollo se realizan en base a la IEC 60287-1-1.

Con ello, para calcular analíticamente las pérdidas de potencia en un cable submarino se procede según establece la IEC 60287-1-1, que se corresponde con la UNE 21144-1-1. Según esta norma, y tal y como ha sido comentado en el epígrafe anterior, existe un coeficiente denominado *lambda 1* (λ_1), el cual relaciona las pérdidas generadas en las pantallas de los conductores y las propias pérdidas generadas en las fases. A su vez, define también un coeficiente *lambda 2* (λ_2), cuya relación proviene del cociente entre las pérdidas en los hilos de la armadura del cable y las pérdidas de las propias fases.

1.2.1 Cálculo analítico de lambda 1

La relación entre la pérdidas de potencias en la pantallas y fases consta de las pérdidas causadas por la corriente que circula (λ'_1) y las corrientes de Foucault (λ''_1)

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 = \frac{\text{Pérdidas de potencia en las pantallas}}{\text{Pérdidas de potencia en las fases}} \quad (1)$$

Para un cable trifásico donde cada fase tiene una pantalla de plomo separada, las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault se consideran nulas, $\lambda''_1 = 0$, y, por tanto, las pérdidas de potencia en las pantallas dependen únicamente de λ'_1 .

En los cables en los cuales cada fase tiene su propia pantalla de plomo, el valor de λ'_1 procede a calcularse de la siguiente forma:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} * \frac{1.5}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (2)$$

Donde:

- R_s es la resistencia en A.C. de la pantalla del cable submarino a la máxima temperatura de funcionamiento (Ω/m).
- R es la resistencia en A.C. de la fase del conductor del cable submarino a la máxima temperatura de funcionamiento (Ω/m).
- X es la reactancia de la pantalla, (Ω/m), definida como procede:

$$X = 2 * \omega * 10^{-7} * \ln \left(\frac{2*s}{d}\right) \quad (3)$$

- s es la distancia entre ejes de conductores (mm).
- D es el diámetro medio de la pantalla (mm)
- ω es la frecuencia angular

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (4)$$

- f es la frecuencia, 50 Hz.

Con ello, el cálculo de λ_1 es el siguiente:

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} * \frac{1.5}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (5)$$

1.2.2 Cálculo analítico de lambda 2

λ_2 es un parámetro que relaciona las pérdidas de potencia en los hilos de la armadura de un cable submarino frente a las pérdidas originadas en las fases. La IEC 60287-1-1 recoge que este ratio se obtiene como sigue:

$$\lambda_2 = 1.23 * \frac{R_A}{R} * \left(\frac{2*c}{d_A}\right)^2 * \frac{1}{\left(\frac{2.77*R_A*10^6}{\omega}\right)^2+1} * \left(1 - \frac{R}{R_s} * \lambda_1\right) \quad (6)$$

Donde:

- R_A es la resistencia en A.C. de la armadura del cable submarino a la máxima temperatura de funcionamiento (Ω/m).
- R es la resistencia en A.C. de la fase del conductor del cable submarino a la máxima temperatura de funcionamiento (Ω/m).
- c es la distancia entre el eje del cable y el eje del conductor (mm).
- d_A es el diámetro medio de la armadura (mm).
- f es la frecuencia, 50 Hz.
- λ_1 es la relación entre las pérdidas de potencia en las pantallas y en las fases, definida previamente.

1.2.3 Problemática de la normativa

La normativa anteriormente expuesta que permite el cálculo de los valores de λ_1 y λ_2 puede ser objeto de análisis.

Por un lado, las expresiones mostradas no consideran las pérdidas por corrientes de Foucault y, por tanto, las pérdidas en las pantallas son exclusivamente las de la corriente circulante. Además, puede observarse que la expresión que permite el cálculo de λ_1 (5) puede dar resultados absurdos. Dado que la resistividad del plomo es mayor que la del cobre, cuando $R_s < 0.7X$, las corrientes en las pantallas se suponen que son más grandes que las corrientes de los conductores. Este problema surge porque el factor de 1,5 es arbitrario y se ha introducido para compensar el uso de suposiciones “incorrectas”. También es importante tener en cuenta que esta ecuación no incluye la reactancia adicional debido a la presencia de la armadura.

Por otro lado, se observa de las publicaciones analizadas que la fórmula que permite el cálculo de λ_2 (6) es demasiado alta. Además, el último término de esta ecuación puede convertirse en negativo debido al problema citado de (1) en el párrafo anterior. Además, la forma de la ecuación sugiere que el trenzado de la armadura no se ha tenido en cuenta.

Por todos estos motivos, se considera que la IEC 60287-1-1 proporciona una formulación cuyos resultados no deben ser muy representativos de la realidad. Por ello, las simulaciones realizadas en este estudio permitirán sacar conclusiones acerca del grado de validez de dicha norma.

1.3. Objetivos

En base a la documentación referente y las consideraciones anteriormente presentadas, y dado que no se dispone de la información técnica necesaria para constituir el diseño computacional de los cables mencionados en las publicaciones de origen y poder comparar sus pérdidas con las obtenidas de forma teórica, el objetivo principal de este estudio se basa en la determinación de unos modelos de cables submarinos tipos de partidas, de los que se dispongan la información necesaria para poder generar sus modelos. Una vez caracterizados estos modelos, se procede a obtener sus valores analíticos de relación de pérdidas de potencia (λ_1 y λ_2) según la normativa presentada y mediante unos pequeños programas diseñados previamente en Matlab Simulink. Posteriormente, estos resultados teóricos deben ser comparados con los obtenidos mediante simulaciones. Para ello, se emplea la herramienta Comsol Multiphysics, descrita en los epígrafes posteriores, y caracterizada por el método de elementos finitos. Esta herramienta, con el apoyo de SolidWorks, permitirá modelar cables submarinos en 2D y 3D. También será posible modelar los ya presentados como modelos 2.5D.

Con todo ello, la finalidad que se persigue es comparar estos resultados con los conocidos de las publicaciones presentadas, observar en los nuevos modelos lo recogido en estos estudios previos [15] de que las simulaciones 2.5D y 3D den resultados similares y analizar los distintos parámetros que componen el cable submarino para intentar optimizar su modelado desde el punto de vista de la reducción de sus pérdidas de potencia.

2 INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, el transporte de corriente eléctrica ha sido realizado a través de medios aéreos y subterráneos, lo cual permitía, a través de sus continuos avances, una buena comunicación eléctrica entre puntos o zonas geográficas separadas por zonas marinas. Por tanto, se puede decir, que no existía una comunicación eléctrica a nivel mundial.

Fue en 1954 cuando empezó a desarrollarse un método que permitía la conexión eléctrica submarina, lo cual supondría un importante avance en el transporte y consumo de la corriente, acabando con problemas como la obligatoria autogeneración de electricidad en islas y el aprovechamiento de la corriente generada en parques eólicos marinos, entre otros.

Anteriormente a estas fechas, ya existían cables submarinos pero eran dedicados exclusivamente a la telecomunicación.

2.1 Evolución histórica

Los orígenes del cable submarino de transporte de corriente datan de 1954, fecha en la cual fue construido el primer cable. Éste servía de conexión entre la isla de Gotland y Suecia. Su longitud era de 100 kilómetros y tenía una potencia de 20 MW a una tensión de 100 kV.

En 1972 tuvo lugar la construcción de un nuevo cable con una potencia de 320 MW y 160 kV. Esta instalación supuso un hito muy importante dado que se produjo la sustitución de las válvulas de mercurio por tiristores.

Hasta el año 2000 la tecnología de los enlaces HVDC utilizaba exclusivamente convertidores conmutados por red con tiristores. A partir de esta fecha el desarrollo de los dispositivos electrónicos de conmutación de alta potencia (IGBT, GTO, etc.) permitió el nacimiento de una nueva tecnología, el HVDC con convertidores autoconmutados. Actualmente conviven las dos tecnologías.

En la actualidad hay varias decenas de enlaces en el mundo entre los que destacan el proyecto NorNed, el cual es el cable submarino más largo del mundo y se encuentra entre Noruega y Holanda. Cuenta con una longitud de 580 kilómetros, tiene una capacidad de 700 MW a ± 450 kV. Otro proyecto importante es el conocido como SAPEI, el cual es el más profundo del mundo, a 1650 metros, y va desde la península italiana hasta Cerdeña y son dos cables con una capacidad de 500 MW a ± 500 kV.



Figura 1. Proyecto NorNed

En España, en 1997 se comenzó a instalar un cable submarino entre Tarifa y Marruecos, el cual comenzó a operar un año después. Tenía una capacidad de 450 MW. Posteriormente, un segundo circuito, que contaba con un presupuesto de 115 millones de euros, comenzó a operar en 2006. Con esto se consiguió un aumento de la capacidad de intercambio hasta los 900 MW y fue financiado a partes iguales entre las empresas distribuidoras eléctricas de España (REE) y Marruecos (ONE). Ambos circuitos discurren en paralelo a una distancia de unos 500 metros y a una profundidad máxima de 620 metros. El primer circuito mide 26 kilómetros submarinos mientras que el segundo alcanza los 29 kilómetros submarinos y poco más de dos kilómetros subterráneos a cada lado del Estrecho.



Figura 2. Cable submarino España-Marruecos

Otro de los cables importantes situados en la península ibérica es el que une la propia península con Baleares, el denominado proyecto Rómulo. Éste es una conexión bipolar de 250 kV a corriente continua. Su tendido comenzó en enero de 2011 comenzando a operar a finales de ese mismo año. Conectó Sagunto con Calviá y permitió realizar intercambios de hasta 400 MW lo que permitió incluir a las islas Baleares en el sistema eléctrico peninsular. La longitud del tramo submarino es de 237 kilómetros (a los que hay que añadir 7 kilómetros en tierra firme). El coste completo fue de 375 millones de euros y alcanza una profundidad máxima de 1485 metros.



Figura 3. Proyecto Rómulo

También se pueden encontrar algunas conexiones en HVAC, para tramos más cortos como por ejemplo Mallorca – Menorca, la cual cuenta con un cable a 132 kV o Ibiza – Formentera que cuenta con dos cables,

uno a 10 kV y otro a 20 kV. El primero se instaló en 1972 y tiene una capacidad de 9 MW, mientras que el segundo se instaló en 1980 y tiene una potencia de 18 MW, aunque ambos están previsto que dejen de prestar servicio en un futuro inmediato para que comiencen a prestar servicios dos nuevos cables. Otro ejemplo es la conexión entre Lanzarote con Fuerteventura, la cual cuenta con un cable a 33 kV y otro a 66 kV. El primero data de 1977 y se acerca al final de su vida útil mientras que el segundo, que entró en servicio en 2005 tiene una longitud de 14.5 kilómetros, costó unos 12 millones de euros y supone triplicar la capacidad del cable preexistente. Además, está planificada su repotenciación a 132 kV.

Aparte de los citados cables, hay otros que están en proyecto de construcción, tal como el ya conocido como proyecto Rómulo 2, que serán dos cables a 132 kV (HVAC) que unirán Mallorca con Ibiza con capacidad para 200 MW. Está previsto que sea la interconexión eléctrica submarina a corriente alterna más larga (118 kilómetros) y más profunda (800 metros) del mundo. Otro de los proyectos en desarrollo es el cable que una Ibiza con Formentera, a 66 kV (HVAC) con capacidad para 50 MW. Sustituirán a los actuales cables que datan de la década de los 70 y tienen una capacidad de 27 MW. Esta nueva interconexión tendrá un trazado de 23 kilómetros submarinos y 9 kilómetros terrestres, y un coste de 78 millones de euros.

En la actualidad hay multitud de proyectos de creación y expansión de cables submarinos, convirtiéndose de esta forma, en un tema con capacidad de amplios estudios.

3 GENERALIDADES DEL CABLE SUBMARINO

Un cable eléctrico submarino es aquel capaz de transportar la corriente entre dos puntos geométricos terrestres a través de un medio marino, o aquel capaz de hacer llegar la corriente desde los parques eólicos marinos a la superficie terrestre para su posterior uso.



Figura 4. Cable submarino

3.1 Composición del cable submarino

Su constitución es similar a la de un cable subterráneo y su composición depende del fabricante siendo generalmente:

- Conductor: los conductores portadores de corriente de los cables eléctricos submarinos son de cobre. A pesar de que el cobre es más caro que el aluminio en relación a la capacidad conductora de corriente, los conductores están fabricados en cobre, puesto que éste permite una sección transversal más pequeña y por lo tanto requiere menos material para las capas externas, tales como plomo y cables de acero.
- Capa semiconductor interna: evita huecos entre el cable y el aislamiento con intensos campos eléctricos.
- Aislamiento: el aislamiento del cable proporciona una barrera eficaz entre las superficies potenciales con una diferencia de potencial extrema. Es de suma importancia que el aislamiento sea absolutamente limpio y uniforme. Además, la pared del aislamiento debe ser mecánicamente robusta y resistente a la temperatura y al envejecimiento. Dicho aislamiento está realizado con los mismos materiales que los aislamientos de cables subterráneos, si bien es cierto que las condiciones de producción y aplicación pueden ser diferentes.

Los tipos de aislamiento más empleados son los siguientes:

- Polietileno reticulado (XLPE): este tipo de aislamiento fue desarrollado a partir del polietileno (PE) debido a la limitación de la temperatura del conductor de estos cables. Así, el XLPE se sitúa a una temperatura de 90°C y una temperatura de cortocircuito por encima de 200°C. Con respecto a sus propiedades conviene señalar algunas de ellas:
 - Absorbente para el agua.
 - Rigidez mecánica.

- Menor peso.
 - Etileno propileno (EPR): es un tipo de aislamiento menos utilizado que el anterior ya que es menos adecuado para alta tensión. Sus propiedades son las siguientes:
 - Resistencia a la humedad.
 - Estructura elástica como la goma.
 - Resistencia a las descargas parciales.
 - En la actualidad se están considerando unos sistemas de aislamiento que emplean nanosistemas, en los cuales el aislante está enriquecido con nanopartículas inorgánicas. Aunque algunas de sus propiedades deben mejorarse y demostrar su validez en aplicaciones subterráneas antes de su despliegue en el campo de los cables submarinos.
 - Otro modelo de aislamiento que ya ha sido instalado en cables subterráneos consiste en utilizar gas de aislamiento a una determinada presión, tales como SF₆, nitrógeno o una mezcla de ambos. Sin embargo, queda por ver si este tipo de aislamiento puede ser instalado y operado con total seguridad en el medio submarino puesto que requeriría una extrema limpieza del dominio.
- Capa semiconductor externa: con una función similar a la capa semiconductor interna.
 - Pantalla: actualmente las pantallas son hechas de plomo y sirven para confinar el campo magnético en el interior del cable así como para conseguir una distribución radial del campo eléctrico.
 - Armadura: es el elemento constructivo más destacado de los cables submarinos, debido al blindaje y protección mecánica que proporciona. Para cada proyecto de cable submarino la armadura debe ser diseñada con respecto a requisitos que dependen de los riesgos de amenazas externas en cada sector de la ruta del cable. El blindaje debe proporcionar también suficiente protección mecánica contra la agresión externa esperada por las herramientas de la instalación, artes de pesca y las anclas.
 - Protectores frente a la corrosión: la corrosión se debe considerar seriamente en el diseño de estos cables. Ésta es producida por los impactos de agua contra el cable. La protección primaria frente a la corrosión de los hilos de acero es una capa de cinc de 50 micras aproximadamente. Una segunda protección es el lavado de la armadura con betún caliente durante la fabricación. Aunque la protección más empleada es el uso de una cubierta de algún elemento polimérico, ya que es una técnica más fiable.

Existen diferentes modelos de cables submarinos según el fabricante del cual proceda. Las principales diferencias entre ellos radican en los tipos y formas de aislantes utilizados. Un tipo común de cable submarino es el siguiente:

1. Conductor
2. Semiconductor interno
3. Aislamiento
4. Semiconductor externo
5. Pantalla
6. Relleno de propileno
7. Cinta aislante
8. Capa de propileno
9. Armadura
10. Protectores frente a corrosión



Figura 5. Arquitectura del cable submarino

3.2 Clasificación del cable submarino

Los cables submarinos pueden clasificarse según varios factores:

- Según la tensión a la que estén sometidos:
 - Cables de media tensión (MV, Medium Voltage): por cables de media tensión se entienden los cables con tensiones de entre 1kV y 35kV.
 - Cables de alta tensión (HV, High Voltage): por su parte, al hablar de cables de alta tensión, se trata de cables con una tensión superior a los 35kV.

Los primeros están constituidos por el conductor, una pantalla de hilos de cobre, sus correspondientes aislantes y la armadura de hilos de acero, la cual contiene un número de hilos mucho mayor a la pantalla de cobre.

Por su parte, los cables de alta tensión, los cuales son cables similares al de media tensión en lo que se refiere a constitución, con la principal diferencia de que estos cables, en su modelo general, no cuentan con una pantalla de hilos de cobre sobre los conductores. En su lugar llevan una pantalla cilíndrica de plomo. Esto es así porque la pantalla de plomo es más segura y más fiable ya que es un elemento que bloquea completamente el paso del agua. En los cables de media tensión, utilizar pantallas de plomo podría resultar relativamente caro por lo que se prefiere utilizar la pantalla clásica de cobre, elemento muy resistente a los fenómenos de fatiga, y combatir el agua de otra manera, como por ejemplo con materiales absorbentes.

- Según el número de conductores:
 - Unipolar: compuesto por una única fase.
 - Tripolar: compuesto por tres fases desfasadas entre ellas 120°, trenzadas entre sí.
- Según el sistema:
 - Sistemas HVDC.
 - Sistemas HVAC.

Una de las condiciones previas a analizar es si se va a transportar la energía en corriente alterna o corriente continua. Esta decisión depende de múltiples factores, entre ellos, los más determinantes son la potencia que se va a transmitir y la distancia hasta la costa o punto de conexión más cercano.

El transporte en corriente continua, HVDC, posee como característica principal el desacople en tensión y

frecuencia del sistema de generación y de la red o instalación en tierra. Estos componentes tienen el inconveniente de que influyen en el coste total de la inversión y en la fiabilidad del sistema.

En cambio, en una transmisión en corriente alterna, HVAC, la capacidad de transporte en los cables AC de generación se encuentran limitadas. El principal motivo se debe a la distancia a transportar, la cual determinará la potencia reactiva que será requerida por el cable. Esto es debido a que en el sistema HVAC aparece una corriente capacitiva provocada por el comportamiento como condensador que sufre el material aislante del cable al transportar tal energía. Este efecto es más acusado en cables de gran longitud, donde gran parte de la capacidad de transporte que posee es consumida por esta corriente capacitiva (o corriente reactiva), y que por tanto se pierde para la transmisión de la potencia activa que es requerida por la red en tierra. Por otro lado, dicha corriente capacitiva induce a su vez pérdidas en el sistema por un calentamiento del cable, lo que hace disminuir aún más la eficiencia del sistema.

Gráficamente se puede observar cuando conviene utilizar AC y cuando DC:

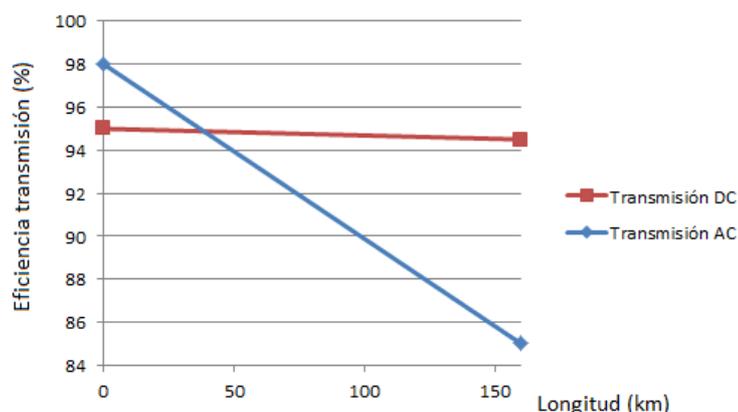


Figura 6. Comparación de eficiencia AC/DC

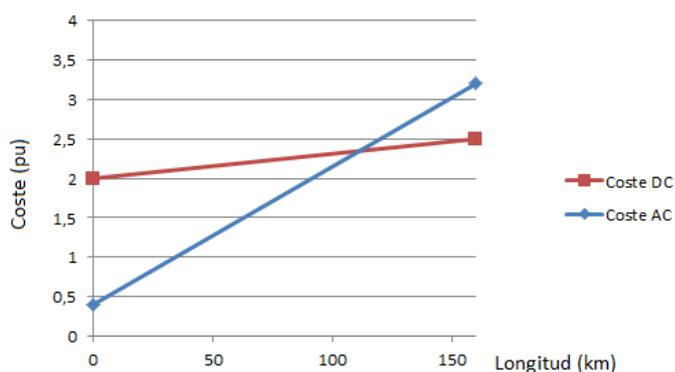


Figura 7. Comparación de coste AC/DC

Como se observa en las figuras 6 y 7, es más eficiente utilizar AC hasta distancias de unos 50 kilómetros ya que resulta más eficiente y más económica. Por el contrario, hasta los 110 kilómetros, sigue resultando más económico AC pero no más eficiente y para distancias mayores es totalmente conveniente utilizar DC.

3.3 Conductores. Comparación de cobre y aluminio

Los cables submarinos utilizan únicamente cobre como elemento conductor. Los datos del cobre son los siguientes:

- Densidad (d) : $8960 \frac{kg}{m^3}$
- Resistividad (ρ) : $0.0172 \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

Por su parte, los datos del aluminio son los siguientes:

- Densidad (d) : $2698.4 \frac{kg}{m^3}$
- Resistividad (ρ) : $0.0282 \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

Si suponemos 1 m. de cable de cobre con una sección de 10 mm^2 , podemos calcular su resistencia:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 1.71 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (7)$$

Calculamos el peso:

$$P = d \cdot L \cdot S = 89.6 \text{ gramos.} \quad (8)$$

Para conseguir una resistencia equivalente al cobre con aluminio, para la misma distancia, es necesaria la siguiente sección del cable:

$$S = \rho \cdot \frac{L}{R} = 16.5 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Y en este caso el peso será:

$$P = d \cdot L \cdot S = 44.52 \text{ gramos.} \quad (10)$$

De estos resultados se puede observar que el cobre permite tener una sección más pequeña que un cable de aluminio (se necesita menos material para posteriores capas, tal como aislantes, plomos, etc.), pero el aluminio es más barato y tiene un peso menor.

A pesar de ello, hay un factor fundamental para que los cables submarinos sean de cobre. Y es la rigidez del cable. Un cable de cobre es menos rígido que uno de aluminio. Por tanto, en un cable de aluminio, cualquier esfuerzo mecánico que se ejerza sobre el cable podrá deformarlo, afectando así a su sección.

Además, al ser el cobre un elemento más dúctil, se puede trefilar más fácilmente en hilos, con lo que es más fácil su almacenamiento en espiras y su posterior instalación.

También es conocido, que al ser los cables submarinos enteros, es decir, no contienen empalmes como si puede ocurrir en cables subterráneos, el esfuerzo a aplicar debe ser mayor y por tanto, resulta más conveniente utilizar cobre, elemento con mayor resistencia mecánica que el aluminio.

3.4 Elaboración del cable submarino

En la elaboración del modelo de un cable submarino hay que tener en cuenta diversos factores como:

- Estudio detallado del trazado y fondo: el fondo marino no es una superficie regular ya que hay diversas zonas que presentan unas condiciones determinadas que dificultan el cómodo asentamiento del cable.
- Esfuerzos durante la instalación: hay que considerar que estos cables tienen un peso importante por lo que se necesita una maquinaria adecuada para su instalación, así como evitar golpes y otros efectos que puedan dañar al propio cable.
- Aislamiento: junto con la armadura, es uno de los elementos más importantes del cable puesto que ambos tratan de evitar que se violen las propiedades y efectos para los cuales estos cables son creados.
- Métodos de protección: ya que existe riesgo de daño por pesca, por el arrastre y fondeos.

3.5 Instalación del cable submarino

Para la instalación de un cable submarino es imprescindible disponer de un barco cablero. Éste es un buque especializado en la colocación del tendido y reparación de cables de comunicación submarinos o de energía eléctrica. Suelen llevar tripulaciones de alta formación (técnicos especialistas en tendido de cables y los encargados de la navegación). No es un barco excesivamente rápido, pero sí de gran potencia, ya que está pensado principalmente para el transporte de algunos cientos de toneladas de cable.



Figura 8. Cable en el barco cablero

Antes de proceder a la instalación del cable hay que realizar un trazado óptimo. Para seleccionar dicho trazado se comienza con un estudio de cartas de navegación, y batimétricas, leyes y reglamentos de la zona que se van a atravesar, actividades humanas (pesca, zonas petrolíferas y prospecciones) y perspectivas sísmicas.

A continuación, los puntos de amarre se seleccionan en función de la red terrestre y del entorno costero. Una vez elegido el tramo preliminar, comenzará una misión de sondeo por medio de un barco oceanográfico. Se suele estudiar un pasillo de diez kilómetros de anchura para poder detallar la batimetría con menos de un metro de error. En aquellas zonas donde se prevé que puedan hacerse zanjas, se hacen calas para determinar la naturaleza y dureza del suelo. Con esas informaciones se determina el trazado definitivo, el tipo de cable a emplear y las longitudes precisas. También hay que tener en cuenta las particularidades de los fondos marinos y del tipo de cable para calcular el exceso u holgura de cable que conviene.

La operación de embarque consiste en cargar el cable y los repetidores (dispositivo electrónico que recibe una señal débil o de bajo nivel y la retransmite a una potencia o nivel más alto, de tal modo que se puedan cubrir

distancias más largas sin degradación o con una degradación tolerable) en el barco. Se hace un plan de reparto de cargas en el barco, sobre todo basándose en la secuencia de trabajos, sentido de la colocación y orden de operaciones. El cable se estiba en las bodegas del barco y los repetidores se guardan en lugares climatizados. Al terminar el embarque y los empalmes, se verifica la calidad de estos mediante técnicas ecométricas y reflectométricas, para verificar la conformidad del sistema antes de hundirlo.



Figura 9. Máquina lineal de instalación

Inicialmente el barco se sitúa en el trazado deseado lo más próximo a la costa posible. Se remolca el cable a la playa sosteniéndolo mediante boyas, allí se amarra y conecta a la red terrestre. Fala por librar las boyas para que el cable se deposite en el fondo.

En las zonas sensibles, cuando la naturaleza del terreno lo permita, el cable se coloca en zanjas de 80 centímetros, a una profundidad entre 20 y 1500 metros. Para ello el barco cablero remolca una especie de arado que hace un surco. El cable se desenrolla desde el mismo barco, pasa por el arado y se deposita en la zanja.

En lo que se refiere a fuera de las zonas costeras, la técnica clásica de colocación “a fondo” se basa en una máquina que lleva el barco cablero. Ella extrae el cable de las bodegas, controla su longitud en función de la velocidad del barco y le da el exceso de longitud u holgura precisa para que se acople bien al fondo, sin tensiones.

A continuación se observan varias imágenes sobre cómo procede este proceso.

1. Se realiza el empalme del cable del barco con el cable subterráneo.

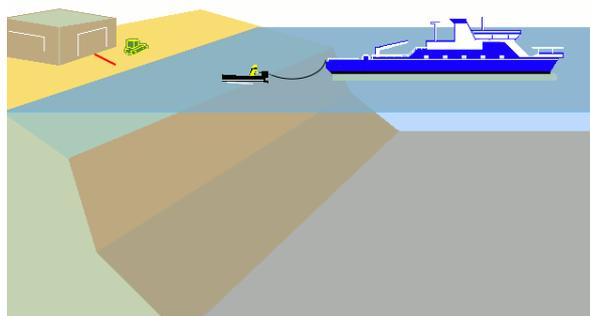


Figura 10. Instalación del cable

2. Se incorpora el cable submarino a la superficie marina apoyado en boyas.

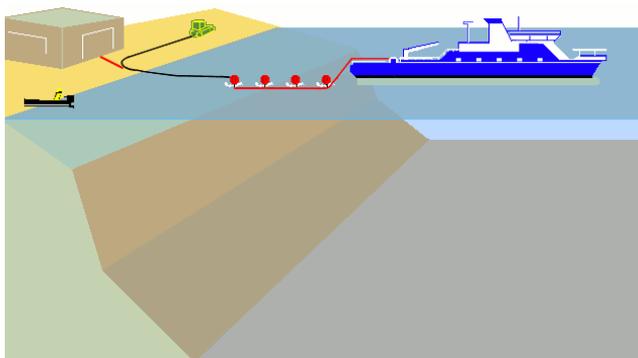


Figura 11. Instalación del cable

3. El barco cablero comienza a alejarse de la costa y el cable comienza a descender al ir quitando las boyas.

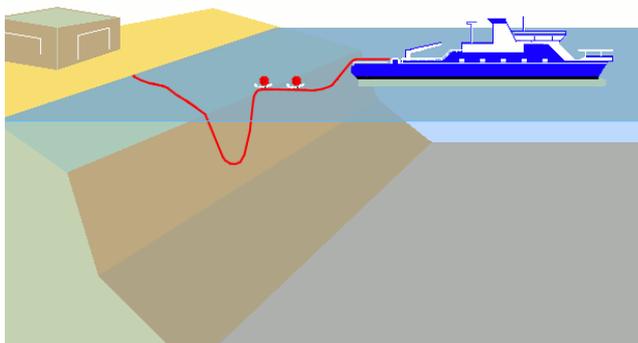


Figura 12. Instalación del cable

4. Se introduce la máquina que va haciendo el surco a la vez que el cable se va enterrando.

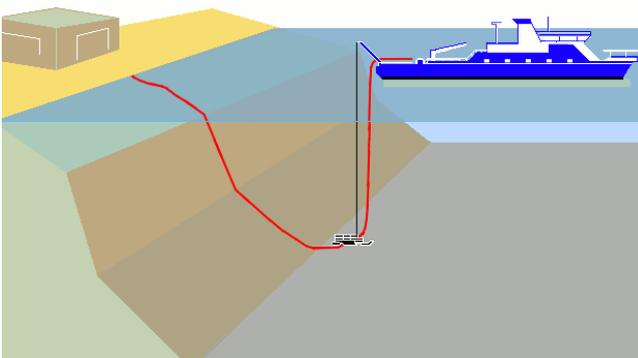


Figura 13. Instalación del cable

5. El cable submarino va quedando depositado en el fondo marino.

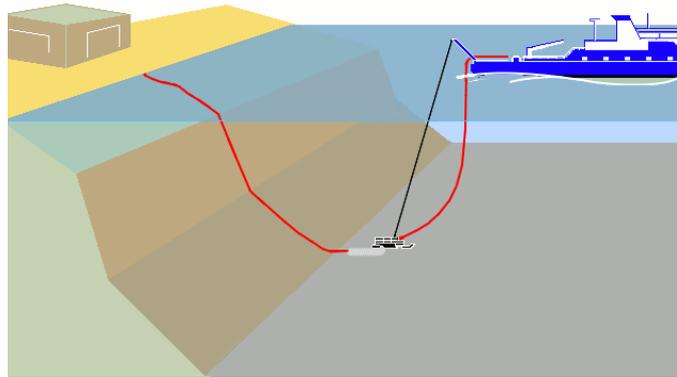


Figura 14. Instalación del cable

Estos cables submarinos, como cualquier cable, están expuestos a averías y problemas. Pueden averiarse por diversas causas: enganches con redes de pesca, con las anclas de barcos, debido a avalanchas submarinas, por movimientos sísmicos y otras razones.

Los fallos se detectan a través de sistemas de gestión de los cables submarinos. En ese momento, los barcos cableros que se encuentren en las mediaciones, se acercan a la posición exacta del cable cortado o con imperfecciones. El momento de arreglarlo pasa por las siguientes fases:

- Cortar el cable: necesitan izarlo al barco y para ello tienen que cortarlo. Esta acción lo hace un barco específico conocido como draga de corte.
- A continuación es preciso capturar el cable cortado para subirlo al barco. La draga de captura consigue sacarlo. Es necesario recoger los dos extremos para, una vez arreglado, unirlos de nuevo mediante un empalme.
- Una vez dentro del barco, se inspecciona el cable, se arreglan las partes afectadas o bien se sustituyen para posteriormente unir los dos extremos.
- Una vez finalizado este proceso queda volver a sumergir los cables submarinos. Esta operación se puede realizar mediante un vehículo operado remotamente que guía durante todo el proceso de inmersión.
- Una vez sumergido, el cable vuelve a operar con normalidad.

Pero todo este proceso no es sencillo. Arreglar un corte puede llevar entre cinco y quince días, a lo que hay que añadirle el tiempo de desplazamiento de los barcos hasta la zona del fallo. Además de esto, hay diversos factores que acortan o alargan el tiempo, como la profundidad, el tipo de cable o el origen del problema.

3.6 Ventajas e inconvenientes

Actualmente solo existen unas diez fábricas en todo el mundo capaces de fabricar estos cables. Además hay un número muy reducido de barcos para la instalación. Hasta el momento sólo se cuenta con dos barcos para enlaces profundos. Todo esto implica que hay una capacidad de fabricación y de transporte por el medio marino limitada.

Las principales aplicaciones para las cuales estos cables han sido creados son las siguientes:

- Enlaces eléctricos interinsulares o al continente.
- Fuentes de alimentación a islas.

- Interconexiones internacionales.
- Evacuación de la energía de parques eólicos marinos.

Estas aplicaciones de los cables traen consigo una serie de ventajas, ya que permiten por ejemplo que islas y archipiélagos no necesiten autoabastecerse, pudiendo alimentarse de la energía eléctrica generada en la zona terrestre próxima, lo cual permite incrementar la competencia en el mercado de generación de las islas, con la consiguiente mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad del sistema eléctrico de la isla. También puede traer consigo un beneficio económico debido a una reducción de costes de generación.

Por otro lado, se está consiguiendo una expansión del mercado eléctrico a nivel mundial que puede dar lugar a una relación eléctrica universal. Es destacable también, una de las principales ventajas de estos cables, los cuales sirven de nexo entre los parques eólicos marinos y los cables subterráneos que llevan la energía a una determinada subestación.

Otra de las ventajas que pueden presentar estos cables es que no tienen el impacto visual que tienen las líneas aéreas en la naturaleza. Estos cables, al ser submarinos, no se aprecian, por lo que no dan problemas de índole estético.

Pero no todo son ventajas en el empleo de estos cables, ya que pueden provocar algunos inconvenientes como su elevado coste de ejecución y mantenimiento, sobre todo si se compara con las líneas aéreas (si bien es cierto que estos cables constan de una elevada fiabilidad). Aparte del mantenimiento, sus dificultades también son notables en la gestión y localización de averías. Además, cuenta con un gran consumo de materiales, tales como aislantes, protectores, etc.

4 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL CABLE SUBMARINO

4.1 Programas de diseño

Para poder modelar y simular los cables submarinos tipos de estudio, es necesaria la aplicación de una herramienta basada en el método de elementos finitos. Por ello, Comsol Multhipysics es una herramienta que permite modelar el cable, realizar un mallado del mismo sobre el que se aplica el citado método. Además, dada la dificultad de diseñar modelos 3D en Comsol Multhipysics, se ha empleado la herramienta SolidWorks para el diseño de cable tridimensionales. A su vez, Matlab ha sido la herramienta que ha permitido programar el cálculo analítico de los valores de λ_1 y λ_2 basados en la norma IEC 60287-1-1. Todas estas herramientas serán descritas a continuación.

4.1.1 COMSOL Multhipysics

Un modelo se define como una representación o esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

En la actualidad existen numerosos fenómenos en la vida real, para cuyo estudio es necesario crear modelos, los cuales permitan reflejar y analizar aquellos resultados que son difíciles de obtener experimentando directamente sobre el sistema real.

Cada uno de estos sistemas físicos se expresa mediante ecuaciones, es decir, en su forma matemática que por lo regular son ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Las EDP tienen la finalidad de definir problemas físicos tales como, propagación del sonido o calor, electrostática... Tal y como se mencionó anteriormente, un fenómeno físico puede modelarse a través de un análisis: primero se representa el fenómeno mediante un modelo matemático que se compone de EDP y posteriormente, aplicando algún método específico, se resuelven las ecuaciones.

Un método numérico común para resolver EDP es el método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method), el cual proporciona una aproximación de la solución de estas ecuaciones. Este método se caracteriza por dividir el dominio del modelo en un gran número de subdominios o elementos finitos. La división del dominio se considera como una malla y el análisis se lleva a cabo para cada uno de los elementos que se generaron.

Actualmente se dispone de una diversidad de softwares que permiten simular fenómenos físicos a través de un modelo, estos programas se basan en el FEM para facilitar la solución de problemas en varias dimensiones, que constan de fronteras complicadas en su diseño. A pesar de las ventajas de este método, es indispensable tener en cuenta que mediante el FEM se obtienen soluciones numéricas concretas, en función de los datos que el usuario proporciona en la entrada, por lo que las soluciones obtenidas pueden incluir algún tipo de error. Si se considera que los datos ingresados en la entrada son correctos, en la salida obtenemos una aproximación del resultado.

COMSOL Multhipysics es un programa que se encuentra dividido en módulos, incluyendo cada módulo una extensa gama de físicas para realizar simulaciones multifísicas. Este software, aparte de acoplar sus físicas, también permite importar y exportar elementos indispensables en la simulación (geometrías, ecuaciones y parámetros) a través de sus módulos.

4.1.1.1 Módulos de COMSOL Multiphysics

Los módulos creados en este programa, se definen en base al tipo de análisis que se pretenda realizar (eléctrico, mecánico, fluidos,..). Algunos de ellos contienen un cúmulo de físicas para realizar el análisis, otros módulos permiten importar geometrías de otros programas y otros permiten modificar parámetros que están definidos por el programa (como ecuaciones, rangos de valores o valores en propiedades de un material) Alguno de ellos son:

- AC/DC Module
- Acoustics Module
- Chemical Species Transport Module
- Fluid Flow Module
- Heat Transfer Module.
- Structural Mechanics Module

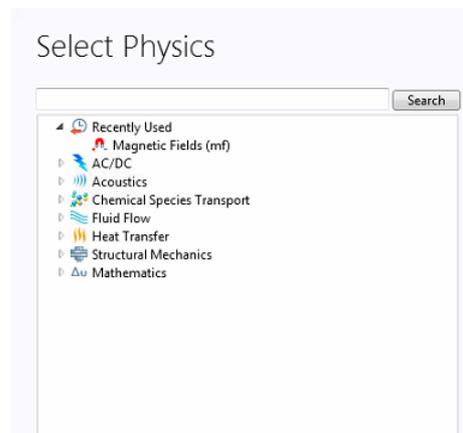


Figura 15. Módulos de COMSOL Multiphysics

A continuación se describen de manera general, algunos de estos módulos, siendo el módulo AC/DC el empleado para el estudio del campo magnético generado por un cable submarino.

- AC/DC Module. Este módulo se utiliza para analizar el rendimiento o funcionamiento de dispositivos como capacitores, inductores, motores y microsensors. Este tipo de mecanismos se caracterizan por estar influenciados de fenómenos electromagnéticos, aunque también se encuentran afectados por otros efectos, por ejemplo, térmicos, deflexiones y vibraciones electromecánicas. Este módulo también realiza análisis para los siguientes fenómenos: campos electrostáticos, campos magnetostáticos y campos cuasi-estáticos con la posibilidad de acoplarse a otras físicas. En general se manejan una variedad de físicas, aquí se mencionan algunas:

- Electric Currents
- Magnetic Field
- Electrostatics

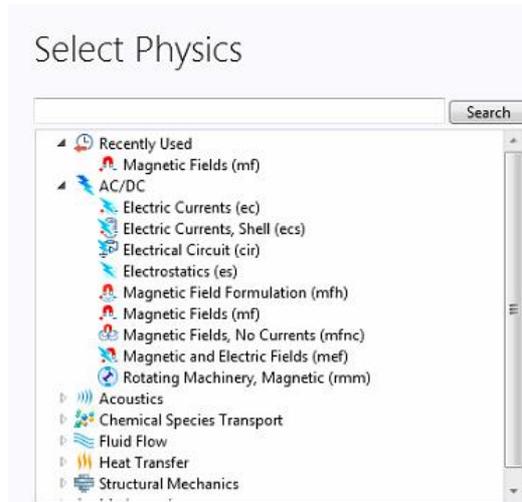


Figura 16. Físicas de COMSOL Multiphysics

- Acoustic Module: este módulo resuelve problemas en el área general de la acústica, tales como: la propagación acústica en sólidos, fluidos estacionarios, vibración y también aplicaciones aeroacústicas en fluidos móviles. Cada física viene con una variedad de estudios disponibles y con las dimensiones correspondientes para aplicar en el modelo, además, presenta una lista de físicas que se pueden acoplar con otros módulos para realizar un análisis multifísico.
- Heat Transfer Module: Transferencia de calor se define como el movimiento de la energía debido a una diferencia en la temperatura. En base a la importancia de este fenómeno, se realizó esta interfaz con los alcances necesarios para simular análisis de transferencia de calor por medio de conducción, convección y radiación.

4.1.1.2 Simulación multifísica

Después de conocer los módulos de COMSOL Multiphysics, simplemente se deben realizar acoplamientos entre sus diferentes físicas, es decir, combinar las diferentes interfaces que se presentan en los módulos.

El software considera de manera global los siguientes pasos para realizar una simulación:

- Diseño de una geometría
- Especificación de la física
- Seleccionar y generar un tipo de malla.
- Elegir el tipo de estudio
- Visualización de los resultados.

Por diseño de la geometría se entiende la realización de la figura geométrica que se ocupará como modelo para realizar la simulación. Este diseño se puede crear desde COMSOL Multiphysics, o bien puede importarse desde otro software. Además, el programa tiene la opción de formar una geometría en diferentes dimensiones (1D, 2D ó 3D)

En lo que se refiere a la física, éstas están delimitadas por un sistema de ecuaciones que permiten realizar el análisis en el modelo. También se pueden modificar las ecuaciones que están definidas en el programa, de forma manual o bien con la ayuda de un módulo del mismo software.

El seleccionar la malla depende del tipo de solución que se elija. El software muestra la disponibilidad de las mismas, el generar esta malla de elementos finitos puede ser uno de los pasos más postergados dentro del modelado.

La elección del estudio, simplemente depende del tipo de problema del que se espera obtener una solución y esta se genera a partir de métodos numéricos.

Por último, la visualización de los resultados se sujeta a las diferentes vistas que proporciona el programa para poder representar la solución (gráficos o curvas).

4.1.1.3 Relación de materiales

El programa COMSOL Multiphysics cuenta con una extensa variedad de materiales que se encuentran disponibles para cada módulo del programa. Cada módulo comprende materiales para las diferentes físicas, como por ejemplo, metales, semiconductores, polímeros, gases. También existe la posibilidad de agregar un nuevo material, simplemente se debe identificar la física relacionada para poder agregar las propiedades necesarias.



Figura 17. Relación de materiales

En la lista de materiales se seleccionan los materiales de los que está compuesto el modelo. A continuación se añaden a la lista, y se selecciona la geometría que va a estar compuesta por dicho material. Para finalizar, se estudian las propiedades que aparecen para cada material siendo las más importantes para el estudio del campo magnético de estos cables, la permeabilidad relativa, la permitividad relativa y la conductividad eléctrica.

En caso de que algún elemento no aparezca en la lista de materiales, basta con tomar cualquier material y modificarle las propiedades por las del material deseado, además de cambiarle el nombre para evitar confusión.

4.1.1.4 Procedimiento básico del modelado

Conviene definir a su vez, las partes del programa que se utilizan para realizar el modelado, tales como: las secciones, los apartados y las ventanas. Cada una de ellas tiene una función diferente.

Para poder explicar cada apartado, sección o ventana, el procedimiento del modelado se divide en tres etapas importantes. Estas etapas definen los pasos que se llevan a cabo para realizar dicho análisis multifísico y de esta manera se explicará la finalidad de algunas partes del programa. A continuación se muestran, de manera general, las etapas:

- Definiciones:
 - Parámetros, funciones y variables.
- Componentes
 - Definiciones
 - Geometría
 - Materiales
 - Campos magnéticos
 - Mallas
- Visualización de los resultados.
 - Resultados de la simulación.
 - Análisis de resultados.

✓ Definiciones:

Parámetros, funciones y variables: tiene como finalidad definir las características que tendrá el modelo, así como condiciones que tendrán parte durante el análisis. Por ejemplo: se puede establecer una lista de los parámetros que posteriormente serán empleados y si en algún momento fuera necesario modificarlos, se hace directamente de la lista de parámetros.

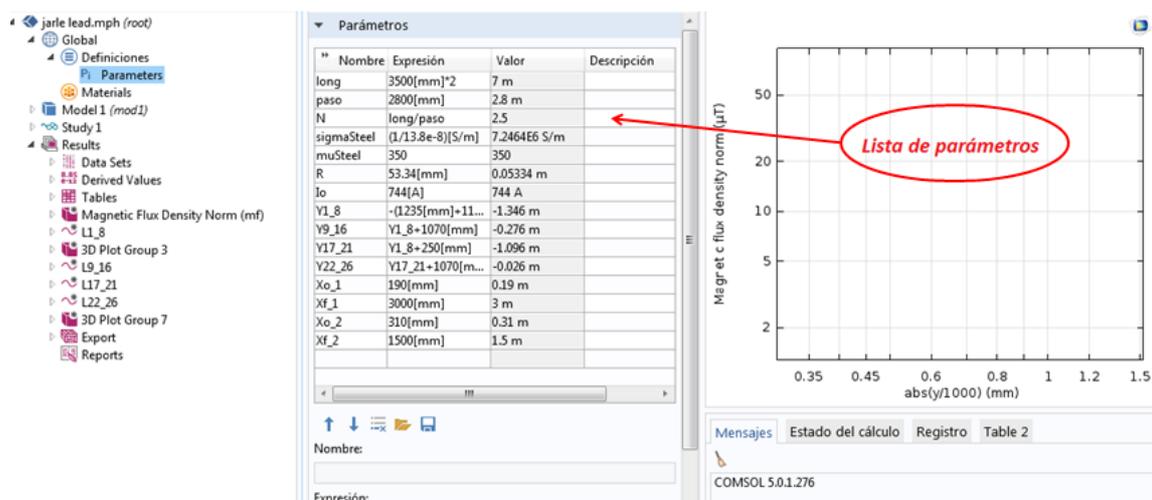


Figura 18. Lista de parámetros

✓ Componentes

Definiciones: permite seleccionar un conjunto de elementos geométricos y añadirle un nombre, de manera que cada vez que sea necesario señalar a ese grupo geométrico no haya que volver a seleccionar todos, sólo indicar la selección.

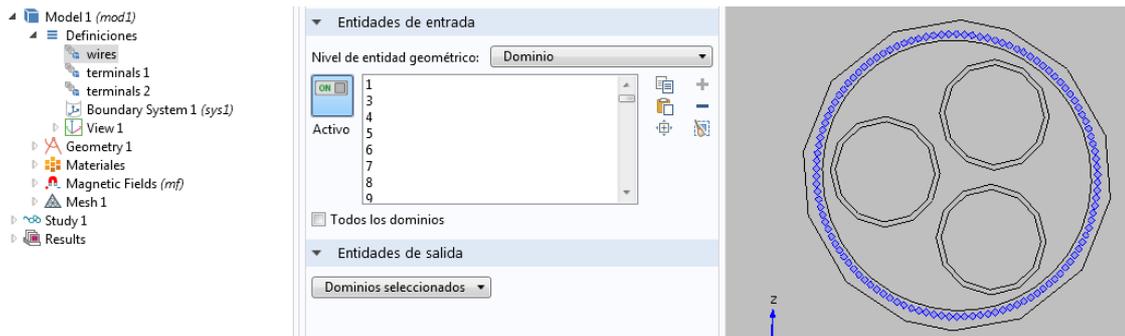


Figura 19. Definición de dominios

En esta imagen se observa como todos los hilos de la armadura han sido definidos bajo el nombre “wires”.

Geometría: como se ha comentado, esta puede ser constituida en el propio programa o puede ser importada de otro programa el cual presente mejores prestaciones para la construcción de sólidos. En el estudio realizado, y como se verá posteriormente, las geometrías de los modelos realizados en 2D, han sido constituidos directamente en COMSOL Multiphysics, pero la de los modelos en 3D han sido realizadas en el programa SolidWorks y ha sido importada posteriormente a COMSOL Multiphysics.

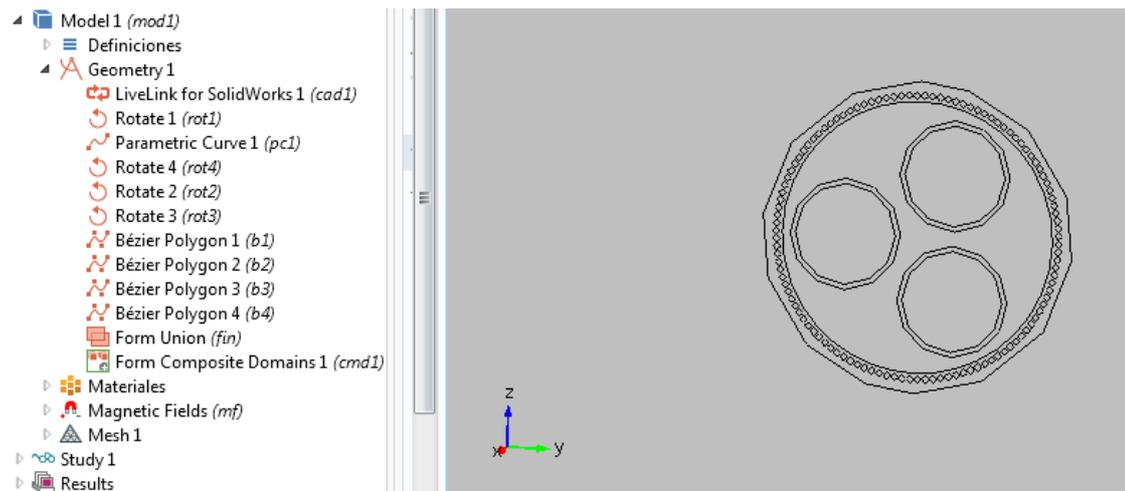


Figura 20, Geometría del modelo

En la imagen se observa la lista de operaciones geométricas que han sido realizadas para obtener este modelo. Entre ellas se puede observar, la importación de SolidWorks de una geometría principal.

Materiales: esta etapa consiste en añadir el material del que está constituido cada elemento geométrico. Por ejemplo, las pantallas, están construidas de plomo.

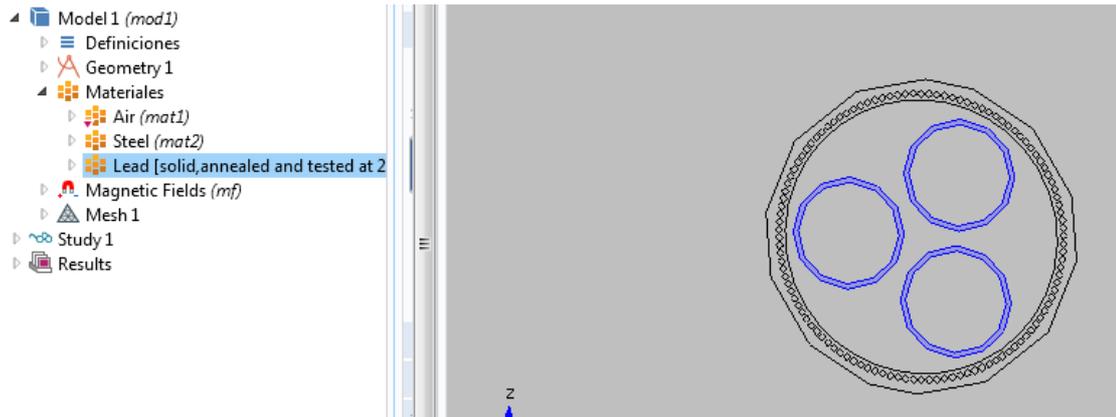


Figura 21. Aplicación de materiales

Como se puede observar, los materiales que son añadidos se aplican a una determinada geometría del modelo.

Campos magnéticos: establecen las ecuaciones indispensables y concretamente, es el lugar donde hay que señalar la corriente que va a circular por los elementos geométricos definidos.

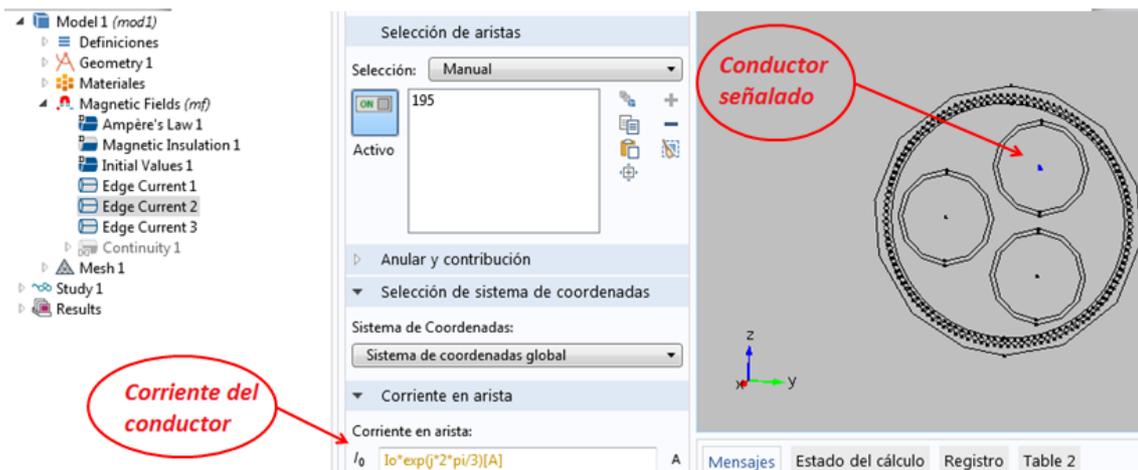


Figura 22. Introducción de corrientes en conductores

Mallas: etapa en la que se establece la geometría, tamaño y distribución del mallado para cada uno de los elementos. Hay que tener en cuenta que un buen mallado evitará problemas y permitirá una mejor simulación del proceso por lo que es una de las etapas más importantes del estudio.

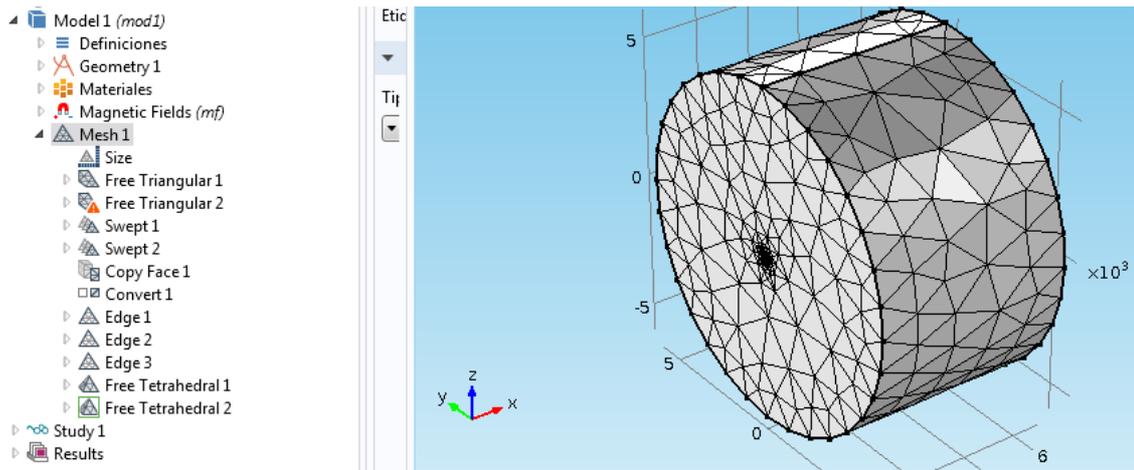


Figura 23. Realización del mallado

✓ Visualización de resultados

Una vez finalizada las etapas anteriores se realiza el estudio para lo cual hay que simular el modelo. Cuanto más fácil sea la geometría y el mallado menor será el tiempo de simulación pues conviene señalar, como ya se ha hecho anteriormente, que el tiempo de simulación es uno de los principales problemas del programa.

Una vez realizada la simulación se puede observar la representación gráfica, obtener tablas de valores e incluso exportar los datos a otros programas para otros fines.

4.1.2 Solidworks

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para el modelado mecánico en 3D. Este programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción.

Este software, al ser un programa destinado para la construcción de modelos, permite construir de manera más trivial que COMSOL Multiphysics un cable submarino. Una vez construido, dicho cable pasa a ser exportado a COMSOL Multiphysics para sus posteriores estudios.

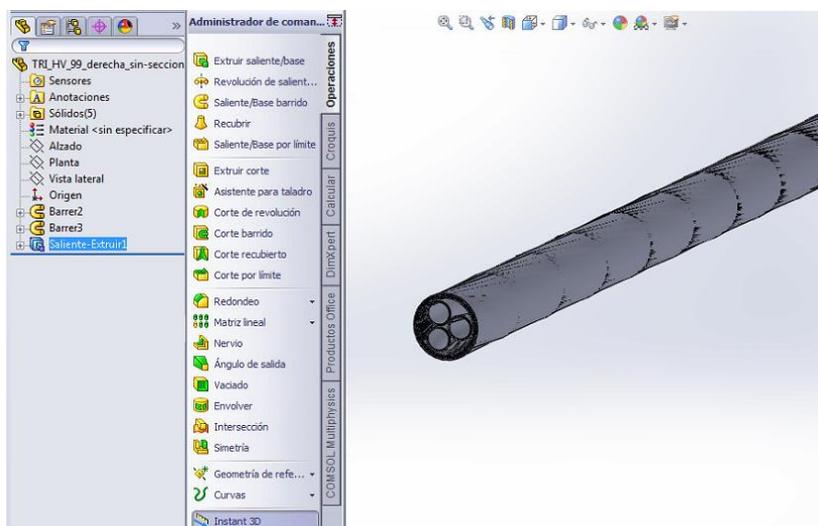


Figura 24. Construcción de un cable submarino

4.1.3 Matlab

MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

Esta herramienta ha sido empleada para realizar programas que permitan obtener las pérdidas de potencia analíticas en los cables submarinos.

Para ello, se realizan unos programas previos que permiten obtener la resistencia por unidad de longitud, (Ω/m), a 20°C para conductores, pantallas y armadura, en función de parámetros físicos propios de cada elemento. Estos programas son los siguientes:

➤ Resistencia de conductores:

```
Rcond.m x +
1 function R_conductor= Rcond(radio_cond)
2
3 %%rho_cond=1.724*10^(-8);
4 rho_cond=2.0489*10^(-8) %%resistividad del conductor (cobre) (ohmio*metro);
5 S_cond=pi*(radio_cond)^2; %%sección del conductor (m^2);
6 R_conductor=rho_cond/S_cond %%resistencia conductor por unidad de longitud a 20°C (ohmios/metro)
```

➤ Resistencia de pantallas:

```
Rpant.m x +
1 function R_pantalla= Rpant(r_pant_ext,r_pant_int)
2
3 rho_pant=21.4*10^(-8); %%resistividad de la pantalla (plomo) (ohmio*metro);
4 S_pant=pi*(r_pant_ext^2-r_pant_int^2); %%sección de la pantalla (m^2);
5
6 R_pantalla=rho_pant/S_pant %%resistencia de la pantalla por unidad de longitud a T=20°C(ohmios/metro)
```

➤ Resistencia de la armadura:

```
Rarm.m x +
1 function R_armadura= Rarm(r_hilo_arm,Nhilos)
2
3 %%rho_arm=13.8*10^(-8);
4 rho_arm=20.8*10^(-8); %%resistividad de la armadura (acero) (ohmio*metro);
5 S_arm=Nhilos*pi*r_hilo_arm^2; %%sección de la armadura (m^2);
6
7 R_armadura=rho_arm/S_arm %%resistencia armadura por unidad de longitud a 20°C(ohmios/metro)
```

De esta forma, una vez obtenido los valores de las resistencias por unidad de longitud en conductores, pantallas y armaduras, se procede a obtener los valores de λ_1 y λ_2 mediante la siguiente programación:

➤ λ_1 :

```
lambda1.m x +
1 function Perd_pant= lambda1(f,s,d,Rcond,Rpant)
2
3 %%X=2*2*pi*f*10^(-7)*log((2*s)/d) (ohmios/m);
4 %%f=frecuencia (Hz);
5 %%s=distancia entre ejes de conductores (mm);
6 %%d=diámetro medio de pantalla (mm);
7
8 Perd_pant=(Rpant/Rcond)*(1.7/(1+(Rpant/(2*2*pi*f*10^(-7)*log((2*s)/d)))^2))
9
10
```

➤ λ_2 :

```
lambda2.m x +
1 function Perd_armadura=lambda2(c,da,f,Rcond,Rpant,Rarm,lambda1)
2
3
4 %%c= dist entre ejes conductores y eje del cable (mm);
5 %%da= diámetro medio de la armadura (mm);
6 %%f = frecuencia(Hz);
7
8 Perd_armadura=1.23*(Rarm/Rcond)*(((2*c)/da)^2*(1/(((2.77*Rarm*10^(6))/(2*pi*f))^(2)+1))*(1-(Rcond/Rpant)*lambda1)
```

Las fórmulas empleadas para el cálculo de λ_1 y λ_2 quedan definidas en el epígrafe 1.2 Formulación analítica. Normativa.

4.2 Caracterización de modelos 2D, 2.5D y 3D

Como ha sido citado, las simulaciones necesarias para analizar las pérdidas de potencia son realizadas a partir de modelos bidimensionales y tridimensionales. Las características propias de cada uno de ellos se describen a continuación:

4.2.1 Modelos 2D

Modelos bidimensionales: dada la simplicidad de diseño de estos modelos, pueden ser representados geoméricamente directamente en Comsol Multiphysics. El estudio bidimensional es realizado con los seis modelos de estudio, cada uno con sus propias características físicas y geométricas. Parámetros variables, como son el diámetro de los hilos y la separación entre estos, delta, han tenido unos valores de 6 milímetros y 0,3 milímetros respectivamente. Como ha sido citado, estos modelos se representan en un plano, por lo que en su estudio no se considera ningún tipo de trenzado entre fases e hilos de armaduras, y las pérdidas obtenidas se representan en unidades de Watios por metro.

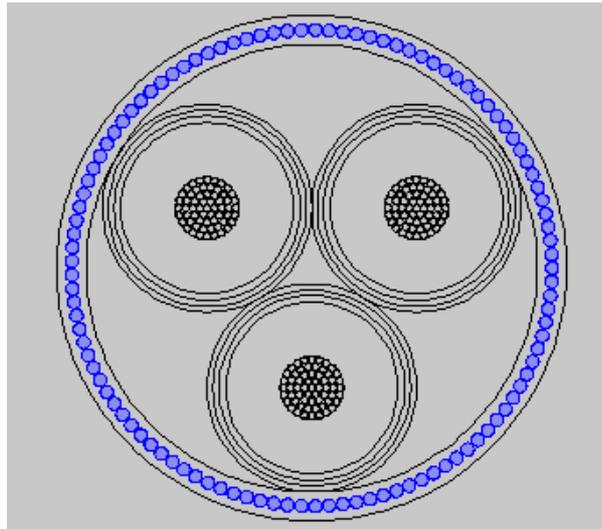


Figura 25. Modelo bidimensional

4.2.2 Modelo 2.5D

Modelos 2.5D: al igual que los modelos anteriores, estos son también representados directamente en Comsol Multiphysics. Esto es así, dado que estos modelos son también modelos 2D que intentan reproducir lo que sucede en un modelo 3D, para lo cual se le añade un circuito eléctrico. Este circuito eléctrico tiene como finalidad secuenciar todos los hilos de la armadura en serie y forzar a que la corriente que circule por estos hilos sea igual a cero. Al estar los hilos de la armadura trenzados alrededor de las fases, en ellos se inducen tensiones entre sus extremos. Esta tensión resulta ser nula por la simetría de las corrientes y la geometría (todos los hilos terminan rodeando un mismo número de veces a las tres fases). Por tanto no circula corriente por ellos de forma longitudinal. De esta forma, en 2.5D lo que se busca es imponer que ocurra esto y asemejarse a las simulaciones 3D.

A pesar de ello, cabe destacar que el modelo 2.5D no modela bien otras cosas. Por ejemplo, tanto en 2.5D como en 3D sí se modelan las corrientes parásitas que circulan en el interior de cada hilo y que son perpendiculares al eje del cable. Sin embargo, en el modelo 3D, en los hilos de la armadura el color de la densidad de corriente va variando a lo largo del hilo, lo que significa que estas corrientes parásitas no son homogéneas a lo largo de cada hilo. Además esto se repite en cada hilo, por lo que si se integran las pérdidas en cada uno de ellos por separado, éstas salen idénticas. Este efecto no lo contempla el 2.5D, que viene a considerar que las pérdidas son homogéneas en cada hilo y con un determinado valor dependiendo de su posición relativa a las fases en ese modelo 2D. Por tanto, si se integran las pérdidas en cada uno de ellos no todas serán iguales.

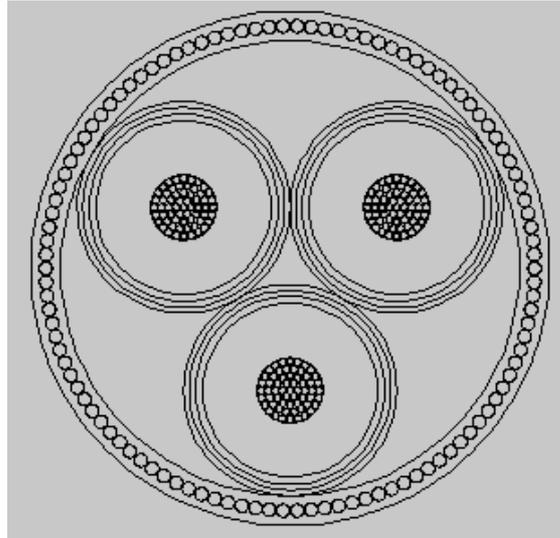


Figura 26. Modelo “2.5D”

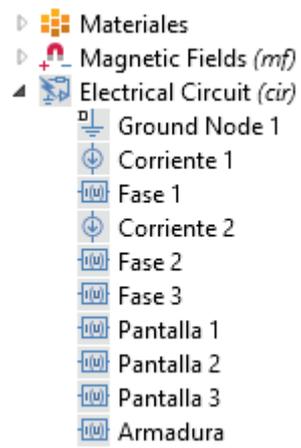


Figura 27. Circuito eléctrico 2.5D

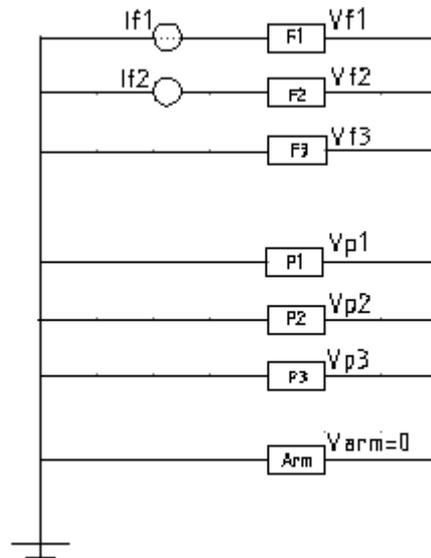


Figura 28. Circuito eléctrico 2.5D

4.2.3 Modelo 3D

Modelos tridimensionales: estos modelos deben ser representados inicialmente en SolidWorks, debido a la complejidad de su geometría. Los trenzados de las fases, pantallas e hilos de la armadura dificultan su diseño directo en Comsol Multiphysics. Una vez representado con el programa indicado, los modelos son exportados a Comsol para su posterior análisis y estudio de resultados. En estos modelos, como en los bidimensionales y “2.5D” el diámetro de los hilos de la armadura y la separación entre hilos continúan teniendo unos valores de 6 milímetros y 0,3 milímetros respectivamente. A su vez, para simplificar el estudio, estos modelos deben tener una longitud finita. A mayor longitud, mayor serán los problemas de mallado debido a los trenzados existentes. Es por ello que se decide emplear la condición de simetría. Para aplicar dicha condición, es condición necesaria tener los dos extremos de la armadura al mismo potencial. Para ello, se impone la condición de poner los dos extremos a tierra y así cerrar el circuito. Así, mediante un modelo finito de una longitud determinada, (6 metros) se establece la condición de infinito mediante un comando de Comsol Multiphysics denominado “Copy Face” que permite extrapolar el modelo de forma reiterativa a ambas caras del mismo. Para ello, es fundamental que tanto el trenzado de las fases y pantallas como el de los hilos de la armadura tengan un paso definido por un número entero. Con ello se consigue que el modelo comience y termine en las mismas posiciones geométricas de anchura y altura, pero desplazado una longitud de 6 metros. De esta forma, al aplicar la condición de infinito, todos los trenzados encajaran geoméricamente dando la imagen de un único cable continuo.

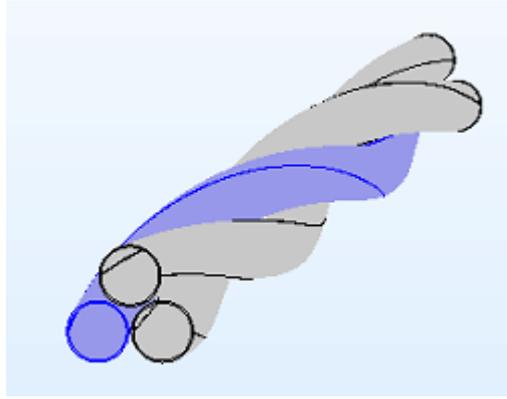


Figura 29. Trenzado de las pantallas

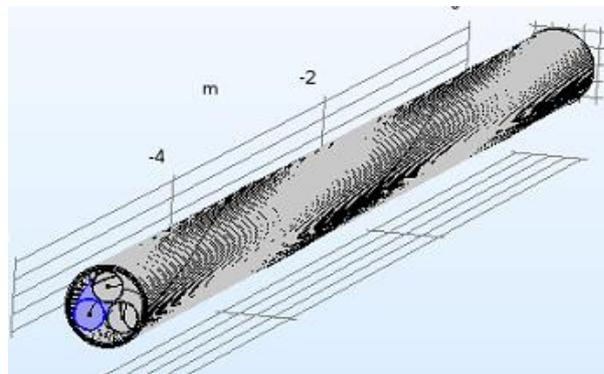


Figura 30. Modelo 3D

5 ESTUDIO Y VALORACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA

Este epígrafe tiene como principal objetivo describir los modelos tipos a partir de los cuales se van a analizar las pérdidas de potencia en los cables y exponer una serie de consideraciones previas que se han desarrollado para facilitar el modelado de dichos cables

5.1 Presentación de modelos

Para realizar un estudio autosuficiente y contrastar los resultados obtenidos, evitando posibles casuísticas, se decide realizar los análisis con un total de seis cables, cada uno de los cuales cuenta con unos determinados parámetros físicos dimensionales específicos. Estos cables, que en los sucesivos apartados serán denominados por el nombre que se le adjunta a continuación, son los siguientes:

- Modelo 1: 500 mm^2 – 245 kV. Este primer modelo cuenta con una longitud de estudio de 6 metros, una corriente por fase de 400 A, 110 hilos en su armadura, un diámetro de estos hilos de 6 milímetros y un radio medio de la armadura de 110 milímetros.

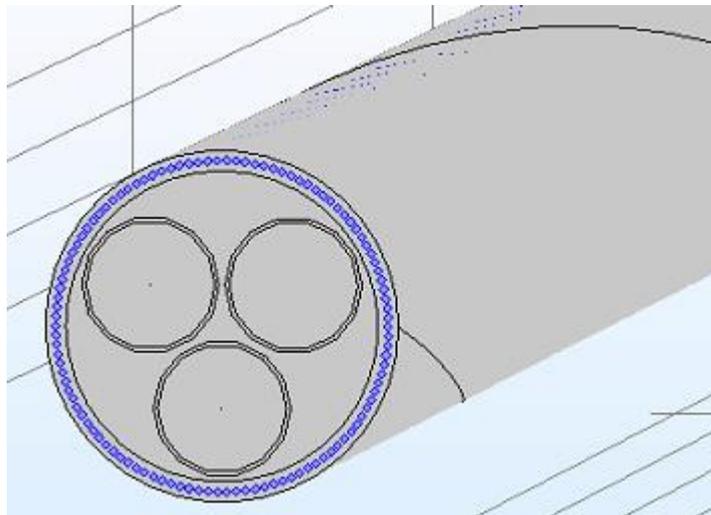


Figura 31. Cable Modelo 1

- Modelo 2: 630 mm^2 – 245 kV. Un segundo modelo de la misma longitud, una corriente de 400 A, 110 hilos en su armadura, un diámetro de estos hilos de 6 milímetros y un radio medio de la armadura de 110 milímetros.

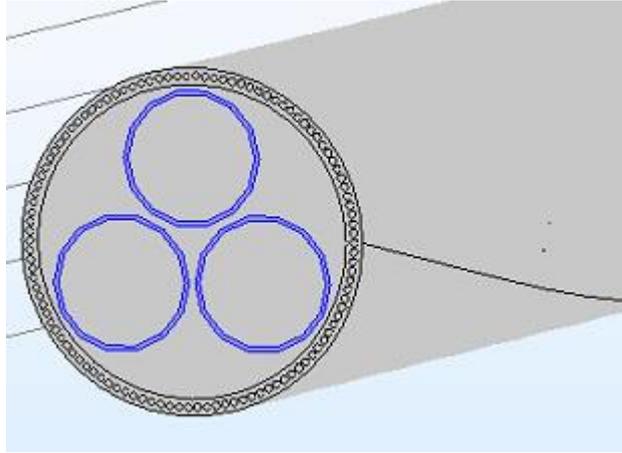


Figura 32. Cable Modelo 2

- Modelo 3: 800 mm^2 – 132 kV. Un tercer modelo de la misma longitud, una corriente de 896 A, 98 hilos en su armadura, un diámetro de estos hilos de 6 milímetros y un radio medio de la armadura de 98.5 milímetros.

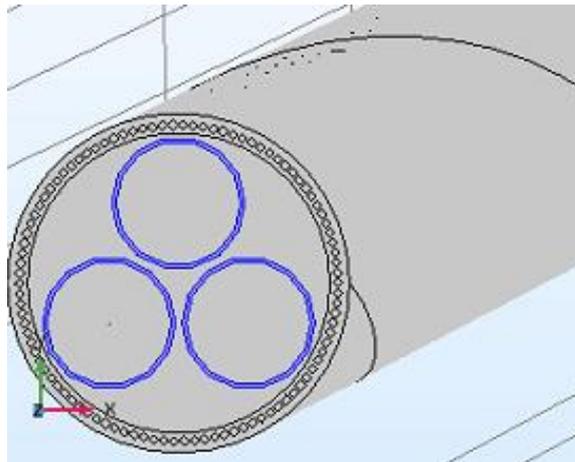


Figura 33. Cable Modelo 3

- Modelo 4: 630 mm^2 – 170 kV. Un cuarto modelo de la misma longitud, una corriente de 666 A, 97 hilos en su armadura, un diámetro de estos hilos de 6 milímetros y un radio medio de la armadura de 97 milímetros.

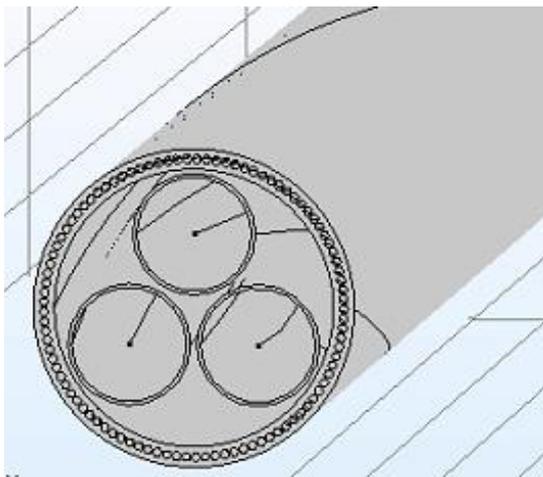


Figura 34. Cable Modelo 4

- Modelo 5: 800 mm^2 – 145 kV. Un cuarto modelo de la misma longitud, una corriente de 745 A, 104 hilos en su armadura, un diámetro de estos hilos de 6 milímetros y un radio medio de la armadura de 104.5 milímetros.

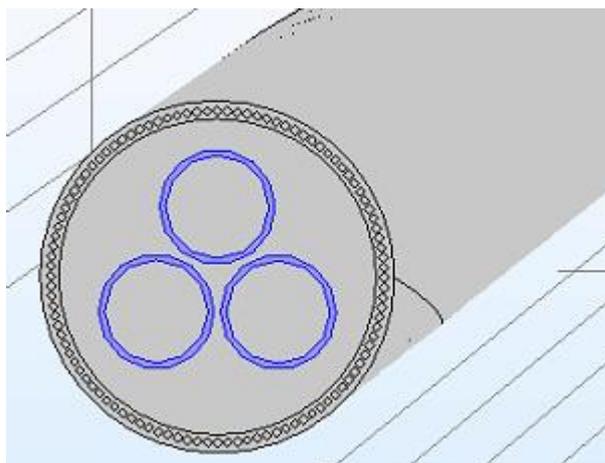


Figura 35. Cable Modelo 5

- Modelo 6: 1.250 mm^2 – 220 kV. Un cuarto modelo de la misma longitud, una corriente de 666 A, 123 hilos en su armadura, un diámetro de estos hilos de 6 milímetros y un radio medio de la armadura de 121 milímetros.

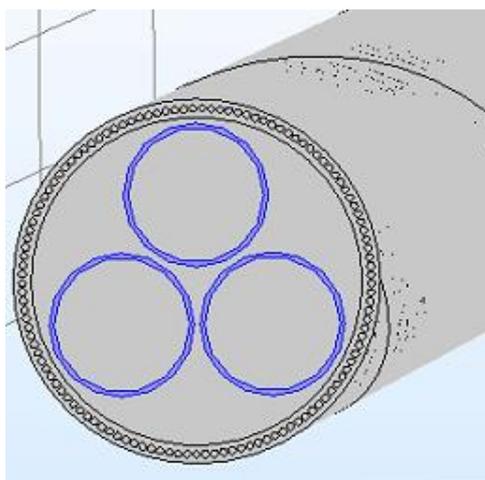


Figura 36. Cable Modelo 6

A modo de resumen, en la siguiente tabla se recogen los seis cables con las características propias de cada una de ellos.

CARÁCTERÍSTICAS MODELOS								
CABLE	SECCIÓN (mm ²)	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	s (mm)	d (mm)	c (mm)	da (mm)	Nhilos
Modelo 1	500	245	400	96,5	88,6	55,714	220,86	110
Modelo 2	630	245	400	97,3	89,1	56,176	220,82	119
Modelo 3	800	132	896	87	80	50,23	197,4	100
Modelo 4	630	170	666	84,1	77,1	48,56	194,61	103
Modelo 5	800	145	745	92,4	68,7	53,35	209	114
Modelo 6	1.250	220	666	107	97,9	61,77	243,28	123

Tabla 4. Características cables de estudios

CARÁCTERÍSTICAS MODELOS					
SECCIÓN (mm ²)	radio cond (m)	radio pant_ext (m)	radio pant_int (m)	espesor pant (mm)	radio hilo_arm (m)
500	0,01325	0,04565	0,04295	0,0027	0,003
630	0,01525	0,04605	0,04305	0,003	0,0028
800	0,01725	0,04125	0,03875	0,0025	0,0028
630	0,01525	0,03975	0,03735	0,00725	0,0028
800	0,0175	0,0362	0,0325	0,0037	0,0028
1.250	0,01995	0,0505	0,0474	0,0031	0,003

Tabla 5. Características cables de estudios

Donde:

- s: es la distancia entre los ejes de los conductores.
- d: es el diámetro medio de la pantalla.
- c: es la distancia entre los ejes conductores y el eje central del cable.
- da: es el diámetro medio de la armadura.
- Nhilos: es el número de hilos.

5.2 Estudios previos

Previo al estudio de las pérdidas de potencia de estos modelos tipos, se han realizado unos estudios previos que permitan simplificar el modelado geométrico del cable.

5.2.1 Fases con hilos de cobre vs fases macizas

Un primer estudio consiste en comparar las pérdidas de potencia por unidad de longitud producidas en modelos cuyas fases estén compuestas por un conjunto de hilos de cobres, como sucede en la realidad, con modelos en los que estos hilos se asimilen por un conductor de cobre macizo.

De esta forma, este estudio se ha llevado a cabo para los seis modelos:

➤ Modelo 1:

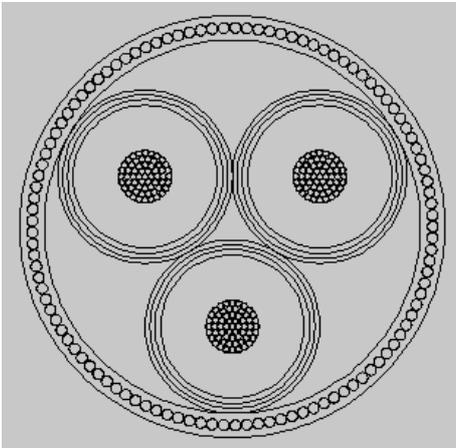


Figura 37. Fases de hilos

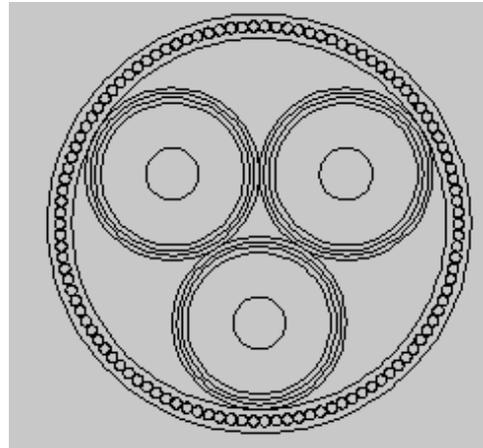


Figura 38. Fases macizas

➤ Modelo 2:

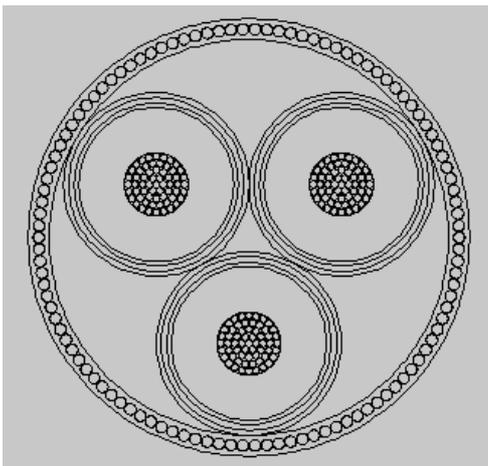


Figura 39. Fases de hilos

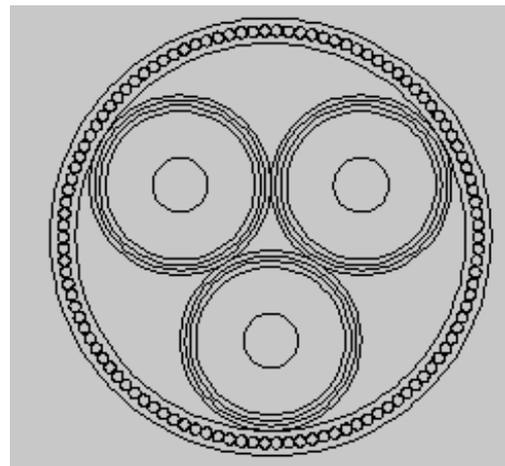


Figura 40. Fases macizas

➤ Modelo 4:

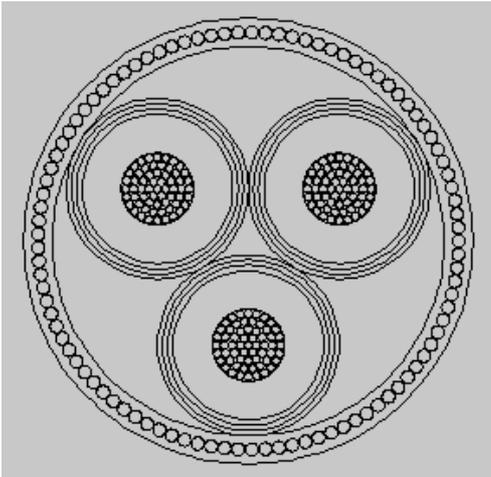


Figura 41. Fases de hilos

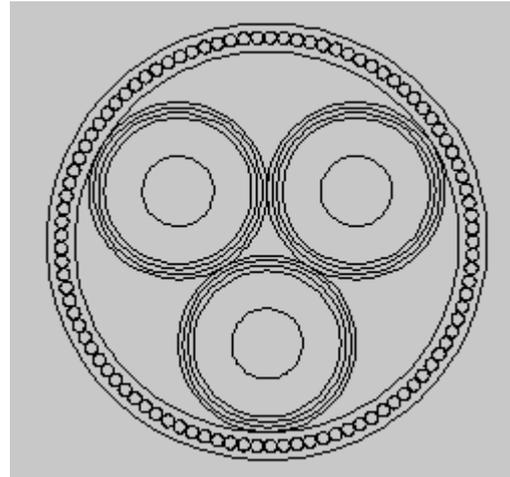


Figura 42. Fases macizas

➤ Modelo 5:

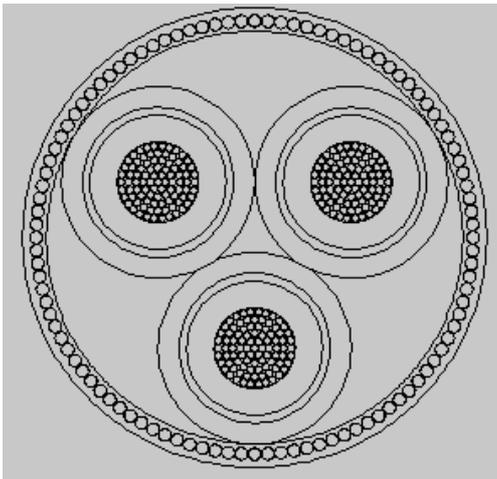


Figura 43. Fases de hilos

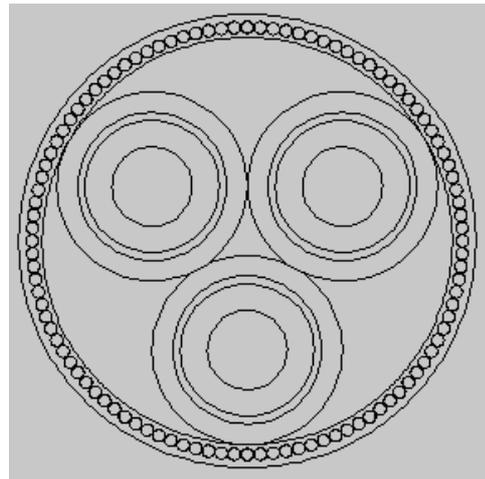


Figura 44. Fases macizas

➤ Modelo 6:

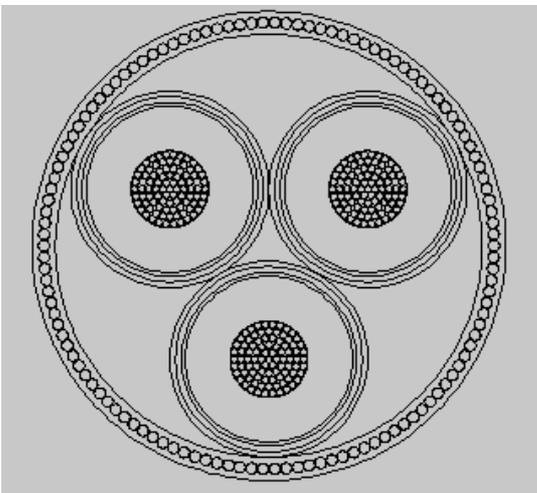


Figura 45. Fases de hilos

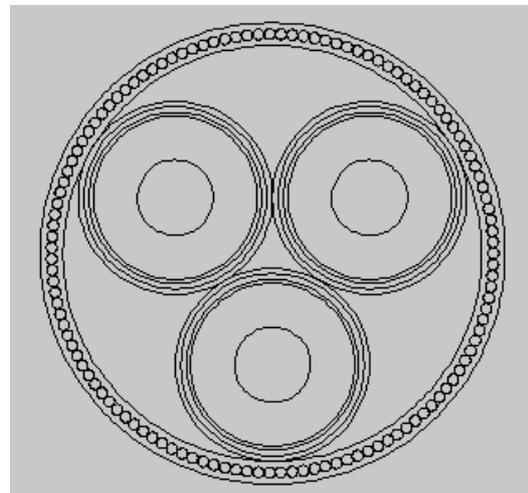


Figura 46. Fases macizas

De los modelos anteriores, se obtienen los siguientes valores de pérdidas resistivas por unidad de longitud, para conductores formados por hilos de cobres:

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS COMSOL HILOS DE COBRE				
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRD. CONDUCTORES (W/m)	PÉRD. PANTALLAS (W/m)	PÉRD. ARMADURA (W/m)
2D	Modelo 1	8,4165	2,0752	1,2702
	Modelo 2	7,2057	2,2893	1,2621
	Modelo 4	20,251	4,8125	3,2906
	Modelo 5	20,456	10,63	4,1153
	Modelo 6	14,144	6,5499	3,3874

Tabla 6. Modelos 2D con fases de hilos

Para ellos, los valores de λ_1 y λ_2 que se obtienen son los siguientes:

RELACIÓN DE PÉRDIDAS HILOS DE COBRE			
DIMENSIÓN	CABLE	λ_1	λ_2
2D	Modelo 1	0,2465633	0,15091784
	Modelo 2	0,31770682	0,175153
	Modelo 4	0,23764259	0,16249074
	Modelo 5	0,51965194	0,20117814
	Modelo 6	0,46308682	0,23949378

Tabla 7. λ_1 y λ_2 para fases de hilos

En el caso de conductores macizos, las pérdidas de potencia por unidad de longitud para cada modelo son las siguientes:

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS COMSOL CONDUCTOR MACIZO				
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRD. CONDUCTORES (W/m)	PÉRD. PANTALLAS (W/m)	PÉRD. ARMADURA (W/m)
2D	Modelo 1	7,0471	2,088	1,2695
	Modelo 2	5,7495	2,2812	1,2778
	Modelo 4	16,225	4,7121	3,2091
	Modelo 5	16,77	10,464	4,017
	Modelo 6	12,086	6,5871	3,3632

Tabla 8. Modelos 2D con fases macizas

Estas pérdidas originan unos valores de λ_1 y λ_2 como sigue:

RELACIÓN DE PÉRDIDAS FASES MACIZAS			
DIMENSIÓN	CABLE	λ_1	λ_2
2D	Modelo 1	0,24284824	0,14786082
	Modelo 2	0,32100547	0,1803124
	Modelo 4	0,23289669	0,16471577
	Modelo 5	0,53591268	0,20923399
	Modelo 6	0,46308682	0,23949378

Tabla 9. λ_1 y λ_2 para fases macizas

Estableciendo una relación entre las pérdidas por fases, pantallas y armaduras para cada uno de los modelos se puede observar:

DIMENSIÓN	CABLE	RELACIÓN DE PÉRDIDAS EN CONDUCTORES (%)	RELACIÓN DE PÉRDIDAS EN PANTALLAS (%)	RELACIÓN DE PÉRDIDAS EN ARMADURA (%)
2D	Modelo 1	84%	101%	100%
	Modelo 2	80%	100%	101%
	Modelo 4	80%	98%	98%
	Modelo 5	82%	98%	98%
	Modelo 6	85%	101%	99%

MEDIA	82%	99%	99%
-------	-----	-----	-----

Tabla 10. Relación de pérdidas en fases

Esto indica que el hecho de sustituir modelos cuyas fases estén compuestas por hilos de cobre por modelos cuyas fases sean conductores macizos originan que las pérdidas de potencia ocasionadas en las armaduras y en las pantallas sean prácticamente idénticas, pero en el caso de las fases, las pérdidas producidas por conductores macizos son, aproximadamente, un 82% de las pérdidas que se originarían en las fases de los mismos cables, si se emplean fases formadas por hilos.

5.2.2 Lambda 1 por pantalla y fase vs lambda 1 para el conjunto de pantallas y fases

Un segundo estudio ha consistido en conocer si existen variaciones al calcular el valor de λ_1 como el cociente de las pérdidas resistivas de todas las pantallas entre las pérdidas resistivas de todas las fases y calcular dicho valor como el cociente de las pérdidas de una sola pantalla y su respectiva fase.

Cabe destacar que este estudio ha sido realizado con los modelos cuyas fases están formadas por hilos de cobre, y no por los modelos con fases macizas.

Este estudio ha sido realizado para los seis modelos tipo que se disponen. El procedimiento seguido es el siguiente:

- Para los modelos tipos se ha realizado un estudio consistente en medir las pérdidas por cada una de las fases y de las pantallas:

PÉRDIDAS POR FASES				
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRDIDAS RESISTIVAS FASE I (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS FASE II (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS FASE III (W/m)
2D	Modelo 1	2,7456	2,7456	2,7456
	Modelo 2	2,4028	2,403	2,4029
	Modelo 3	9,3653	9,3653	9,3653
	Modelo 4	6,7432	6,7436	6,7433
	Modelo 5	6,6716	6,6719	6,6717
	Modelo 6	4,7147	4,7149	4,7149

Tabla 11. Pérdidas por cada fase

PÉRDIDAS POR PANTALLAS				
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS I (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS II (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS III (W/m)
2D	Modelo 1	0,69174	0,69175	0,69174
	Modelo 2	0,77133	0,77133	0,77131
	Modelo 3	2,8148	2,8148	2,8148
	Modelo 4	1,5705	1,5705	1,5705
	Modelo 5	3,591	3,591	3,5909
	Modelo 6	2,1833	2,1833	2,1833

Tabla 12. Pérdidas por cada pantalla

- A continuación, se ha calculado el valor de λ_1 obtenido para cada una de las tres fases y pantallas que conforman el cable. Además se calcula su valor medio

λ_1 FASE I	λ_1 FASE II	λ_1 FASE III	λ_1 MEDIA
0,25194493	0,251948572	0,25194493	0,251946144
0,321012985	0,320986267	0,320991302	0,320996851
0,300556309	0,300556309	0,300556309	0,300556309
0,232901293	0,232887478	0,232897839	0,232895537
0,538251694	0,538227491	0,538228637	0,538235941
0,463083547	0,463063904	0,463063904	0,463070452

Tabla 13. λ_1 por cada relación pantalla-fase y λ_1 media

Las pérdidas por cada fase y pantallas son prácticamente idénticas al resto de fases y pantallas.

➤ Finalmente se compara este valor medio, con los valores de λ_1 obtenido como relación de las pérdidas del conjunto de pantallas y las pérdidas del conjunto de fases (λ_1 genérica).

λ_1 MEDIA	λ_1 GENÉRICA	COMPARACIÓN λ_1
0,251946144	0,242848237	96%
0,320996851	0,321005466	100%
0,300556309	0,302003202	100%
0,232895537	0,232896688	100%
0,538235941	0,535912679	100%
0,463070452	0,463086821	100%

Tabla 14. Comparación lambdas 1

Como conclusión de esta comparación se puede observar que el valor de λ_1 se puede obtener tanto como la relación de las pérdidas de potencia dadas en una pantalla y su fase, como por la relación entre el conjunto de pérdidas producidas en las tres pantallas y las tres fases. Esto es, λ_1 es la misma independientemente de la pantalla y fase o conjunto de pantallas y fases, en las que se calcule.

5.2.3 Problemática del modelo 3D

Inicialmente, los modelos tridimensionales fueron realizados con fases macizas de cobre, de igual forma que los modelos 2D y 2.5D, que se trenzaban entre sí junto a sus pantallas. Sin embargo, un problema del propio programa Comsol Multphysics provocaba que al añadir la corriente a estas fases, el flujo de éstas no circularan por las propias fases, sino en la misma dirección pero desfasadas 180°. A continuación se puede apreciar lo comentado con un cable sin armadura:

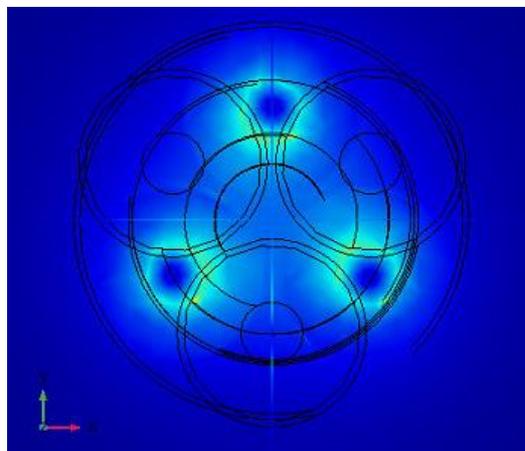


Figura 47. Modelo 3D fase maciza

Ante ello, se optó por solucionar este problema, sustituyendo los conductores macizos de cobre por hilos de cobre que realizaban el mismo trenzado y por las que circulaba el mismo valor de corriente.

A continuación se muestra una imagen del modelo 3D con fases en hilos.

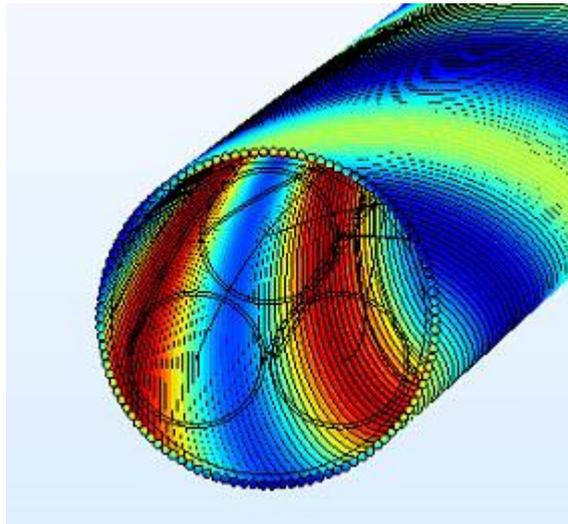


Figura 48. Modelo 3D fase hilos

Este hecho trae consigo el problema que, al no ser superficies los propios conductores, Comsol Multiphysics no puede medir las pérdidas de potencia originadas en ellas. Esto implica que los valores de λ_1 y λ_2 no pueden ser calculados. Por ello, se continúa el estudio realizando los modelos con el procedimiento descrito y, aunque no se puedan comparar los valores de λ , si se pueden comparar los valores de pérdidas por pantallas y armaduras.

6 CÁLCULO ANALÍTICO Y DE SIMULACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA DE CABLES SUBMARINOS

6.1 Resultados analíticos

Una vez definido los seis modelos de cables submarinos que se van a estudiar y conocidas sus características dimensionales definido el procedimiento de obtención de valores analíticos de pérdidas de potencia a través de los programas en Matlab, se realiza un estudio para conocer los valores de λ_1 y λ_2 siguiendo el procedimiento descrito en la IEC 60287-1-1.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

RESULTADOS ANALÍTICOS							
DIMENSIÓN	CABLE	SECCIÓN (mm ²)	Rcond (Ω/m)	Rpant (Ω /m)	Rarm (Ω /m)	λ_1	λ_2
2D	Modelo 1	500	3,1257*10 ⁽⁻⁵⁾	2,8475*10 ⁽⁻⁴⁾	4,4370*10 ⁽⁻⁵⁾	0,3917	0,3689
	Modelo 2	630	2,3597*10 ⁽⁻⁵⁾	2,5483*10 ⁽⁻⁴⁾	4,7083*10 ⁽⁻⁵⁾	0,5795	0,5129
	Modelo 3	800	1,8442*10 ⁽⁻⁵⁾	3,4059*10 ⁽⁻⁴⁾	5,6029*10 ⁽⁻⁵⁾	0,5578	0,7545
	Modelo 4	630	2,3597*10 ⁽⁻⁵⁾	7,4433*10 ⁽⁻⁴⁾	5,4397*10 ⁽⁻⁵⁾	0,5043	0,5704
	Modelo 5	800	1,7919*10 ⁽⁻⁵⁾	2,6798*10 ⁽⁻⁴⁾	4,9148*10 ⁽⁻⁵⁾	0,7814	0,6835
	Modelo 6	1000	1,3788*10 ⁽⁻⁵⁾	2,2445*10 ⁽⁻⁴⁾	3,9680*10 ⁽⁻⁵⁾	0,7256	0,7575

Tabla 15. Pérdidas de potencia analíticas

En la tabla anterior se recogen, para cada uno de los modelos de estudios, la resistencia unitaria de cada conductor, la resistencia unitaria de las pantallas y la resistencia unitaria de la armadura. También se especifican los valores de λ_1 y λ_2 de cada modelo.

6.2 Resultados de los modelos 2D

Una vez realizado el estudio analítico, se procede a analizar las pérdidas de potencia producidas en las fases, pantallas y armaduras de los modelos tipos. Con ellas se obtienen unos valores de λ_1 y λ_2 que serán comparados con los obtenidos del estudio analítico. El resultado de la construcción geométrica de estos modelos en Comsol Multhipysics y de su posterior mallado es el siguiente:

➤ Modelo 1:

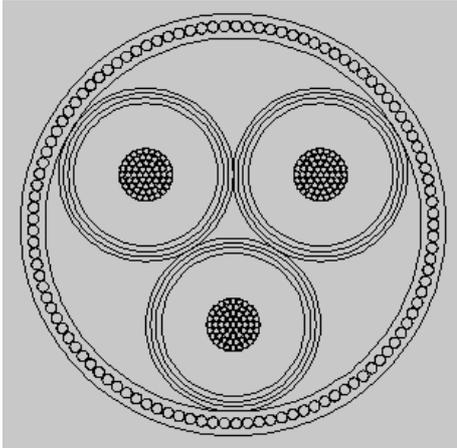


Figura 49. Modelo 1 2D

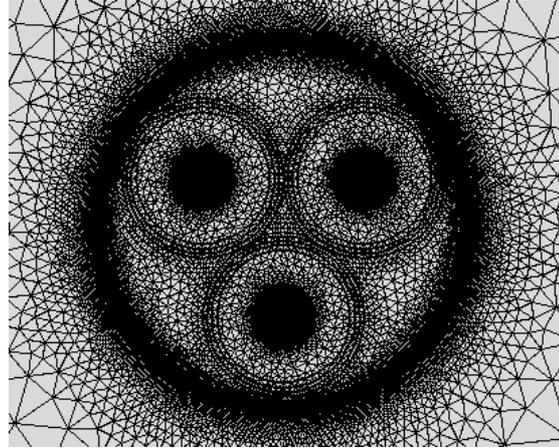


Figura 50. Modelo 1 2D mallado

➤ Modelo 2:

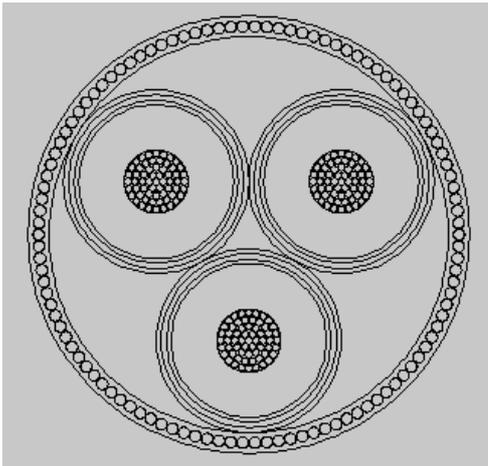


Figura 51. Modelo 2 2D

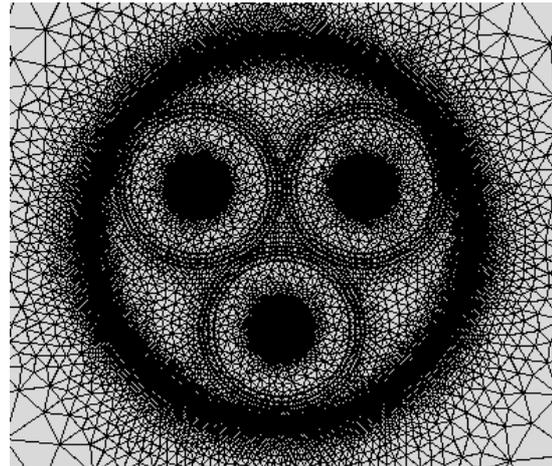


Figura 52. Modelo 2 2D mallado

➤ Modelo 3:

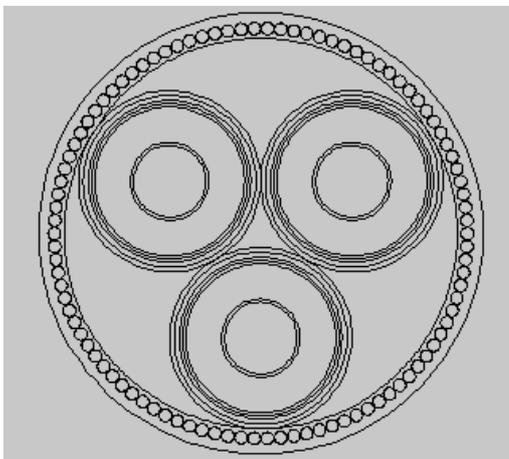


Figura 53. Modelo 3 2D

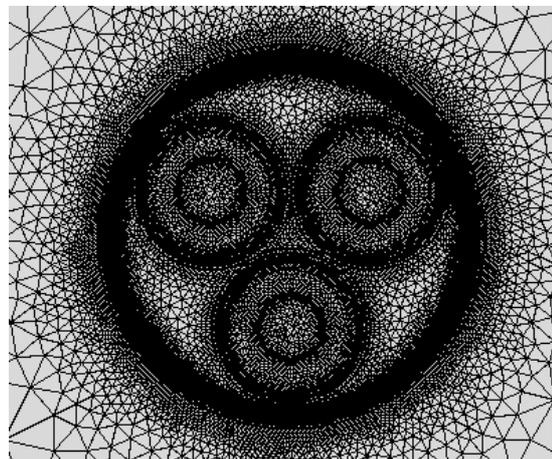


Figura 54. Modelo 3 2D mallado

➤ Modelo 4:

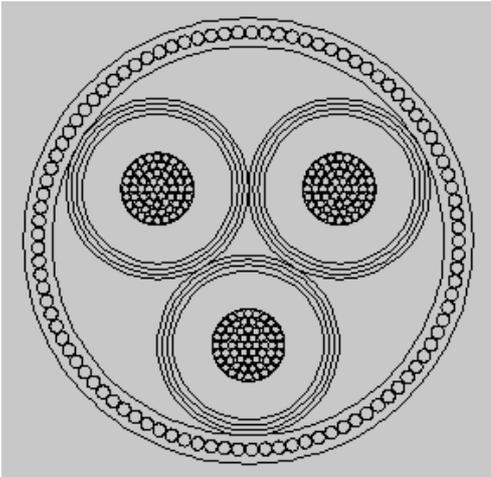


Figura 55. Modelo 4 2D

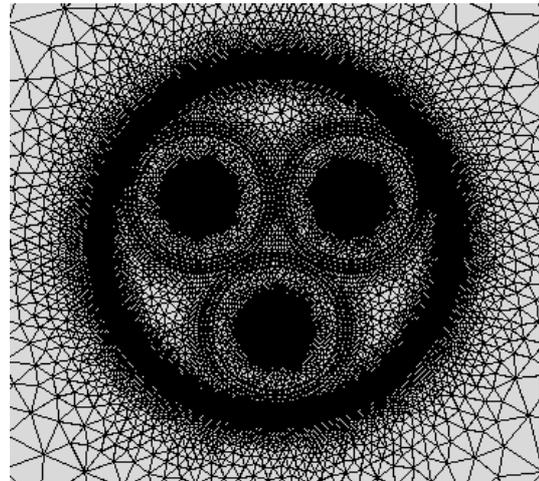


Figura 56. Modelo 4 2D mallado

➤ Modelo 5:

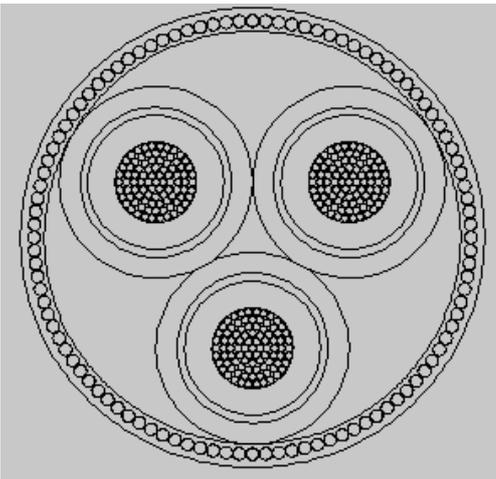


Figura 57. Modelo 5 2D

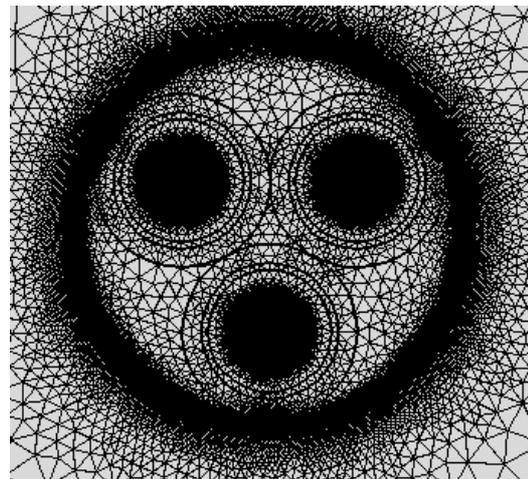


Figura 58. Modelo 5 2D mallado

➤ Modelo 6:

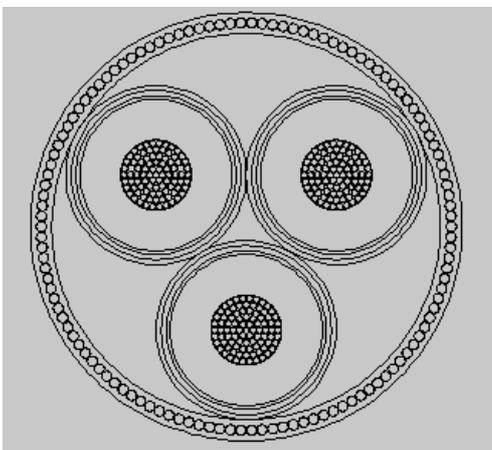


Figura 59 Modelo 6 2D

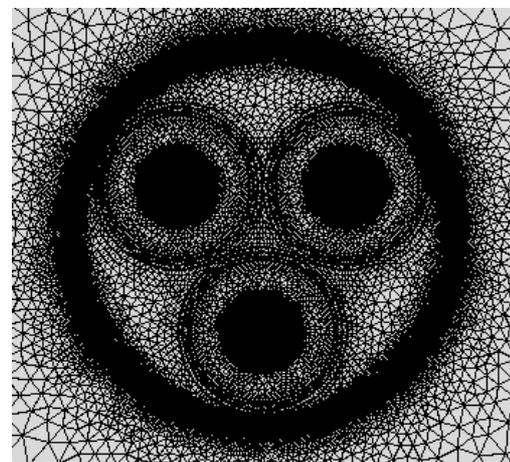


Figura 60. Modelo 6 2D mallado

Fruto del estudio de estos modelos:

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS				
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRDIDAS RESISTIVAS CONDUCTORES (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS ARMADURA (W/m)
2D	Modelo 1	8,4165	2,0752	1,2702
	Modelo 2	7,2057	2,2893	1,2621
	Modelo 3	28,212	8,9947	6,027
	Modelo 4	20,251	4,8125	3,2906
	Modelo 5	20,456	10,63	4,1153
	Modelo 6	14,144	6,5499	3,3874

Tabla 16. Pérdidas resistivas modelos 2D

Valores a partir de los cuales se obtienen unos valores de λ_1 y λ_2 :

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS			
DIMENSIÓN	CABLE	λ_1	λ_2
2D	Modelo 1	0,2466	0,1509
	Modelo 2	0,3177	0,1752
	Modelo 3	0,3188	0,2136
	Modelo 4	0,2376	0,1625
	Modelo 5	0,5197	0,2012
	Modelo 6	0,4631	0,2395

Tabla 17. λ_1 y λ_2 modelos 2D

6.2.1 Comparación simulación 2D vs analítico

Una vez han sido estudiadas las pérdidas de potencia por unidad de longitud tanto por fases como por pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, y han sido obtenidos los valores de λ_1 y λ_2 para cada uno de los citados modelos en el anterior estudio bidimensional, se procede a comparar los resultados obtenidos con los obtenidos de forma analítica a través de los programas diseñados en Matlab y basados en la UNE 21144-1-1.

DIMENSIÓN	CABLE	RESULTADOS ANALÍTICOS		RESULTADOS DE SIMULACIÓN 2D	
		λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
2D	Modelo 1	0,3917	0,3689	0,2466	0,1509
	Modelo 2	0,5795	0,5129	0,3177	0,1752
	Modelo 3	0,5578	0,7545	0,3188	0,2136
	Modelo 4	0,5043	0,5704	0,2376	0,1625
	Modelo 5	0,7814	0,6835	0,5197	0,2012
	Modelo 6	0,7256	0,7575	0,4631	0,2395

Tabla 18. Comparación lambdas analítico y de simulación 2D

VALORES DE λ_1

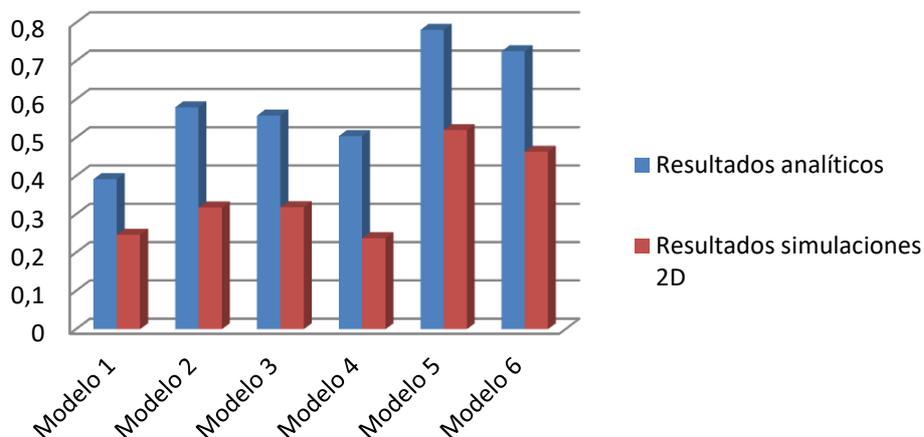


Figura 61. Comparación λ_1 analítico vs 2D

VALORES DE λ_2

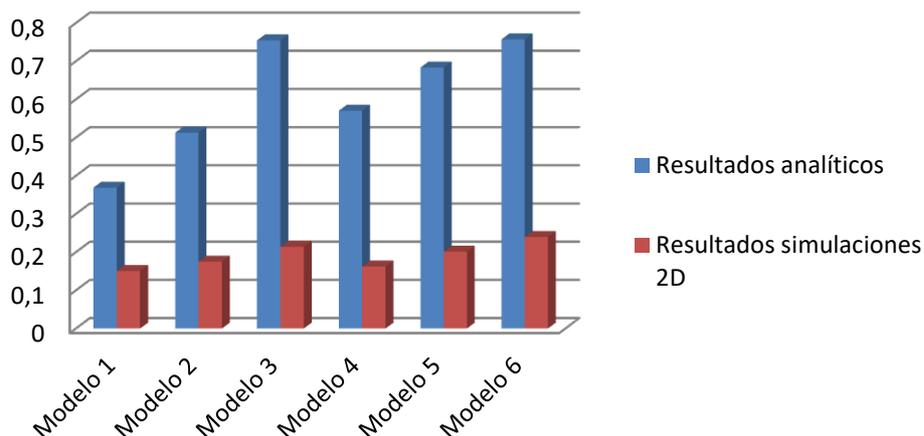


Figura 62. Comparación λ_2 analítico vs 2D

La comparación en porcentaje que relacionan los valores de λ_1 y λ_2 son las siguientes:

RELACIÓN	
λ_1	λ_2
63%	41%
55%	34%
57%	28%
47%	28%
66%	29%
64%	32%

Tabla 19. Comparación lambdas analítico y de simulación 2D

Tal y como se observa en la gráfica anterior:

- Los valores de λ_1 obtenidos mediante simulaciones para modelos 2D son entre el 50% y el 65%, aproximadamente, de los obtenidos de forma analítica.
- Por su parte, los valores de λ_2 obtenidos mediante simulaciones con modelos 2D son, aproximadamente, entre un 30% y un 40% de los obtenidos de forma analítica.

Como conclusión final de este estudio se puede observar que los valores de λ_1 y λ_2 obtenidos por ambos métodos no son similares. Esto es debido a que la formulación analítica tiene en cuenta principalmente factores bidimensionales del cable, tales como la separación entre conductores, el radio medio de la pantalla, el radio medio de la armadura, etc, y características físicas de los materiales que componen cada uno de los elementos del cable (tipo de material, conductividad, resistividad, etc), pero no tienen en cuenta la influencia en estas pérdidas del trenzado de los hilos de las fases ni de los hilos de la armadura, el campo magnético generado en el interior del cable y la consecuente circulación de corriente que circulan por los hilos de la armadura. Por su parte, el modelo bidimensional, tampoco tiene en cuenta estos aspectos, pero existe una circulación de corriente longitudinal por los hilos. Al ser un modelo 2D, cada hilo tiene una posición fija respecto a las fases, por lo que en cada uno de ellos circulará una corriente distinta en función de dicha posición, de forma que la corriente total que circula por la armadura es prácticamente nula, pero no lo es de forma individual por cada uno de los hilos. Este hecho provoca que haya un aumento de pérdida por los hilos de la armadura. Este hecho se observa en la siguiente figura:

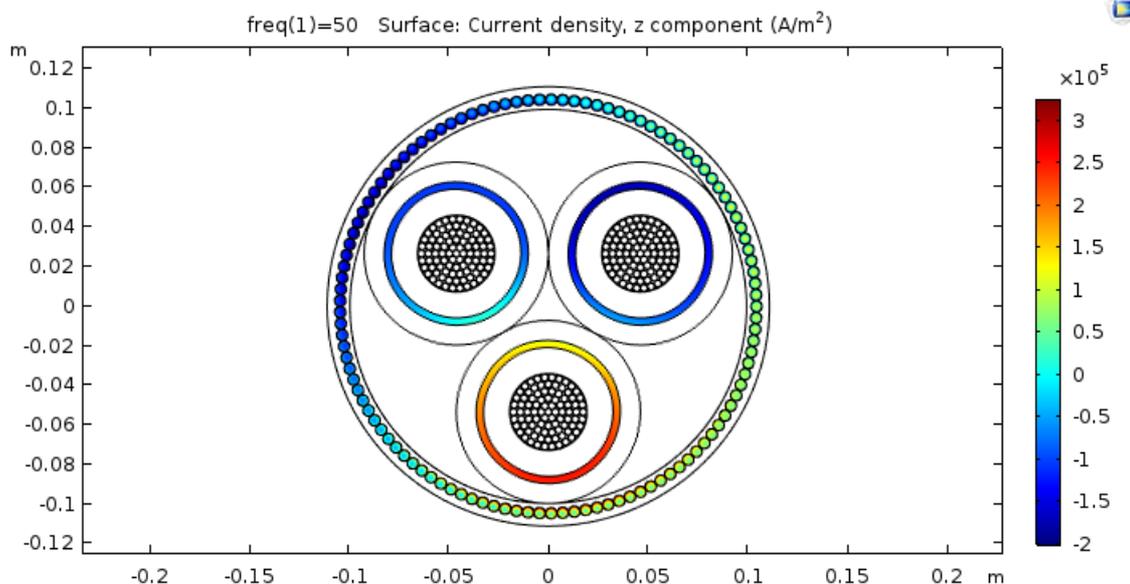


Figura 63. Circulación de corrientes por hilos de armadura

A su vez, en ella se observa también que no hay corrientes circulando dentro de cada hilo en el plano del modelo (inducidas), ya que estas se originan por el flujo de campo magnético variable que se queda atrapado en los hilos y los recorre por dentro de forma longitudinal, y esto no se da en modelos 2D.

Por todo ello, el cálculo de lambdas por ambos métodos tiene sus propias consideraciones que provocan que sus valores sean distintos.

A continuación se procede a realizar un estudio 2.5D y posteriormente uno 3D, para poder obtener unas conclusiones más certeras.

6.3 Resultados de los modelos 2.5D

Tal y como se ha comentado anteriormente, un estudio 2.5D no es más que un modelo 2D en el que se intenta reflejar lo que sucede en un modelo 3D. En estos últimos, al estar los hilos de la armadura trenzados alrededor de las fases, en ellos se inducen tensiones entre sus extremos. Esta tensión resulta ser nula por la simetría de las corrientes y la geometría (todos los hilos terminan rodeando un mismo número de veces a las tres fases). Por tanto no circula corriente por ellos de forma longitudinal.

Por ello, el modelo 2.5D consiste en un modelo bidimensional en el cual se añade un circuito eléctrico de manera que fuerce a que la corriente que pase por los hilos de la armadura sea nula.

El objetivo, al igual que en los modelos bidimensionales, es analizar los valores de pérdidas resistivas por fases, pantallas y armaduras, estudiar los valores de lambdas obtenidos y compararlos con los ya conocidos del modelado 2D y los valores analíticos.

Cada uno de estos modelos tipo, serán estudiados, al igual que en los casos anteriores, con un diámetro de hilos de la armadura de 6 milímetros y una separación entre hilos, delta, de 0,3 milímetros. Además, los resultados obtenidos se representaran en unidades de watos por metro.

El resultado de la construcción geométrica de estos modelos en Comsol Multphysics y de su posterior mallado es el idéntico a los dados en el modelo 2D puesto que geoméricamente no presentan variación.

Del estudio de estos modelos se obtienen las siguientes pérdidas:

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS				
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRDIDAS RESISTIVAS CONDUCTORES (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS ARMADURA (W/m)
2.5D	Modelo 1	8,4948	2,9118	0,046701
	Modelo 2	7,306	3,18	0,048682
	Modelo 3	28,878	11,967	0,25395
	Modelo 4	20,593	6,3384	0,14479
	Modelo 5	20,949	13,556	0,1631
	Modelo 6	14,857	9,4061	0,16002

Tabla 20. Pérdidas resistivas modelos 2.5D

Y los valores de λ_1 y λ_2 obtenidos son los siguientes:

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS			
DIMENSIÓN	CABLE	λ_1	λ_2
2.5D	Modelo 1	0,3428	0,0055
	Modelo 2	0,4353	0,0067
	Modelo 3	0,4144	0,0088
	Modelo 4	0,3078	0,0070
	Modelo 5	0,6471	0,0078
	Modelo 6	0,6331	0,0108

Tabla 21. λ_1 y λ_2 modelos 2.5D

6.3.1 Comparación de simulaciones 2.5D vs 2D y analítico

Una vez han sido estudiadas las pérdidas de potencia por unidad de longitud tanto por fases como por pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, y han sido obtenidos los valores de λ_1 y λ_2 para cada uno de los citados modelos en el anterior estudio 2.5D, se procede a comparar los resultados obtenidos con los obtenidos mediante simulaciones 2D y de forma analítica a través de los programas diseñados en Matlab y basados en la UNE 21144-1-1.

DIMENSIÓN	CABLE	RESULTADOS ANALÍTICOS		RESULTADOS DE SIMULACIÓN 2D		RESULTADOS DE SIMULACIÓN 2.5D	
		λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
2D	Modelo 1	0,3917	0,3689	0,2466	0,1509	0,3428	0,0055
	Modelo 2	0,5795	0,5129	0,3177	0,1752	0,4353	0,0067
	Modelo 3	0,5578	0,7545	0,3188	0,2136	0,4144	0,0088
	Modelo 4	0,5043	0,5704	0,2376	0,1625	0,3078	0,0070
	Modelo 5	0,7814	0,6835	0,5197	0,2012	0,6471	0,0078
	Modelo 6	0,7256	0,7575	0,4631	0,2395	0,6331	0,0108

Tabla 22. Comparación lambdas analítico y de simulación 2D y 2.5D

VALORES DE λ_1

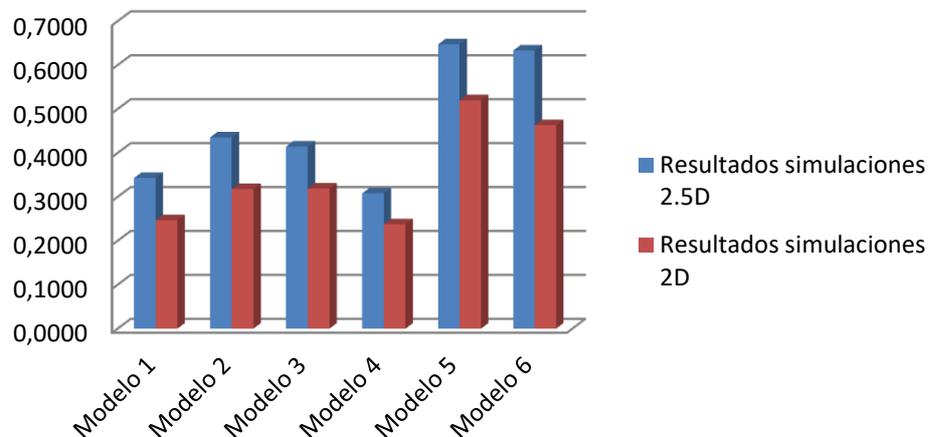


Figura 64. Comparación λ_1 de simulaciones 2D vs 2.5D

VALORES DE λ_2

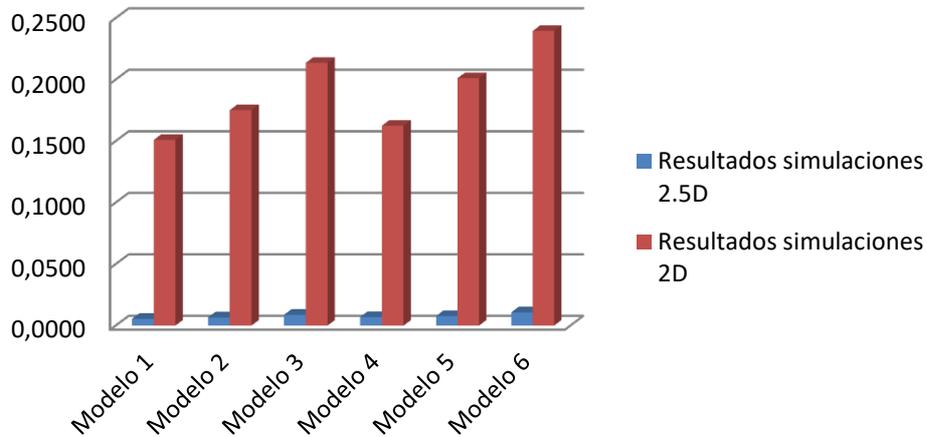


Figura 65. Comparación λ_2 de simulaciones 2D vs 2.5D

La comparación en porcentaje que relacionan los valores de λ_1 y λ_2 para el estudio de simulaciones numéricas 2D y 2.5D son las siguientes:

RELACIÓN
λ_1
72%
73%
77%
77%
80%
73%

Tabla 23. Comparación lambdas de simulaciones 2D y 2.5D

Como se puede observar de la tabla anterior, los valores de λ_1 en modelos 2D son, aproximadamente, entre un 70% y un 80% de los que se obtienen en modelos 2.5D.

En este caso, al forzar que la corriente por cada hilo de la armadura sea cero, se observa que no circula corriente de forma longitudinal por los hilo (aproximadamente cero).

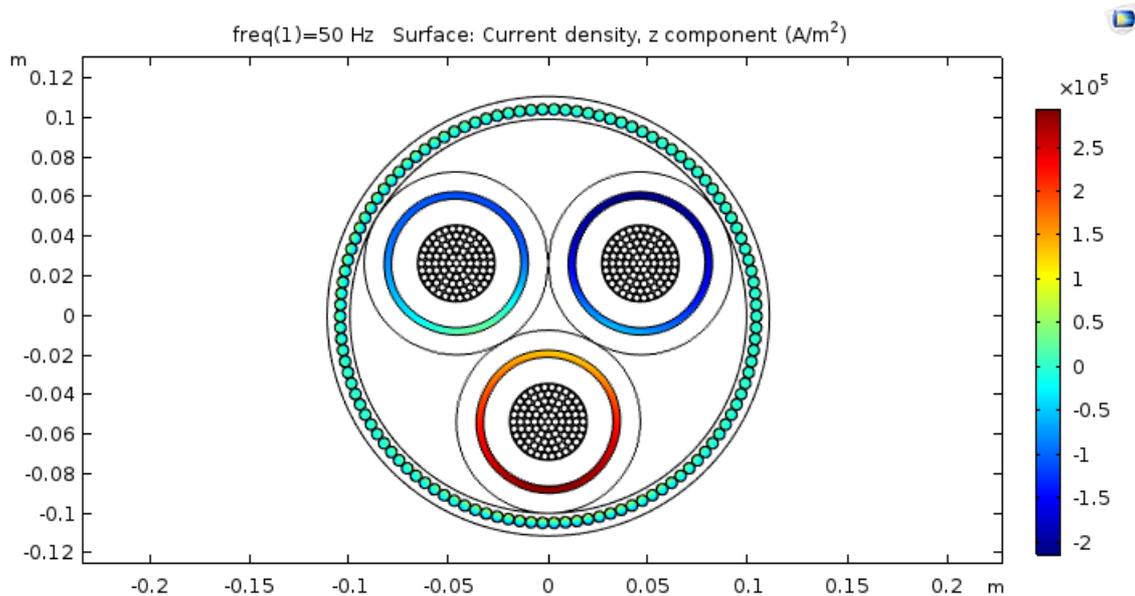


Figura 66. Circulación de corrientes por hilos de armadura

Dado que al igual que en el estudio 2D no se inducen corrientes circulando en el plano del modelo, al ser también bidimensional, las muy reducidas pérdidas que se producen en los hilos son debido a esa corriente longitudinal que se fuerza a que sea nula, pero que no lo es del todo.

En cuanto a las pantallas, las pérdidas en ellas son principalmente consecuencia de la compresión del campo magnético dentro del cable por efecto del apantallado que produce la armadura de acero por su alta permeabilidad magnética. Dado que las corrientes que circulan por la armadura son muy distintas en cables 2D y 2.5D, el campo magnético generado es distinto y a ello puede deberse el hecho de que las pérdidas por pantallas no sean iguales en ambos estudios.

Finalmente, estos valores serán comparados con ejecuciones 3D.

6.4 Resultados de los modelos 3D

El resultado de la construcción geométrica de estos modelos en Comsol Multiphysics y de su posterior mallado es el siguiente:

- Modelo 1:

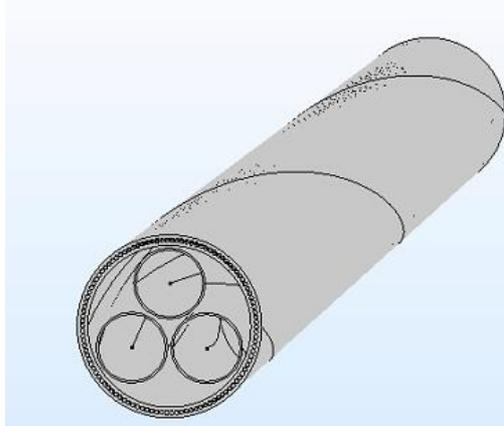


Figura 67. Modelo 1 3D

- Modelo 2:

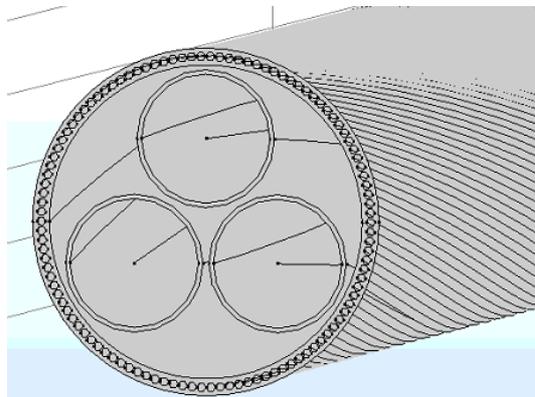


Figura 68. Modelo 2 3D

- Modelo 3:

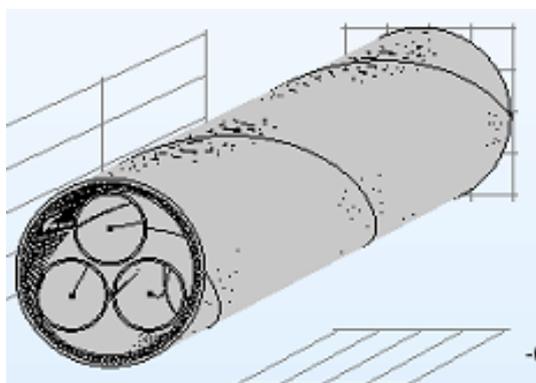


Figura 69. Modelo 3 3D

➤ Modelo 4:

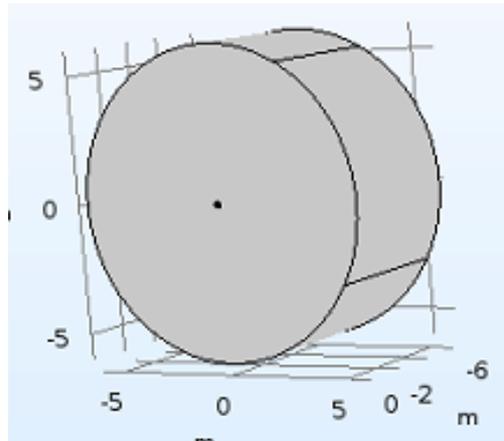


Figura 70. Modelo 4 3D

➤ Modelo 5:

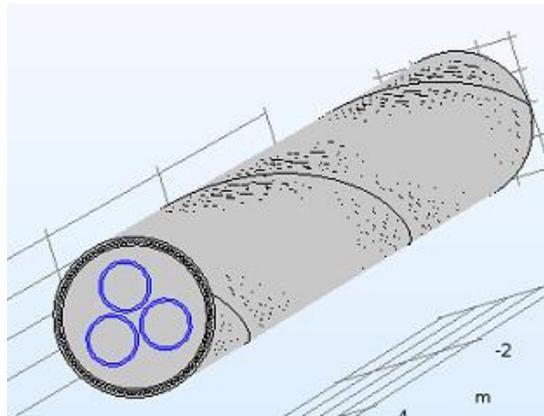


Figura 71. Modelo 5 3D

➤ Modelo 6:

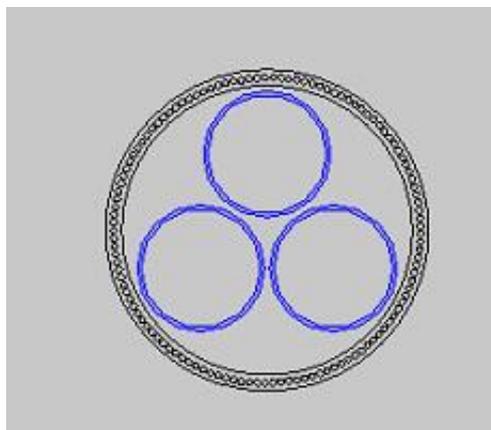


Figura 72 Modelo 6 3D

A continuación se realiza el mallado, para lo cual, el eje longitudinal del cable se distribuye en 400 divisiones. Una vez realizado el mallado, se puede representar el flujo de corriente para cada cable:

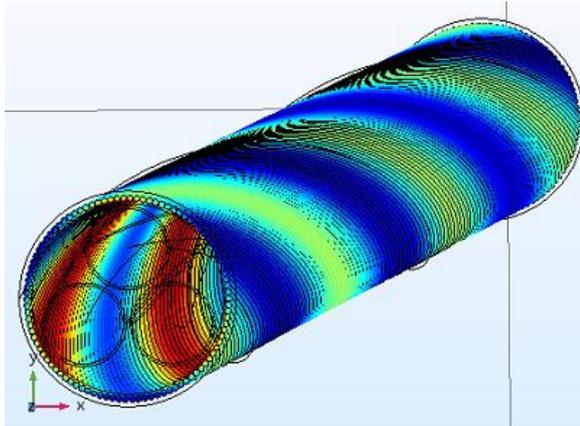


Figura 73. Flujo corriente 3D

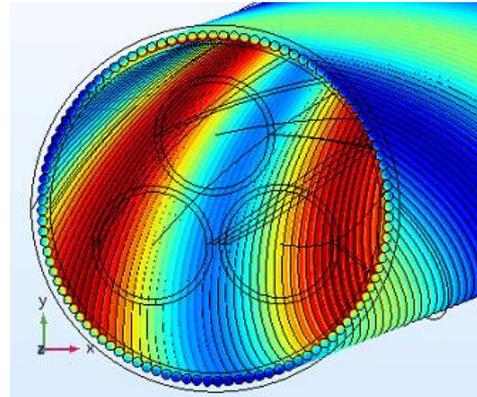


Figura 74. Flujo corriente ampliado 3D

Del estudio de estos modelos se obtienen las siguientes pérdidas:

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS			
DIMENSIÓN	CABLE	PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS (W/m)	PÉRDIDAS RESISTIVAS ARMADURA (W/m)
3D	Modelo 1	2,2262	1,2088
	Modelo 2	2,4557	1,2119
	Modelo 3	10,0188	5,9742
	Modelo 4	5,1897	3,1715
	Modelo 5	8,8118	2,8847
	Modelo 6	7,2487	3,4275

Tabla 24. Pérdidas pantallas y armaduras modelos 3D

6.4.1 Comparación de simulación 3D vs 2D, 2.5D y analítico

PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS (W/m)

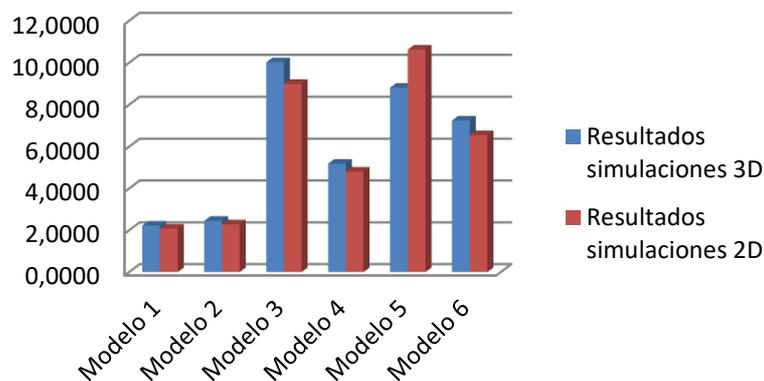


Figura 75. Comparación pérdidas pantallas de simulaciones 2D vs 3D

PÉRDIDAS RESISTIVAS ARMADURA (W/m)

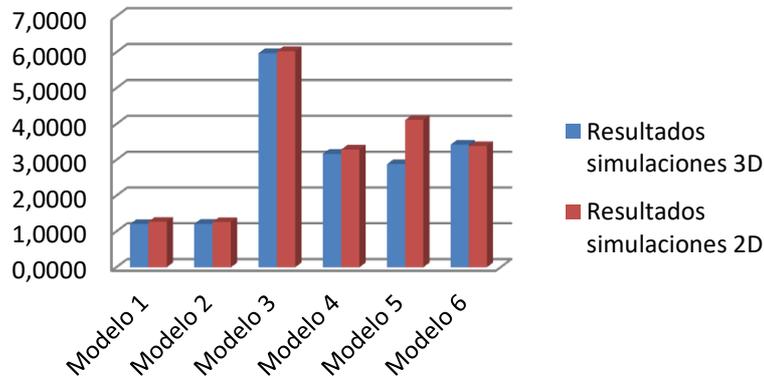


Figura 76. Comparación pérdidas armaduras de simulaciones 2D vs 3D

PÉRDIDAS RESISTIVAS PANTALLAS (W/m)

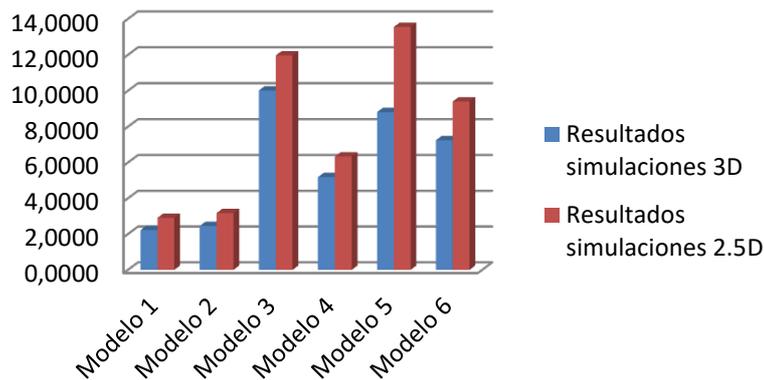


Figura 77. Comparación pérdidas pantallas de simulaciones 2.5D vs 3D

PÉRDIDAS RESISTIVAS ARMADURA (W/m)

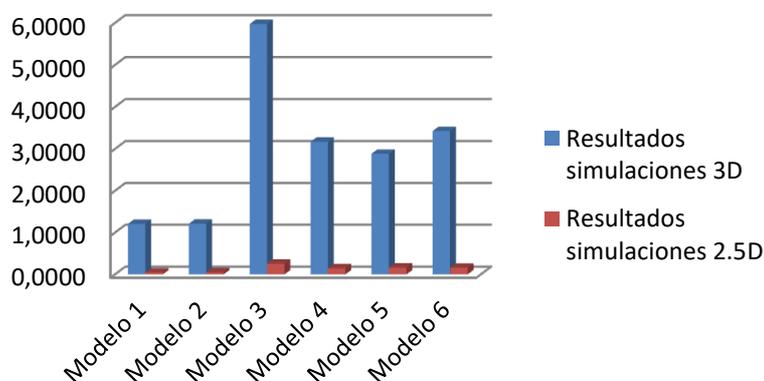


Figura 78. Comparación pérdidas armaduras de simulaciones 2.5D vs 3D

RELACIÓN PÉRDIDAS			
DIMENSIÓN	CABLE	PANTALLAS	ARMADURA
2D y 3D	Modelo 1	93%	105%
	Modelo 2	93%	104%
	Modelo 3	90%	101%
	Modelo 4	93%	104%
	Modelo 5	121%	143%
	Modelo 6	90%	99%

Tabla 25. Comparación pérdidas de simulaciones 2D y 3D

RELACIÓN PÉRDIDAS		
DIMENSIÓN	CABLE	PANTALLAS
2.5D 3D	Modelo 1	76%
	Modelo 2	77%
	Modelo 3	84%
	Modelo 4	82%
	Modelo 5	65%
	Modelo 6	77%

Tabla 26. Comparación pérdidas pantallas de simulaciones 2.5D y 3D

En este caso, apenas circula corriente longitudinal como si sucede en los casos 2D y 2.5D, pero, al ser tridimensional, se induce un flujo de campo magnético variable que queda atrapado dentro de los hilos de la armadura y los recorre de forma longitudinal. Este flujo, al ser variable y atravesar la sección de cada hilo, induce corrientes que circulan de forma perpendicular a él, quedando encerradas dentro de la propia sección del hilo.

A su vez, a lo largo de la longitud del cable, los hilos de la armadura ocuparán una posición concreta respecto a las fases en función de los trenzados de las mismas, por lo que la corriente que se induce en dichos hilos no

va a ser uniforme a lo largo de toda su longitud. Este hecho se puede observar en la siguiente imagen:

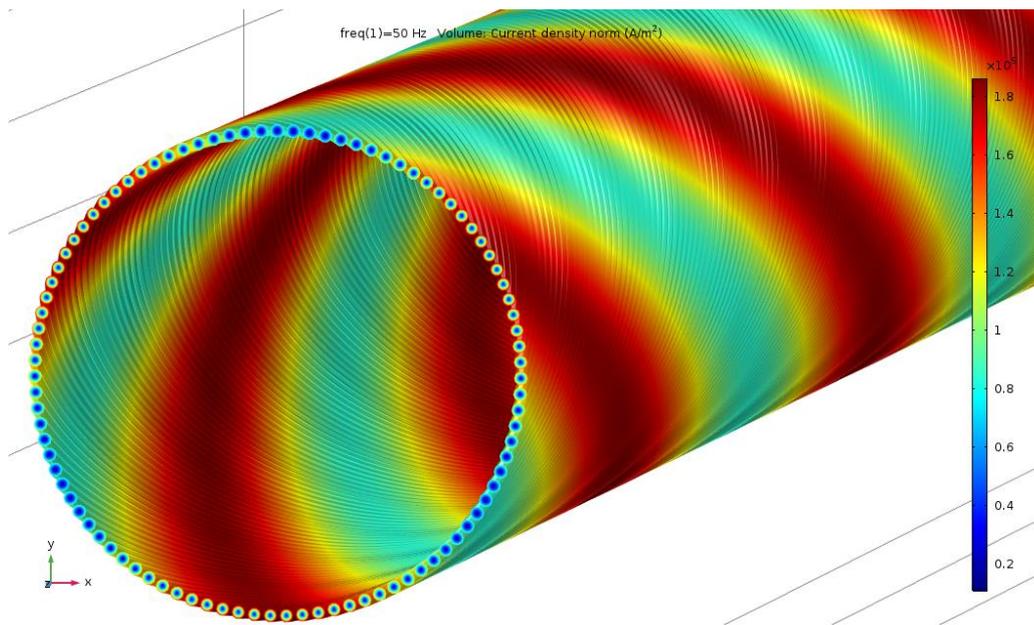


Figura 79. Circulación de corrientes por hilos

En la figura anterior se muestra lo comentado. Cómo no existe circulación de corriente de forma longitudinal por los hilos pero sí existe un flujo magnético que induce una corriente que circula de forma perpendicular a dicho flujo en el interior de la propia sección del hilo. A su vez, se observa también como la densidad de corriente no es constante a lo largo de un hilo, varía en función de su posición con respecto a las fases.

Como conclusión principal de estos resultados, se puede observar que las simulaciones 3D presentan resultados que se asemejan más a los obtenidos en simulaciones 2D que 2.5D. Por el contrario, los estudios previos predicen que estos estudios 3D deben dar resultados más próximos a los 2.5D. Por ello, se procede a realizar un estudio paramétrico de los cables tipo, para analizar las posibles variaciones que se produzcan en las pérdidas al variar ciertas condiciones de cada modelo.

7 ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL CABLE SUBMARINO

Una vez analizado y comparado las pérdidas de potencia que se producen en los cables submarinos a partir de seis modelos, se realiza un nuevo estudio que permita valorar la variación de las pérdidas en dichos modelos al modificar parámetros dimensionales del cable.

De los resultados obtenidos en los estudios anteriores, se observa que los valores de λ_1 y λ_2 para modelos 2.5D y 3D no son tan parecidos como consideran publicaciones establecidas. Estos estudios 3D han sido realizados para un diámetro de los hilos de la armadura de 0,6 milímetros y una separación de hilos de 0,3 milímetros. A su vez, se ha considerado el mismo paso de trenzado para fases y armaduras.

En este epígrafe se procede a modificar los parámetros citados, para analizar cuál es la geometría del cable que produce menos pérdidas y comparar sus valores con los modelos 2D y 2.5D

7.1 Modificación del paso de pantallas y armaduras en modelos 3D

El objetivo de este estudio es demostrar cuál es la relación de pasos entre los hilos de la armadura y las pantallas y fases que ayudan a reducir las pérdidas de potencia producidas en estos elementos. Hasta el momento, los estudios se han realizado con el mismo paso para fases, pantallas y armaduras, es decir, al tener el cable una longitud de seis metros, el paso ha sido de seis metros.

Para ello, se ha realizado un primer estudio que consiste en estudiar dichas pérdidas en los seis modelos tipos variando el paso de las fases y armadura para un mismo paso de los hilos de la armadura. Posteriormente, el estudio será el inverso, se variará el paso de la armadura manteniendo constante el de las fases y pantallas.

Cabe destacar que en todos los estudios que se muestran, las pérdidas de potencia serán mostradas por unidad de longitud (W/m).

El hecho de realizar un estudio de diferentes pasos y trenzados provoca que un mismo cable, con dos pasos distintos, tenga longitudes distintas, aunque similares. Esto es, un mismo cable de longitud igual a seis metros y con un paso de sus fases y pantallas de seis metros (una única vuelta completa), tendrá una longitud de pantalla menor que si el paso del mismo es de tres metros y las fases y pantallas están obligadas a dar dos vueltas completas.

Por todo ello, al hacer unitarias las pérdidas ocasionadas al variar el paso tanto de armadura como por pantallas, los valores obtenidos no han sido divididos por la longitud total del cable (seis metros) si no por la longitud propia que tengan las pantallas y armaduras en cada situación particular de trenzado y paso.

7.1.1 Paso de pantallas variables y paso de armadura constante en el mismo sentido

El objetivo de este apartado es observar las variaciones de pérdidas de potencia que se producen en pantallas y armaduras al variar el paso de las fases y pantallas manteniendo constante el paso de los hilos de la armadura. Esto es, el trenzado de la armadura da una vuelta completa en una longitud de seis metros. En esta misma longitud, se va a variar el número de vueltas de las fases y las pantallas. En los estudios realizados hasta el momento, estos elementos también daban una única vuelta (mismo paso para todos). En los próximos estudios, las fases y las pantallas darán dos, tres y cuatro vueltas para la misma longitud final de seis metros. Con esto se consigue que las fases y pantallas tengan un mayor grado de torsión que la armadura, al forzarlo a dar dos, tres o cuatro vueltas sobre sí mismo, dando únicamente una vuelta la armadura.

- Relación paso armadura / paso pantallas y fases igual a 2

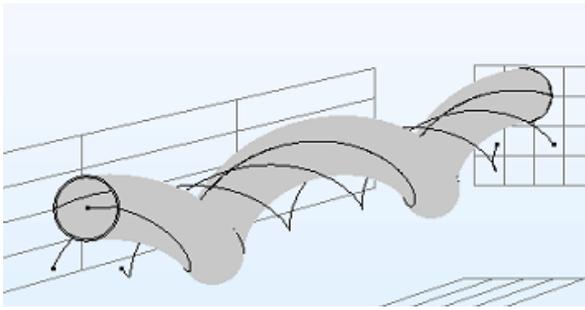


Figura 80. Mitad paso fase y pantalla (a)

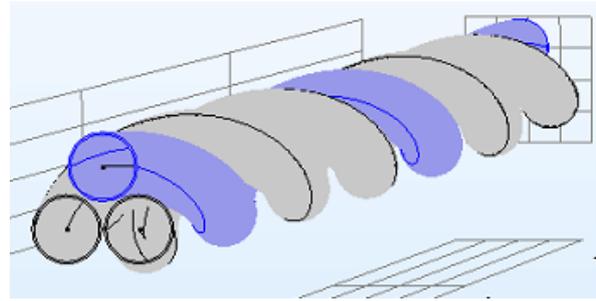


Figura 81. Mitad paso fase y pantalla (b)

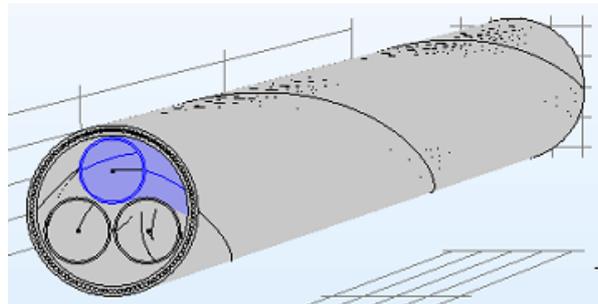


Figura 82. Mitad paso fase y pantalla (c)

- Relación paso armadura / paso pantallas y fases igual a 3

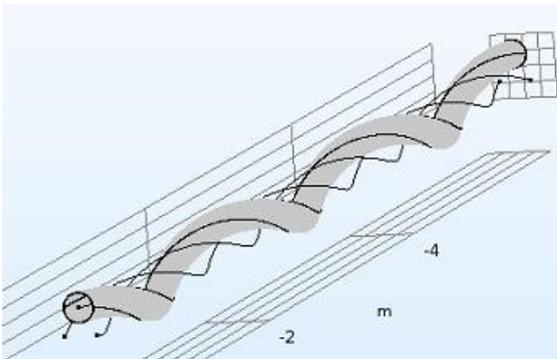


Figura 83. Un tercio paso fase y pantalla (a)

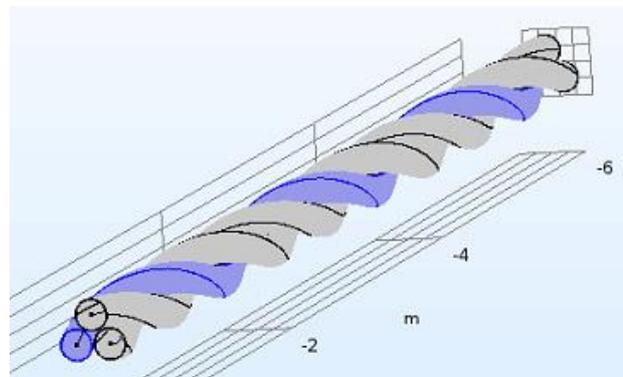


Figura 84. Un tercio paso fase y pantalla (b)

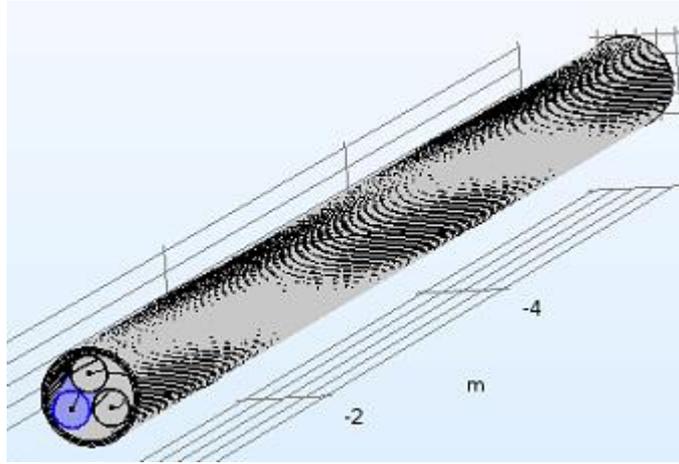


Figura 85. Un tercio paso fase y pantalla (c)

➤ Relación paso armadura / paso pantallas y fases igual a 4

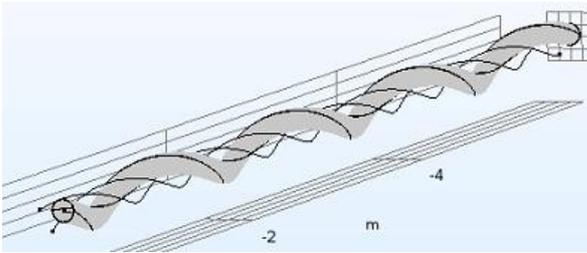


Figura 86. Un cuarto paso fase y pantalla (a)

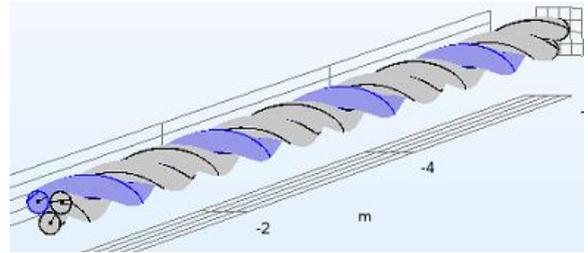


Figura 87. Un cuarto paso fase y pantalla (b)

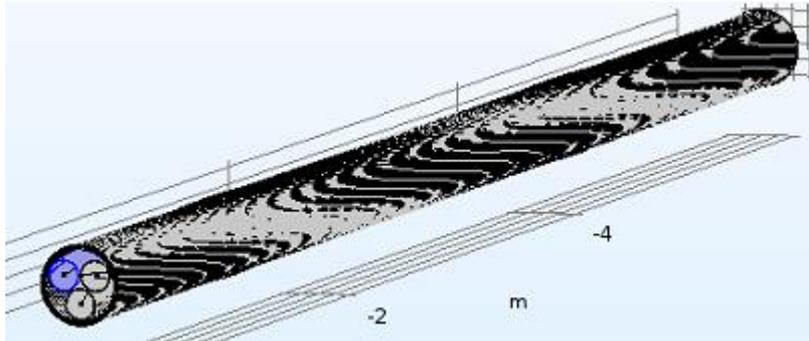


Figura 88. Un cuarto paso fase y pantalla (c)

Los valores de pérdidas de potencia por unidad de longitud obtenidos para los seis modelos tipos son los siguientes:

CABLE	RELACIÓN VUELTAS PANTALLAS - ARMADURA							
	PANT 1 - ARM 1		PANT 2 - ARM 1		PANT 3 - ARM 1		PANT 4 - ARM 1	
	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura
Modelo 1	2,220	1,200	2,843	0,133	3,097	0,335	3,210	0,455
Modelo 2	2,449	1,203	3,155	0,135	3,435	0,338	3,689	0,457
Modelo 3	9,997	5,938	12,477	0,654	13,544	1,684	14,657	2,387
Modelo 4	5,179	3,153	6,379	0,343	6,898	0,887	7,442	1,266
Modelo 5	8,659	2,865	10,428	0,301	11,042	0,777	11,675	1,085
Modelo 6	7,224	3,397	9,558	0,383	10,044	0,986	11,088	1,219

Tabla 27. Pérdidas variación del paso pantallas

Gráficamente:

Pérdidas Pantallas

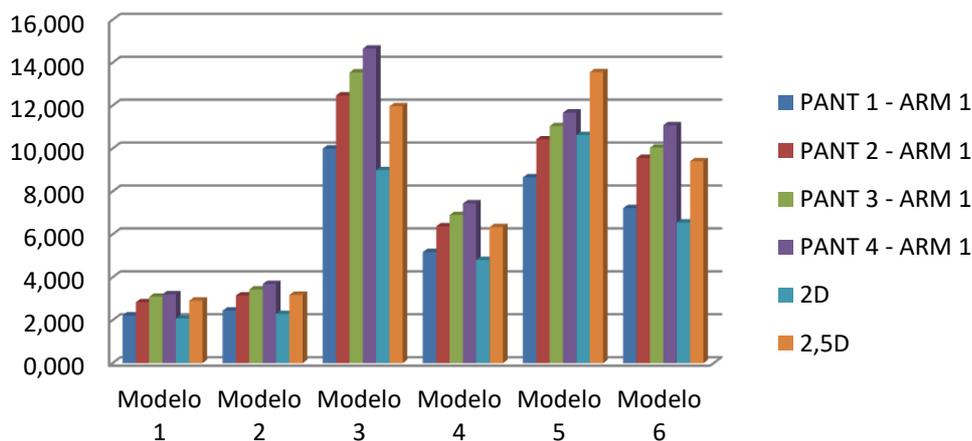


Figura 89. Pérdidas por pantallas distintos pasos pantallas

Pérdidas Armadura

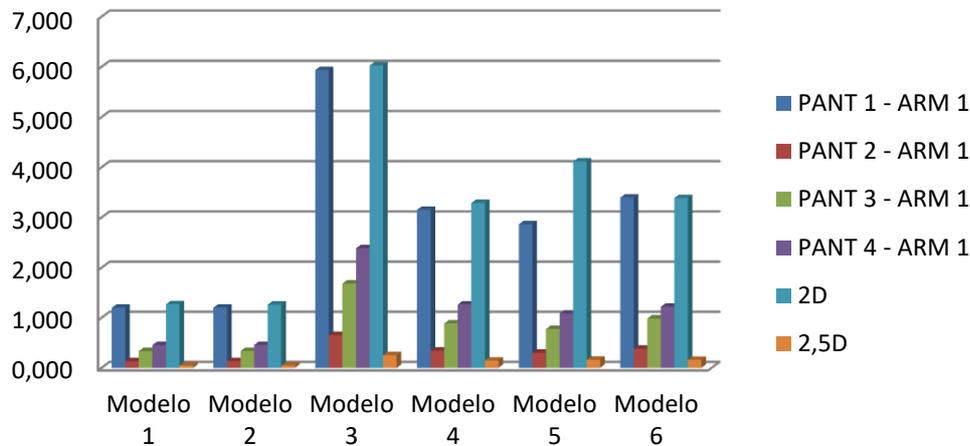


Figura 90. Pérdidas por armadura distintos pasos pantallas

En base al estudio realizado, se puede concluir que, en cuanto a las pérdidas por pantallas, apenas se ven afectadas si variamos su propio paso. En cambio, las pérdidas por los hilos de la armadura se observa un hecho llamativo. Las pérdidas son bastante mayores cuando el paso es el mismo entre pantallas y armaduras y están trenzados en el mismo sentido. Para este caso, el campo magnético generado por las fases es perpendicular a los hilos y, por tanto, la corriente que éste induce, tienden a circular a lo largo del sentido longitudinal de los hilos.

Una vez que el paso de fases y armadura no es el mismo, a mayor diferencia exista entre ambos pasos, más perpendiculares se sitúan los hilos de la armadura de las fases, por lo que el campo magnético generado recorre más la sección longitudinal de los hilos y mayor corriente transversal se induce en ellos. Por tanto, a mayor diferencia de pasos, mayores serán las pérdidas.

Además, se observa que **los resultados de simulaciones 2D están más cercanos a los obtenidos para el mismo paso de trenzado de fases y armadura. Por el contrario, los resultados de los modelos de 2,5D se asemejan más a los obtenidos cuando el paso de las pantallas es la mitad que el de la armadura.**

7.1.2 Paso de pantallas constante y paso de armadura variable en el mismo sentido

El objetivo de este apartado es observar las variaciones de pérdidas de potencia que se producen en pantallas y armaduras al variar el paso de los hilos de la armadura manteniendo constante el paso de las fases y pantallas. Esto es, el trenzado de las fases y pantallas da una vuelta completa en una longitud de seis metros. En esta misma longitud, se va a variar el número de vueltas de los hilos de la armadura. En este estudio, los hilos de la armadura darán dos y tres vueltas para la misma longitud final de seis metros. Con esto se consigue que estos hilos tengan un mayor grado de torsión que las fases y pantallas, al forzarlo a dar dos o tres vueltas sobre sí mismo, dando únicamente una vuelta las fases y pantallas.

- Relación paso pantallas y fases / paso armadura igual a 2

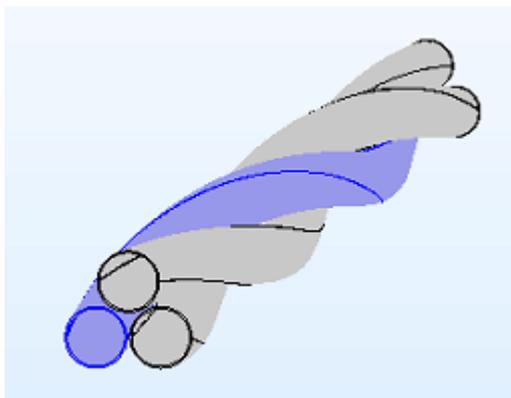


Figura 91. Mitad paso hilos armadura (a)

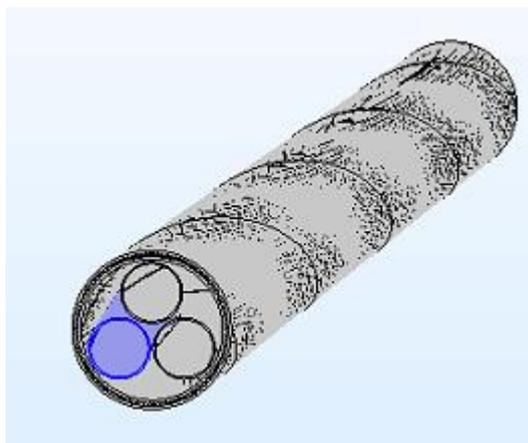


Figura 92. Mitad paso hilos armadura (b)

- Relación paso pantallas y fases / paso armadura igual a 3

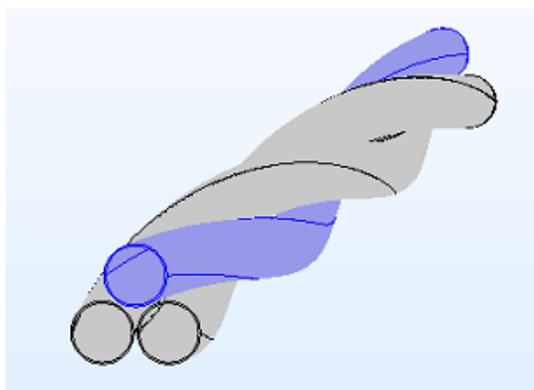


Figura 93. Un tercio paso hilos armadura (a)

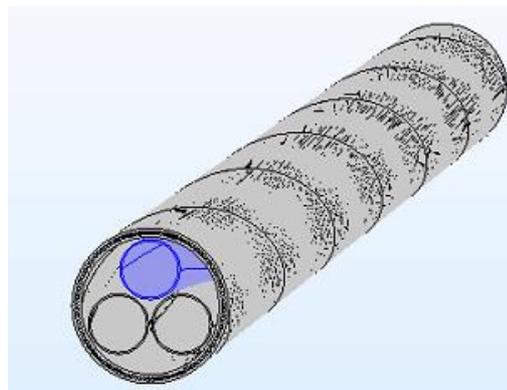


Figura 94. Un tercio paso hilos armadura (b)

Los valores de pérdidas de potencia obtenidos para los seis modelos tipos son los siguientes:

CABLE	RELACIÓN VUELTAS PANTALLAS - ARMADURA					
	PANT 1 - ARM 1		PANT 1 - ARM 2		PANT 1 - ARM 3	
	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura
Modelo 1	2,220	1,200	2,822	0,135	3,121	0.339
Modelo 2	2,449	1,203	3,135	0,136	3,461	0.340
Modelo 3	9,997	5,938	12,414	0,659	13,677	1.706
Modelo 4	5,179	3,153	6,348	0,346	6,962	0.900
Modelo 5	8,796	2,865	10,335	0,306	11,031	0.794
Modelo 6	7,224	3,397	9,484	0,387	7,224	3,324

Tabla 28. Pérdidas variación del paso hilos de armadura

Representando gráficamente estos resultados:

Pérdidas Pantallas

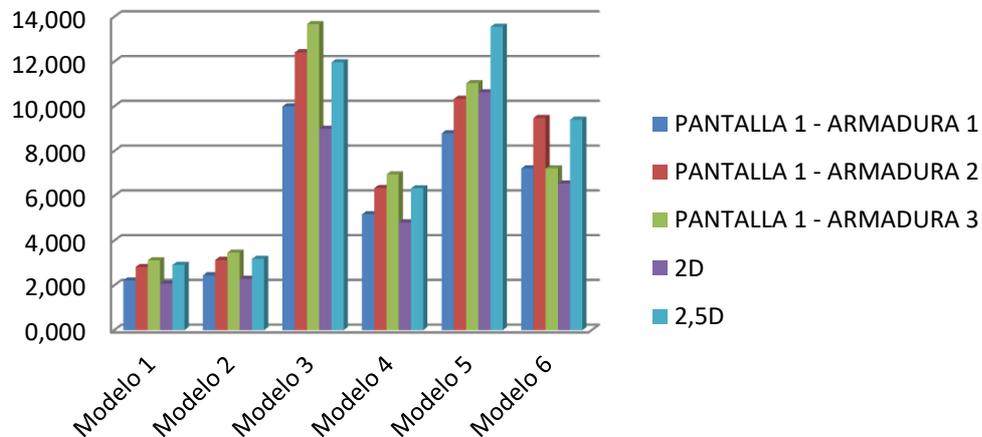


Figura 95. Pérdidas por pantallas distintos pasos armadura

Pérdidas Armadura

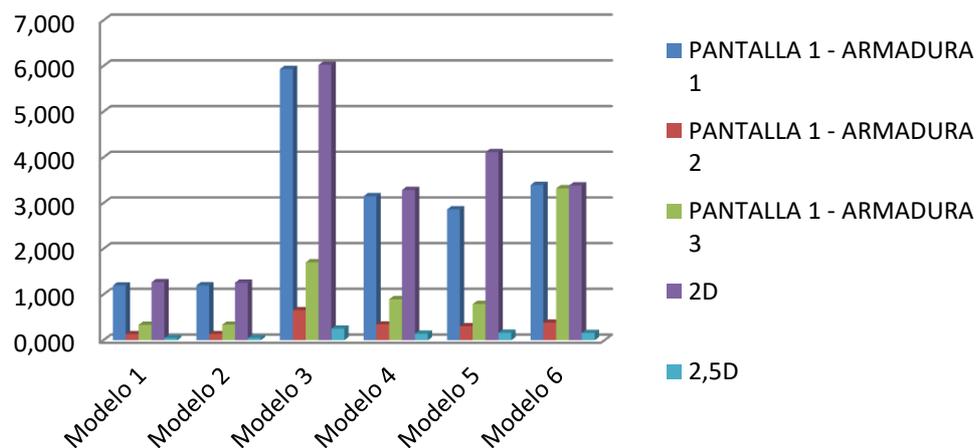


Figura 96. Pérdidas por armadura distintos pasos armadura

En este caso, sucede lo mismo que en el estudio anterior, es decir, **los resultados de simulaciones 2D están más cercanos a los obtenidos para el mismo paso de trenzado de fases y armadura. Por el contrario, los resultados de los modelos de 2.5D se asemejan más a los obtenidos cuando el paso de las pantallas es la mitad que el de la armadura.**

7.1.3 Paso de pantallas variable y paso de armadura constante en sentido opuesto

El objetivo de este apartado es observar las variaciones de pérdidas de potencia que se producen en pantallas y armaduras al variar el paso de las fases y pantallas manteniendo constante el paso de los hilos de la armadura. En este caso, y de forma contraria al apartado anterior, el trenzado de las fases y pantallas se realiza hacia la derecha. Por su parte, los hilos de la armadura hacen lo propio hacia la izquierda.

Este estudio ha sido hecho para Modelo 1 y Modelo 4.

- Relación paso armadura / paso pantallas y fases igual a 2

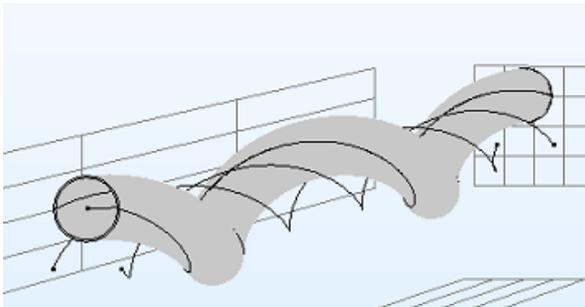


Figura 97. Mitad paso fase y pantalla (a)

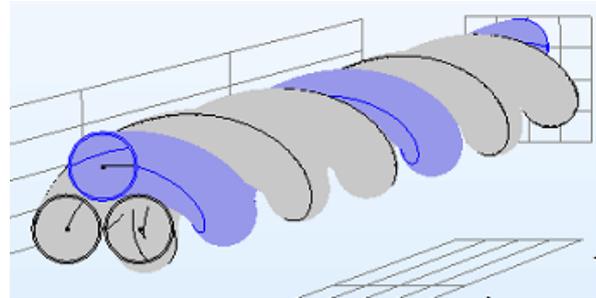


Figura 98. Mitad paso fase y pantalla (b)

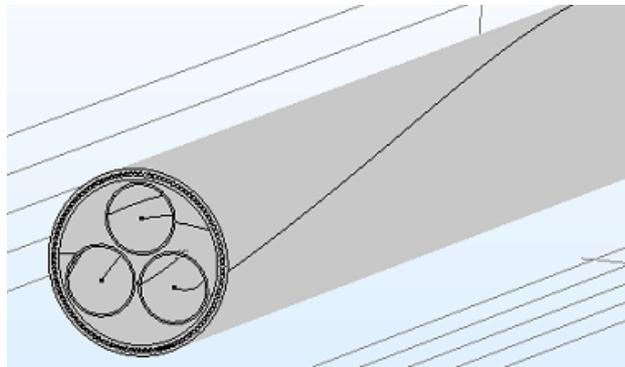


Figura 99. Mitad paso fase y pantalla (c)

- Relación paso armadura / paso pantallas y fases igual a 3

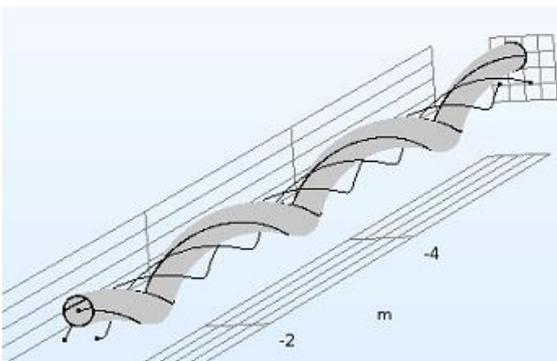


Figura 100. Un tercio paso fase y pantalla (a)

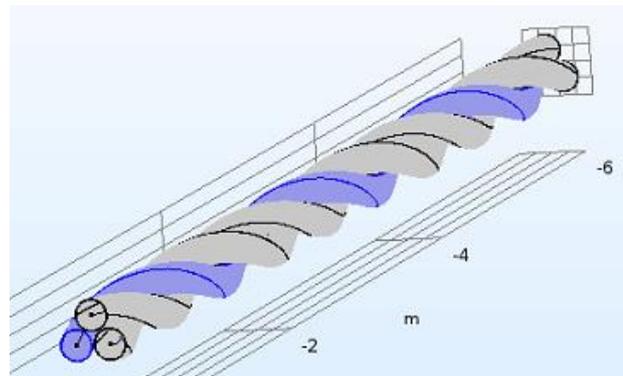


Figura 101. Un tercio paso fase y pantalla (b)

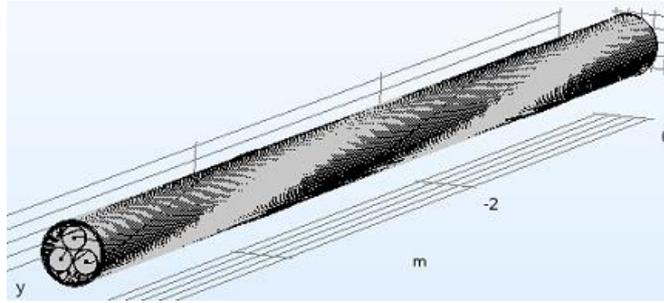


Figura 102. Un tercio paso fase y pantalla (c)

➤ Relación paso armadura / paso pantallas y fases igual a 4

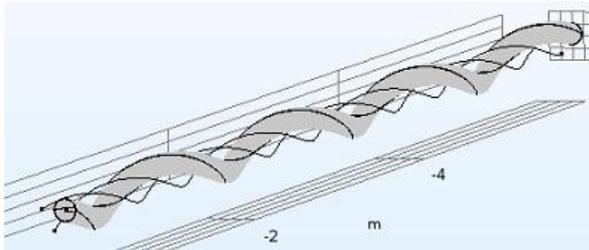


Figura 103. Un cuarto paso fase y pantalla (a)

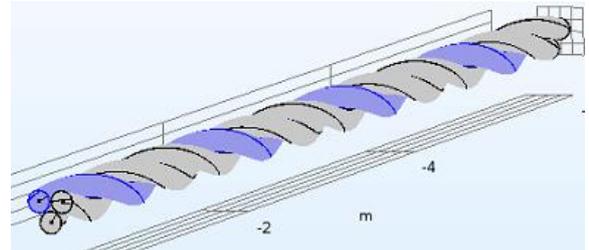


Figura 104. Un cuarto paso fase y pantalla (b)

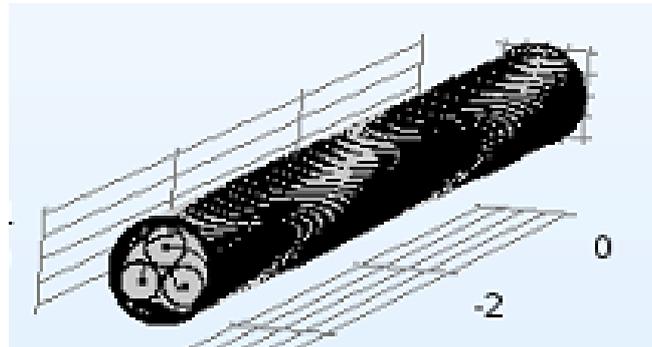


Figura 105. Un cuarto paso fase y pantalla (c)

Los valores de pérdidas de potencia obtenidos para los seis modelos tipos son los siguientes:

CABLE	RELACIÓN VUELTAS PANTALLAS - ARMADURA							
	PANT 1 - ARM 1		PANT 2 - ARM 1		PANT 3 - ARM 1		PANT 4 - ARM 1	
	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura
Modelo 1	3,159	0,377	3,538	0,518	3,798	0,540	3,780	0,500
Modelo 4	7,031	0,983	7,841	1,419	8,352	1,543	8,632	1,480

Tabla 29. Pérdidas variación del paso pantallas

Gráficamente:

Pérdidas Pantallas

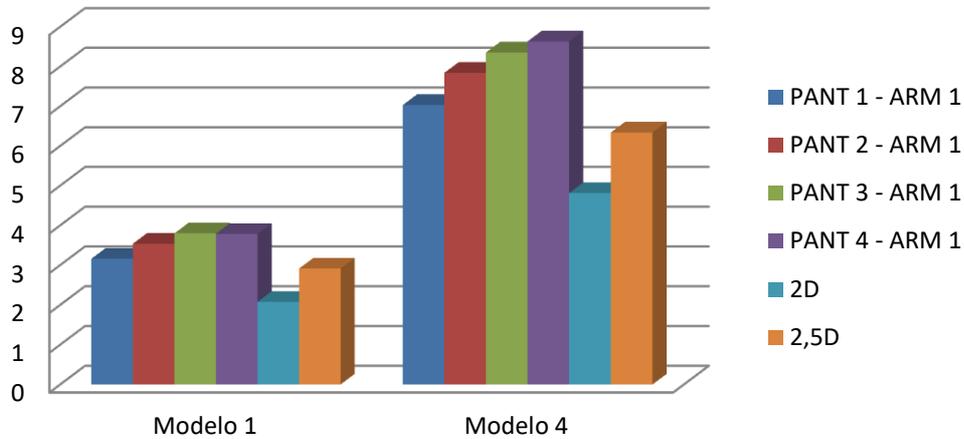


Figura 106. Pérdidas por pantallas distintos pasos pantallas

Pérdidas Armadura

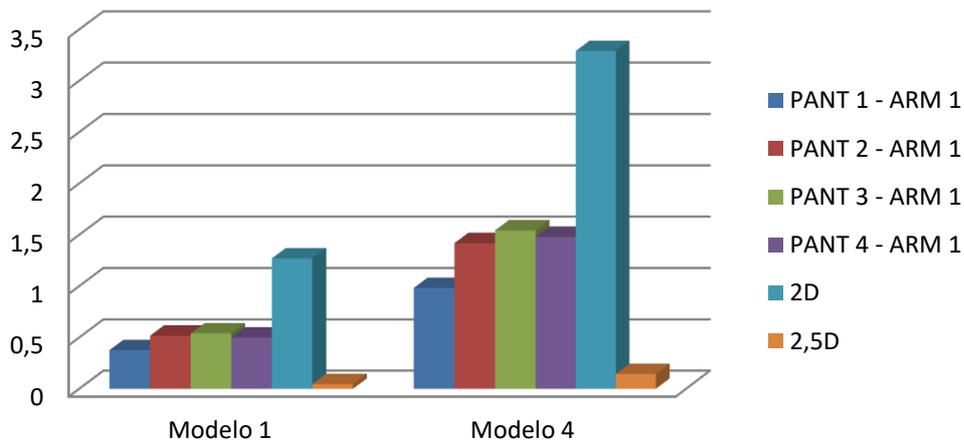


Figura 107. Pérdidas por armadura distintos pasos pantallas

En este estudio, al realizar el trenzado entre las fases y la armadura en sentido opuesto, no sucede lo analizado en el apartado anterior. En este caso, fases y armadura no coinciden en el mismo sentido, por lo que no hay circulación de corriente longitudinal a lo largo de todo el hilo. Por tanto, las pérdidas son ocasionadas por la circulación de corriente transversal inducidas por el campo magnético.

Además, se observa que las simulaciones 2.5 D se asemejan en mayor medida a los 3D que los 2D. En concreto, estos resultados 2.5D están más próximos a los obtenidos en 3D cuando el paso de armadura y fases es el mismo, pero sentido opuesto.

7.1.4 Paso de pantallas constante y paso de armadura variable en sentido opuesto

El objetivo de este apartado es observar las variaciones de pérdidas de potencia que se producen en pantallas y armaduras al variar el paso de los hilos de la armadura manteniendo constante el paso de las fases y pantallas. Esto es, el trenzado de las fases y pantallas da una vuelta completa en una longitud de seis metros. En esta misma longitud, se va a variar el número de vueltas de los hilos de la armadura. En este estudio, los hilos de la armadura darán dos y tres vueltas para la misma longitud final de seis metros. Con esto se consigue que estos hilos tengan un mayor grado de torsión que las fases y pantallas, al forzarlo a dar dos o tres vueltas sobre sí mismo, dando únicamente una vuelta las fases y pantallas.

- Relación paso pantallas y fases / paso armadura igual a 2

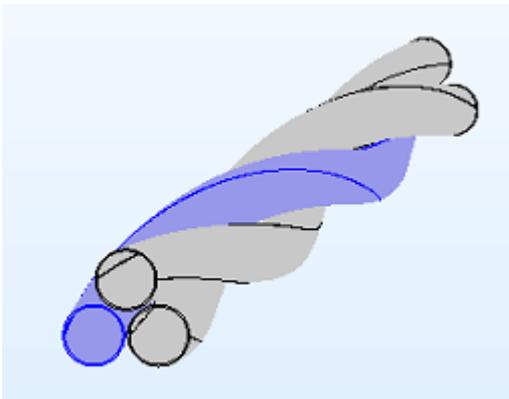


Figura 108. Mitad paso hilos armadura (a)

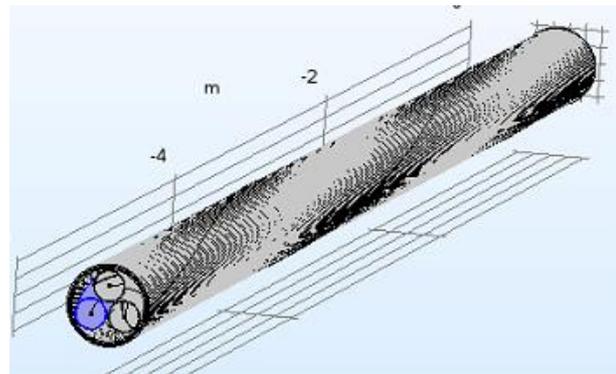


Figura 109. Mitad paso hilos armadura (b)

- Relación paso pantallas y fases / paso armadura igual a 3

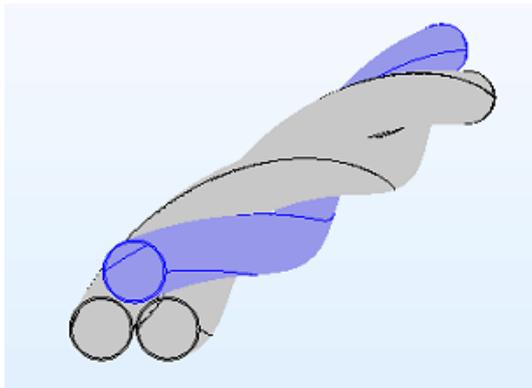


Figura 110. Un tercio paso hilos armadura (a)

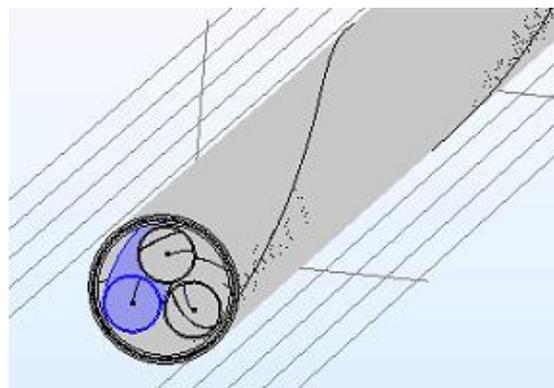


Figura 111. Un tercio paso hilos armadura (b)

Los valores de pérdidas de potencia obtenidos para los seis modelos tipos son los siguientes:

CABLE	RELACIÓN VUELTAS PANTALLAS - ARMADURA					
	PANT 1 - ARM 1		PANT 1 - ARM 2		PANT 1 - ARM 3	
	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura	Perd Pantalla	Perd Armadura
Modelo 1	3,159	0,377	3,554	0,519	3,999	0,710
Modelo 4	7,031	0,983	7,874	1,421	8,818	2,044

Tabla 30. Pérdidas variación del paso hilos de armadura

Representando gráficamente estos resultados:

Pérdidas Pantallas

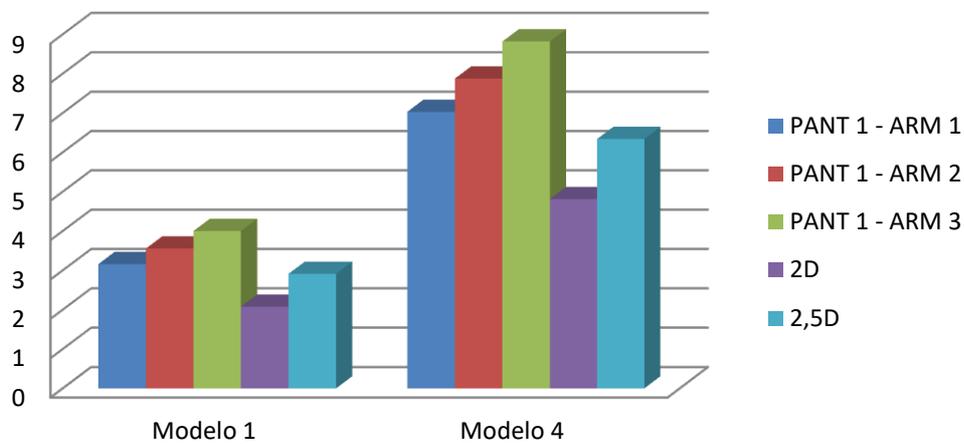


Figura 112. Pérdidas por pantallas distintos pasos armadura

Pérdidas Armadura

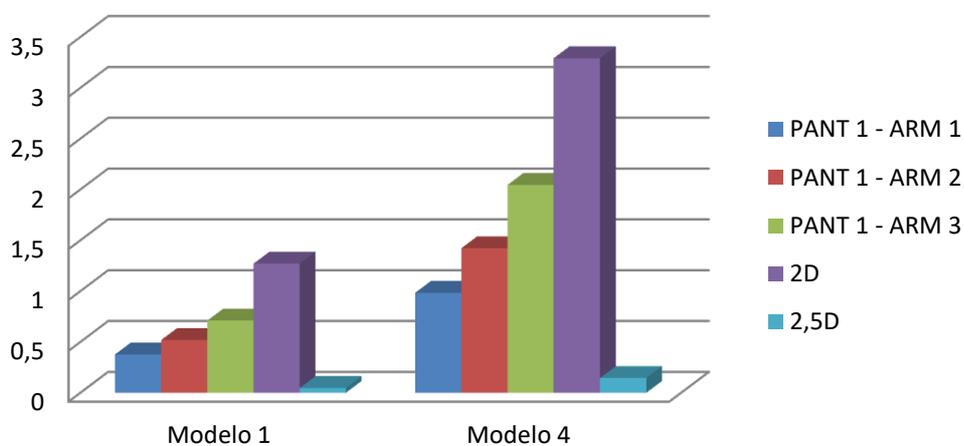


Figura 113. Pérdidas por armadura distintos pasos armadura

De igual forma que en el estudio anterior, se observa que las simulaciones 2.5 D se asemejan en mayor medida a los 3D que los 2D. En concreto, estos resultados 2.5D están más próximos a los obtenidos en 3D cuando el paso de armadura y fases es el mismo, pero sentido opuesto.

7.1.5 Conclusión

De los resultados obtenidos se pueden obtener una serie de conclusiones que serán mostradas con los resultados del Modelo 1.

- De la variación del paso por pantalla:

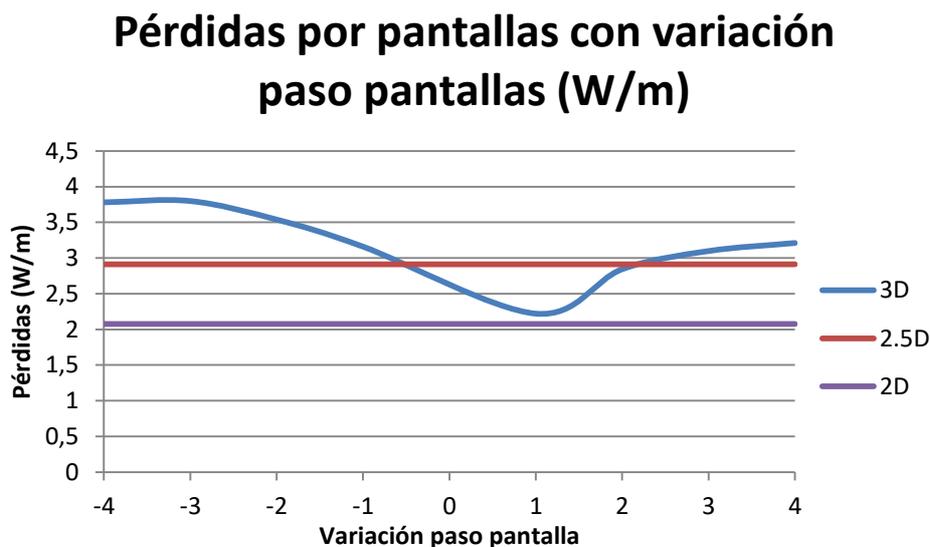


Figura 114. Pérdidas por pantalla con variación paso pantallas

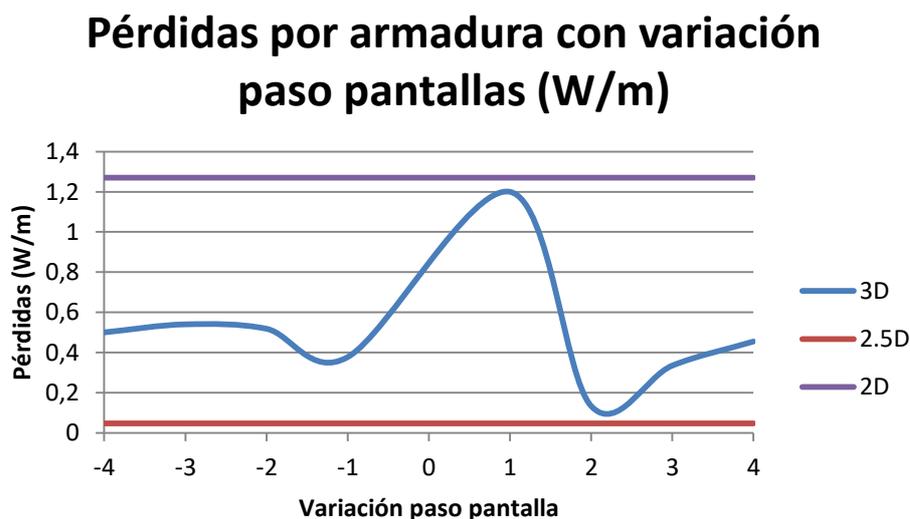


Figura 115. Pérdidas por armadura con variación paso pantallas

Tanto en las pérdidas por pantallas como por armadura se observan que el modelo 3D se asemeja al 2D cuando el trenzado es el mismo sentido y el mismo valor del paso. Por su parte, el modelo 2.5D y el 3D dan un valor de pérdidas similar cuando la pantalla tiene la mitad de paso que la armadura (en el caso de las pérdidas por pantalla también tiene otro punto de aproximación de pérdidas cuando el paso de pantallas y armadura es

el mismo pero en sentido opuesto, pero en este punto, las pérdidas por armadura en el modelo 3D son mayores que en el 2.5D).

➤ De la variación del paso por armadura:

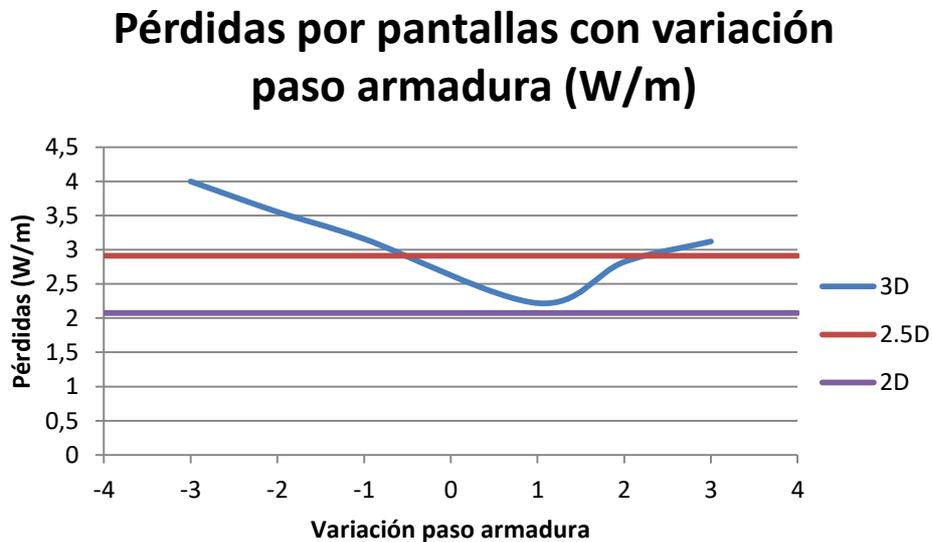


Figura 116. Pérdidas por pantalla con variación paso pantallas

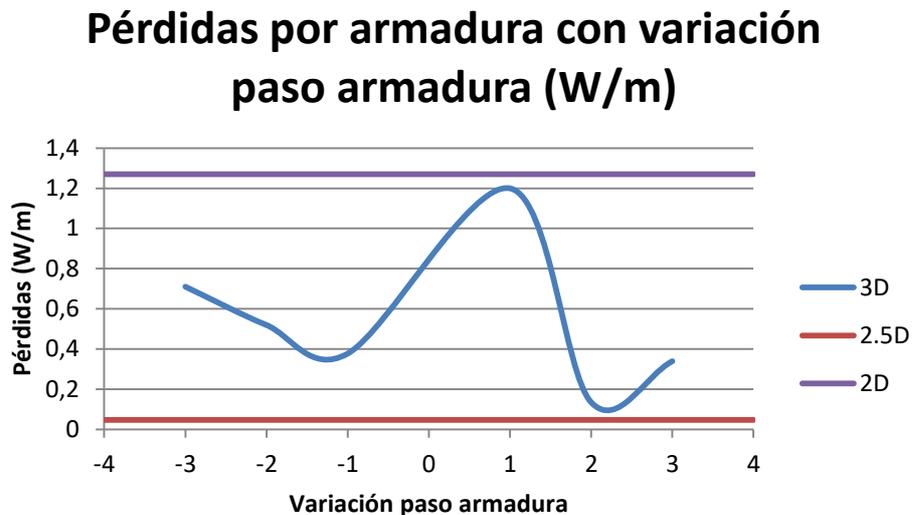


Figura 117. Pérdidas por armadura con variación paso pantallas

Para este caso, y de la misma forma que al variar el paso por las pantallas, el modelo 3D se asemeja al 2D cuando el trenzado es el mismo sentido y el mismo valor del paso. Por su parte, el modelo 2.5D y el 3D dan un valor de pérdidas similar cuando la armadura tiene la mitad de paso que la pantalla (en el caso de las pérdidas por pantalla también tiene otro punto de aproximación de pérdidas cuando el paso de pantallas y armadura es el mismo pero en sentido opuesto, pero en este punto, las pérdidas por armadura en el modelo 3D son mayores que en el 2.5D).

En definitiva, se puede apreciar que las simulaciones 2.5D pueden sustituir a simulaciones 3D cuando armadura y pantalla tengan el mismo paso pero sentido de trenzado opuesto y cuando en el paso de la armadura y pantalla, una sea el doble de la otra con el trenzado en el mismo sentido. Además, en este punto, se consigue optimizar las pérdidas por armadura, consiguiendo así reducir sus pérdidas.

7.2 Variación de parámetros físicos del cable en modelos 2D

El diámetro de los hilos de la armadura es un parámetro que normalmente es diseñado de 4 mm, 5 mm ó 6 mm.

También es conocido que la distancia entre dos hilos de la armadura debe oscilar entre los 0,1 mm y 0,3 mm.

La principal ecuación a utilizar es aquella que relaciona el diámetro de la armadura (D_a), el diámetro de los hilos de la armadura (D_h), la separación entre dos hilos de la armadura (delta, δ) y el número de hilos de la armadura (N). La relación es la siguiente:

$$\pi * D_a = N * D_h + N * \delta \quad (11)$$

Esta ecuación va a permitir realizar variaciones de algunos de sus parámetros, ver como esto modifica al resto de parámetros y estudiar las posibles variaciones que se generen en las pérdidas de potencia de fases, pantallas y armaduras a consecuencia de ello.

Con ello, se ha realizado un estudio con los seis modelos tipos para conocer la variación de las pérdidas en pantallas y armaduras para los distintos valores de diámetros de los hilos especificados, manteniendo la separación entre los hilos constante ($\delta = 0.3$ mm) y para los distintos valores de delta señalados, manteniendo constante el diámetro de los hilos de la armadura ($D_h = 6$ mm), de manera que el parámetro variable sería el número de hilos (N).

El objetivo es obtener unas conclusiones que permitan determinar la constitución física del cable optimizando el valor de pérdidas por pantallas y armaduras.

El número de hilos para cada modelo al variar el diámetro de los hilos manteniendo constante δ y D_a se determina a partir de la fórmula anterior:

	D_h (mm)	δ (mm)	D_a (mm)	N
Modelo 1	4	0,3	221,46	162
	5	0,3	221,46	131
	6	0,3	221,46	110

Tabla 31. N para D_h variable Modelo 1

	D_h (mm)	δ (mm)	D_a (mm)	N
Modelo 2	4	0,3	220,82	161
	5	0,3	220,82	131
	6	0,3	220,82	110

Tabla 32. N para D_h variable Modelo 2

	D_h (mm)	δ (mm)	D_a (mm)	N
Modelo 3	4	0,3	197,4	144
	5	0,3	197,4	117
	6	0,3	197,4	98

Tabla 33. N para D_h variable Modelo 3

	D_h (mm)	δ (mm)	Da (mm)	N
Modelo 4	4	0,3	194,6	142
	5	0,3	194,6	115
	6	0,3	194,6	97

Tabla 34. N para D_h variable modelo 4

	D_h (mm)	δ (mm)	Da (mm)	N
Modelo 5	4	0,3	209	153
	5	0,3	209	124
	6	0,3	209	104

Tabla 35. N para D_h variable Modelo 5

	D_h (mm)	δ (mm)	Da (mm)	N
Modelo 6	4	0,3	243,28	178
	5	0,3	243,28	144
	6	0,3	243,28	121

Tabla 36. N para D_h variable Modelo 6

Por su parte, el número de hilos para cada modelo al variar delta, manteniendo constante el diámetro de los hilos y D_a se determina a partir de la fórmula anterior:

	δ (mm)	D_h (mm)	Da (mm)	N
Modelo 1	0,1	6	221,46	136
	0,2	6	221,46	134
	0,3	6	221,46	131

Tabla 37. N para δ variable Modelo 1

	δ (mm)	D_h (mm)	Da (mm)	N
Modelo 2	0,1	6	220,82	136
	0,2	6	220,82	133
	0,3	6	220,82	131

Tabla 38. N para δ variable Modelo 2

	δ (mm)	D_h (mm)	Da (mm)	N
Modelo 3	0,1	6	197,4	122
	0,2	6	197,4	120
	0,3	6	197,4	117

Tabla 39. N para δ variable modelo 3

	δ (mm)	D_h (mm)	Da (mm)	N
Modelo 4	0,1	6	194,6	120
	0,2	6	194,6	118
	0,3	6	194,6	115

Tabla 40. N para δ variable Modelo 4

	δ (mm)	D_h (mm)	Da (mm)	N
Modelo 5	0,1	6	209	129
	0,2	6	209	126
	0,3	6	209	124

Tabla 41. N para δ variable Modelo 5

	δ (mm)	D_h (mm)	Da (mm)	N
Modelo 6	0,1	6	243,28	150
	0,2	6	243,28	147
	0,3	6	243,28	144

Tabla 42. N para δ variable Modelo 6

7.2.1 Variación del diámetro de los hilos de la armadura

En este primer estudio, se analizan las modificaciones en las pérdidas de potencia de fases, pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, al variar el diámetro de los hilos, manteniendo constante la separación entre dos hilos. Los D_h serán 3,15 mm, 4 mm, 5 mm y 6 mm. A su vez, el valor de delta, δ será de 0,3 mm.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo 1						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	8,660	100%	2,061	100%	1,413	100%
5	8,659	99,99%	2,060	99,95%	1,353	95,78%
6	8,662	100,03%	2,104	102,08%	1,281	90,65%

Tabla 43. Pérdidas para D_h variable modelo 1

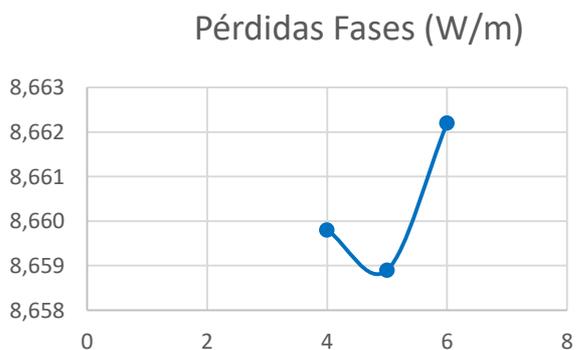


Figura 118. Pérdidas fases Modelo 1

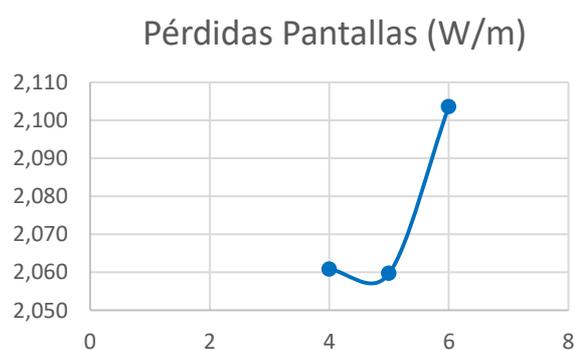


Figura 119. Pérdidas pantallas Modelo 1

Pérdidas Armadura(W/m)

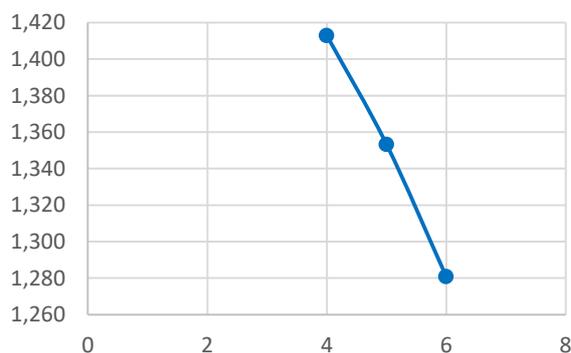


Figura 120. Pérdidas armadura Modelo 1

Modelo 2						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	7,202	100%	2,234	100%	1,390	100%
5	7,201	99,99%	2,238	100,18%	1,333	95,88%
6	7,206	100,06%	2,289	102,49%	1,262	90,82%

Tabla 44. Pérdidas para D_h variable Modelo 2

Pérdidas Fases (W/m)

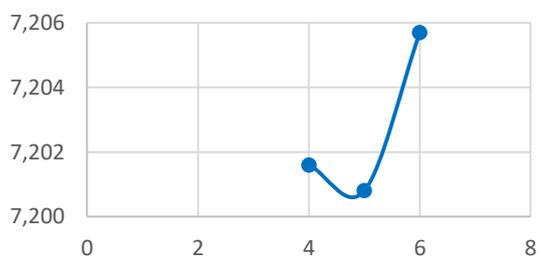


Figura 121. Pérdidas fases Modelo 2

Pérdidas Pantallas (W/m)

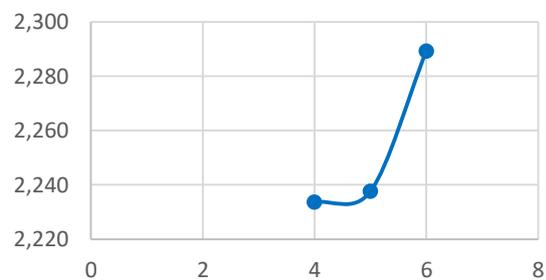


Figura 122. Pérdidas pantallas Modelo 2

Pérdidas Armadura(W/m)

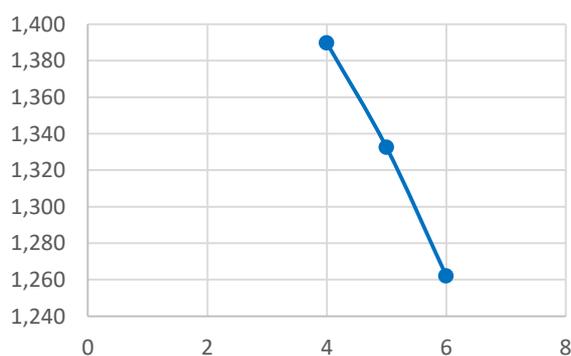


Figura 123. Pérdidas armadura Modelo 2

Modelo 3						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	28,150	100%	8,651	100%	6,425	100%
5	28,159	100,03%	8,728	100,89%	6,274	97,65%
6	28,212	100,22%	8,995	103,98%	6,027	93,81%

Tabla 45. Pérdidas para D_h variable Modelo 3

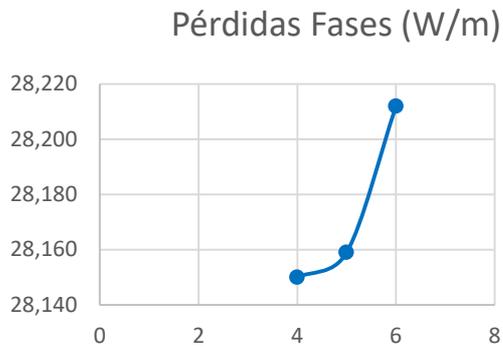


Figura 124. Pérdidas fases Modelo 3

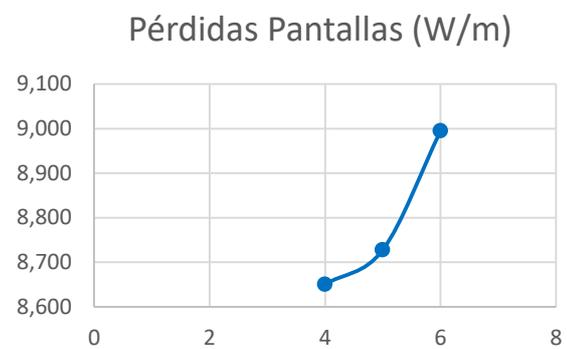


Figura 125. Pérdidas pantallas Modelo 3

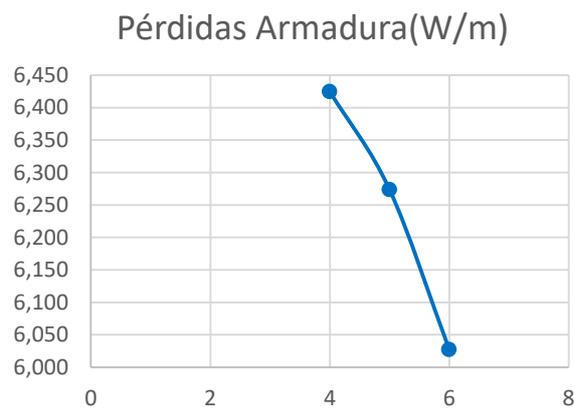


Figura 126. Pérdidas armadura Modelo 3

Modelo 4						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	20,223	100%	4,652	100%	3,566	100%
5	20,222	100,00%	4,665	100,28%	3,443	96,54%
6	20,251	100,14%	4,813	103,46%	3,291	92,28%

Tabla 46. Pérdidas para D_h variable Modelo 4

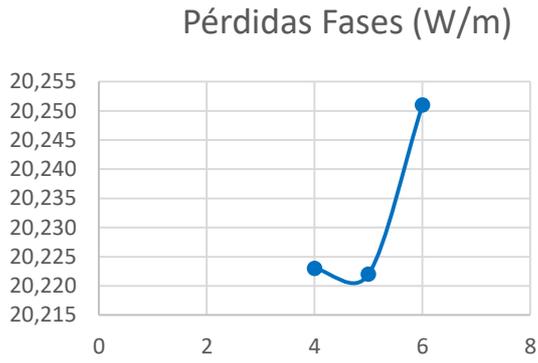


Figura 127. Pérdidas fases Modelo 4

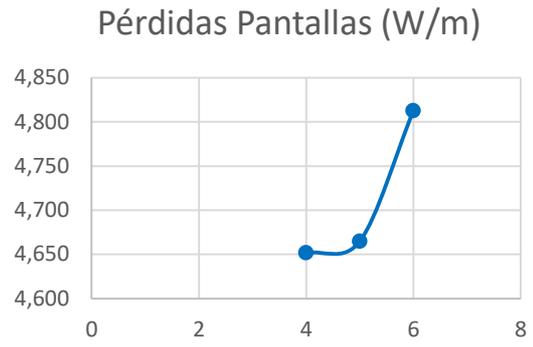


Figura 128. Pérdidas pantallas Modelo 4

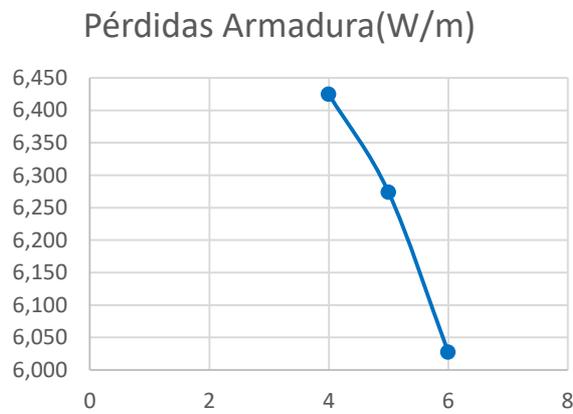


Figura 129. Pérdidas armadura Modelo 4

Modelo 5						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura (W/m)	(%)
4	20,434	100%	10,414	100%	4,518	100%
5	20,431	99,99%	10,442	100,27%	4,342	96,09%
6	20,456	100,11%	10,630	102,07%	4,115	91,08%

Tabla 47. Pérdidas para D_h variable Modelo 5

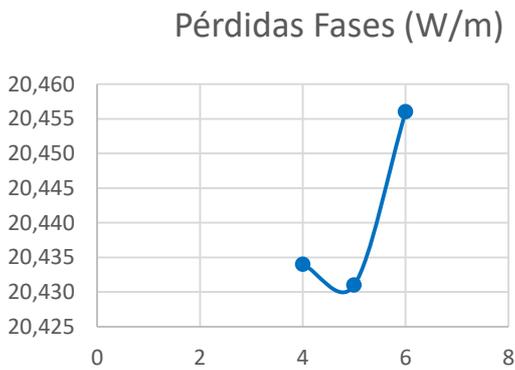


Figura 130. Pérdidas fases Modelo 5

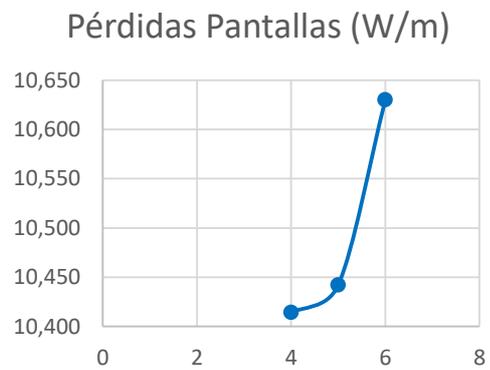


Figura 131. Pérdidas pantallas Modelo 5

Pérdidas Armadura(W/m)

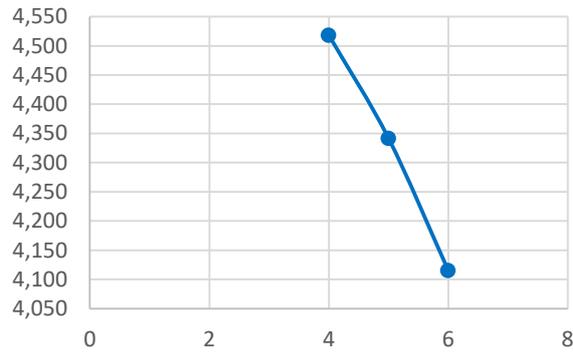


Figura 132. Pérdidas armadura Modelo 5

Modelo 6						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	14,444	100%	6,389	100%	3,771	100%
5	14,434	99,93%	6,347	99,33%	3,579	94,91%
6	14,448	100,03%	6,474	101,32%	3,374	89,48%

Tabla 48. Pérdidas para D_h variable Modelo 6

Pérdidas Fases (W/m)

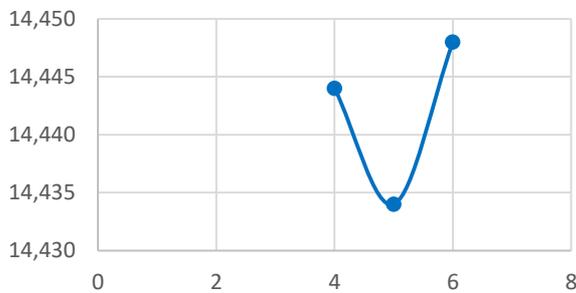


Figura 133. Pérdidas fases Modelo 6

Pérdidas Pantallas (W/m)

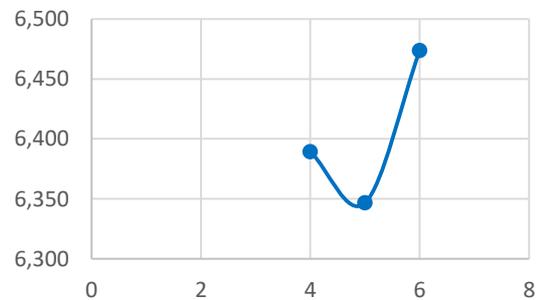


Figura 134. Pérdidas pantallas Modelo 6

Pérdidas Armadura (W/m)

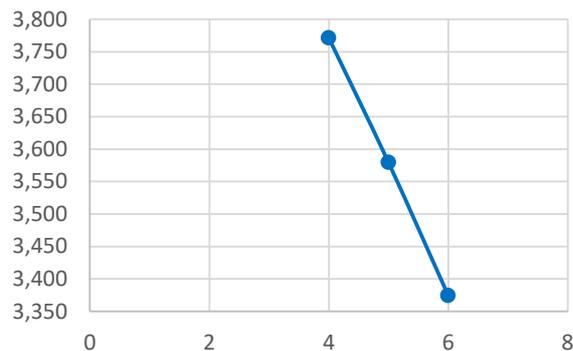


Figura 135. Pérdidas armadura Modelo 6

De las gráficas que se muestran para cada modelo tipo se puede observar que el diámetro de hilos de la armadura alcanza su valor idóneo en cuanto a la reducción de pérdidas en las fases y pantallas cuando este valor es de 5 milímetros. En cambio para reducir las pérdidas en la armadura, su valor sería de 6 milímetros.

7.2.2 Variación de delta, separación entre hilos de la armadura

A continuación, se analizan las modificaciones en las pérdidas de potencia de fases, pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, al variar la separación entre hilos, delta, manteniendo constante el diámetro de los hilos. El D_h será 6 mm. A su vez, el valor de delta variará entre 0,3 mm, 0,2 mm y 0,1 mm.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo 1						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	8,674	100%	2,228	100%	1,398	100%
0,2	8,665	99,90%	2,133	95,72%	1,375	98,40%
0,3	8,659	99,83%	2,060	92,44%	1,353	96,82%

Tabla 49. Pérdidas para δ variable Modelo 1

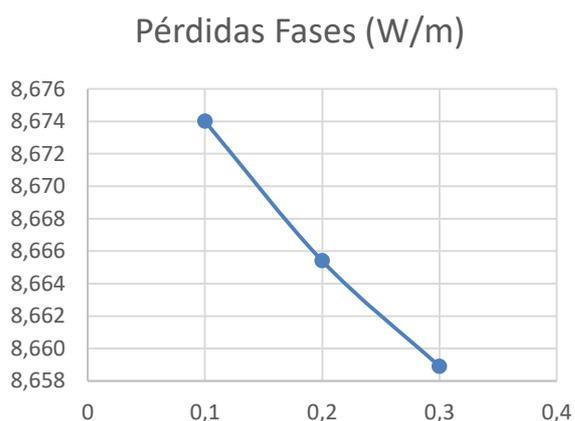


Figura 136. Pérdidas fases Modelo 1

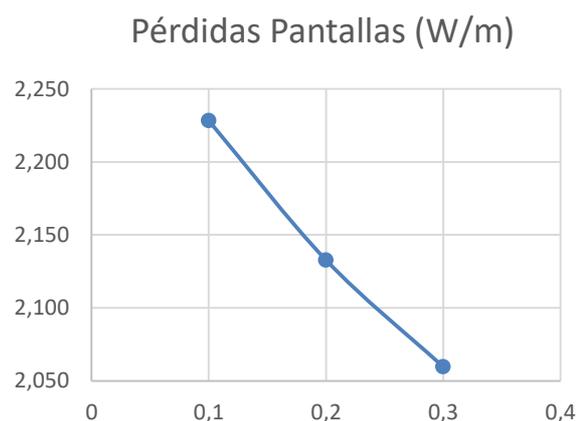


Figura 137. Pérdidas pantallas Modelo 1

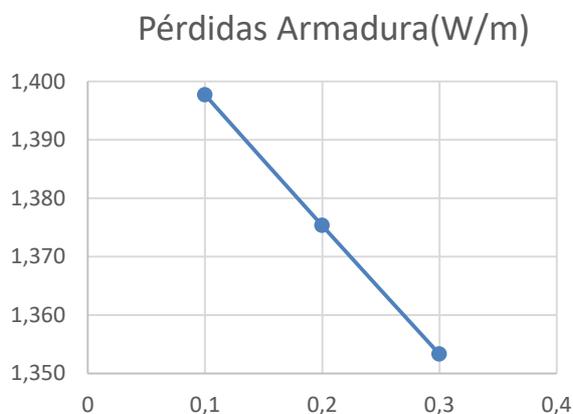


Figura 138. Pérdidas armadura Modelo 1

Modelo 2						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	7,223	100%	2,442	100%	1,376	100%
0,2	7,203	99,72%	2,288	93,68%	1,346	97,79%
0,3	7,201	99,69%	2,238	91,61%	1,333	96,83%

Tabla 50. Pérdidas para δ variable modelo 2

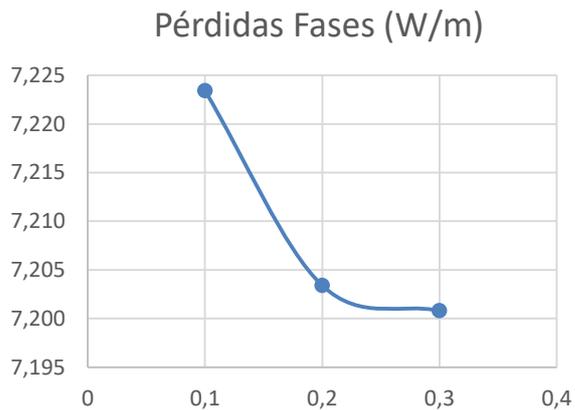


Figura 139. Pérdidas fases Modelo 2

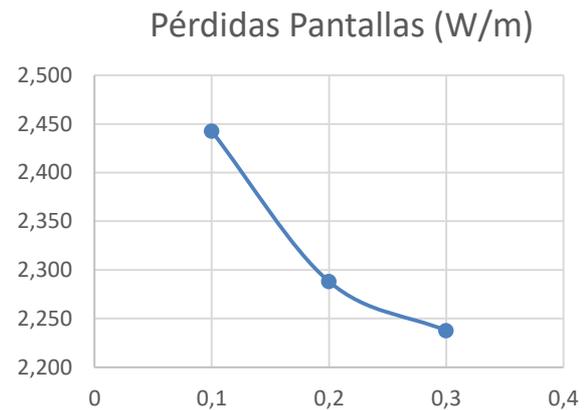


Figura 140. Pérdidas pantallas Modelo 2

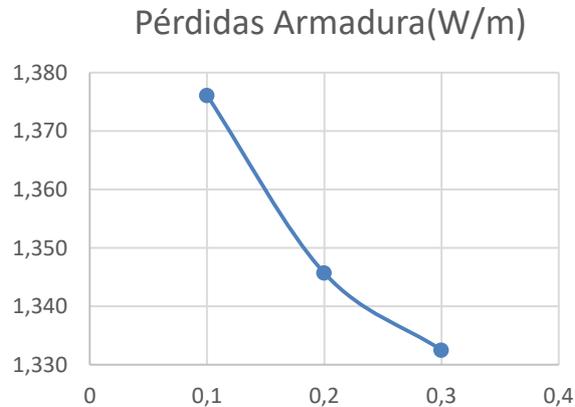


Figura 141. Pérdidas armadura Modelo 2

Modelo 3						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	28,360	100%	9,646	100%	6,525	100%
0,2	28,242	99,58%	9,108	94,42%	6,394	98,00%
0,3	28,159	99,29%	8,728	90,48%	6,274	96,15%

Tabla 51. Pérdidas para δ variable Modelo 3

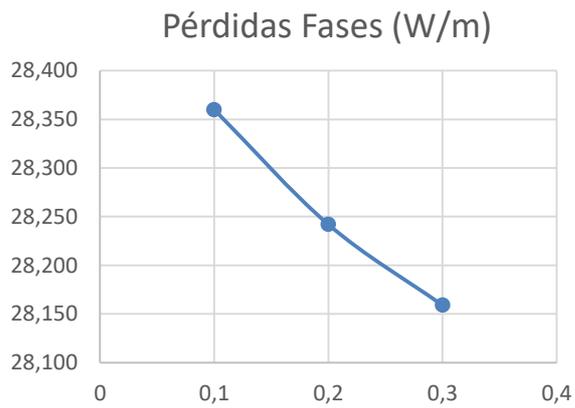


Figura 142. Pérdidas fases Modelo 3

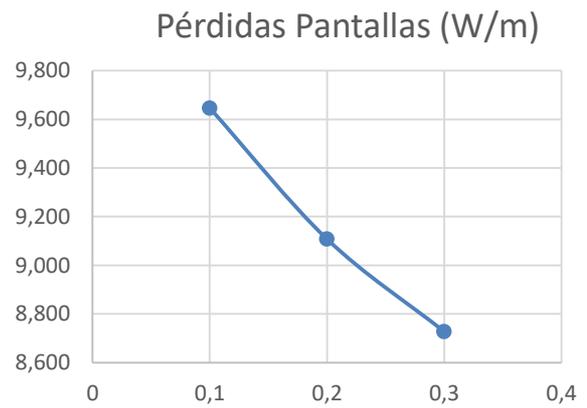


Figura 143. Pérdidas pantallas Modelo 3

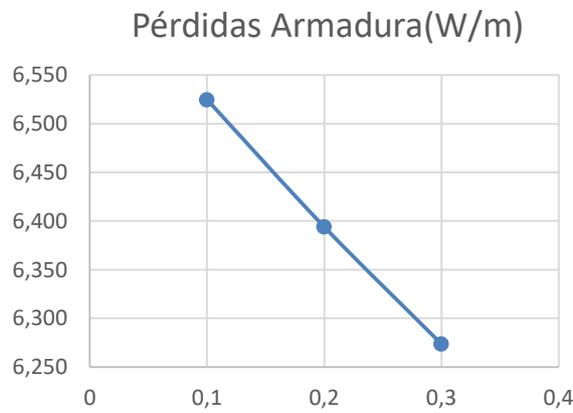


Figura 144. Pérdidas armadura Modelo 3

Modelo 4						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	20,333	100%	5,171	100%	3,599	100%
0,2	20,266	99,67%	4,872	94,21%	3,516	97,69%
0,3	20,222	99,45%	4,665	90,21%	3,443	95,66%

Tabla 52. Pérdidas para δ variable Modelo 4

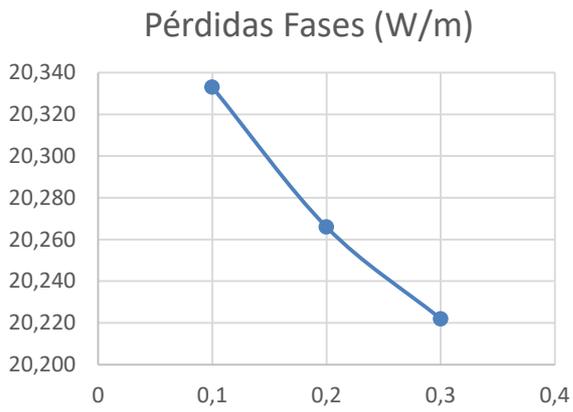


Figura 145. Pérdidas fases Modelo 4

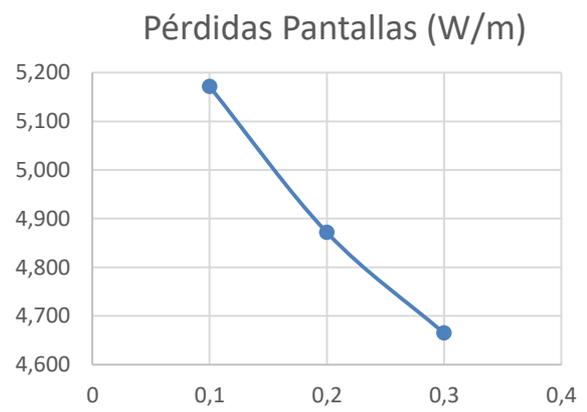


Figura 146. Pérdidas pantallas Modelo 4

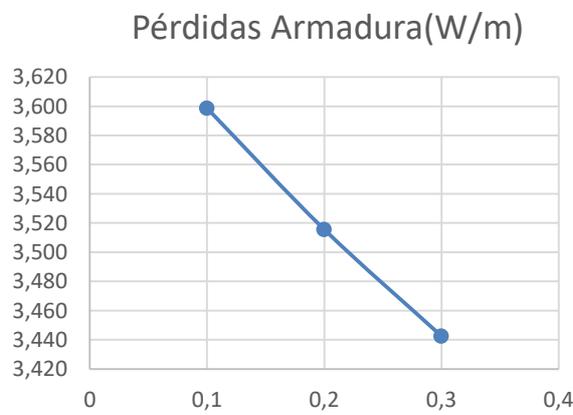


Figura 147. Pérdidas armadura Modelo 4

Modelo 5						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	20,574	100%	11,271	100%	4,497	100%
0,2	20,464	99,47%	10,640	94,40%	4,388	97,56%
0,3	20,431	99,30%	10,442	92,64%	4,342	96,54%

Tabla 53. Pérdidas para δ variable Modelo 5

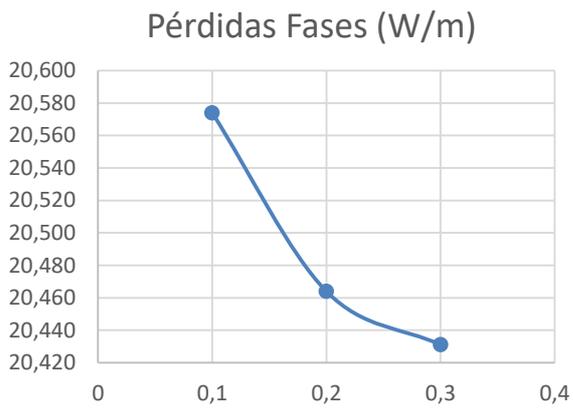


Figura 148. Pérdidas fases Modelo 5

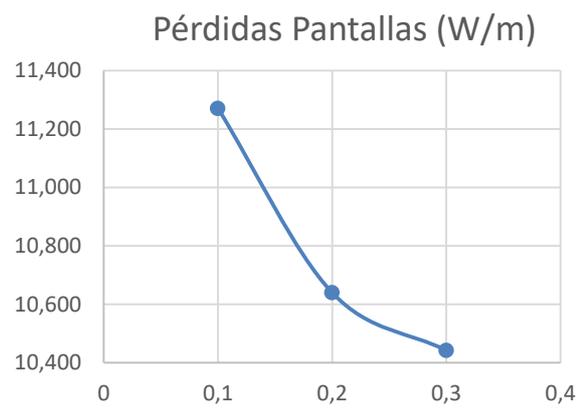


Figura 149. Pérdidas pantallas Modelo 5

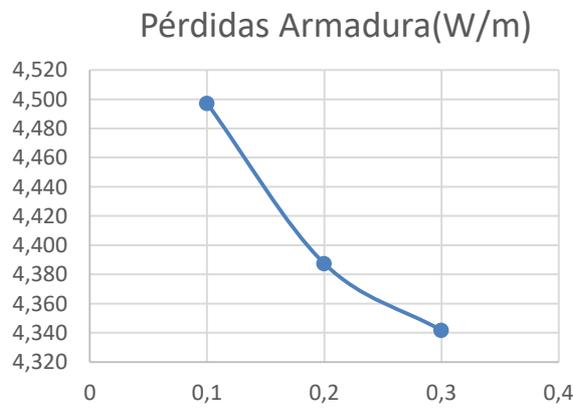


Figura 150. Pérdidas armadura Modelo 5

Modelo 6						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	15,126	100%	11,001	100%	4,351	100%
0,2	14,458	95,58%	6,524	59,31%	3,619	83,17%
0,3	14,434	95,43%	6,347	57,69%	3,579	82,27%

Tabla 54. Pérdidas para δ variable Modelo 6

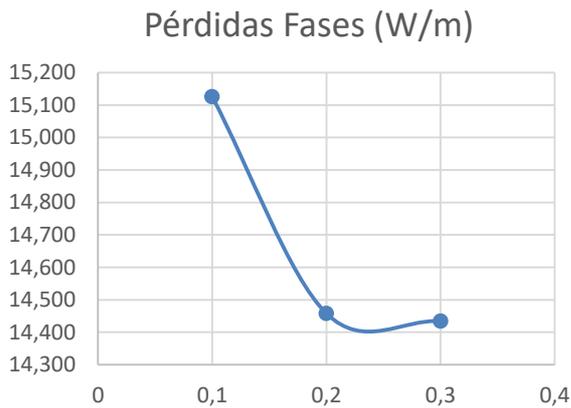


Figura 151. Pérdidas fases Modelo 6

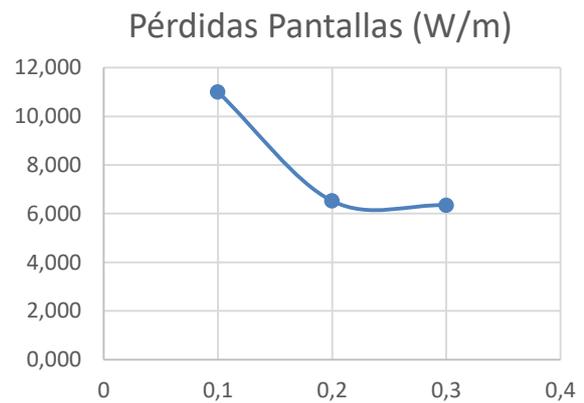


Figura 152. Pérdidas pantallas Modelo 6

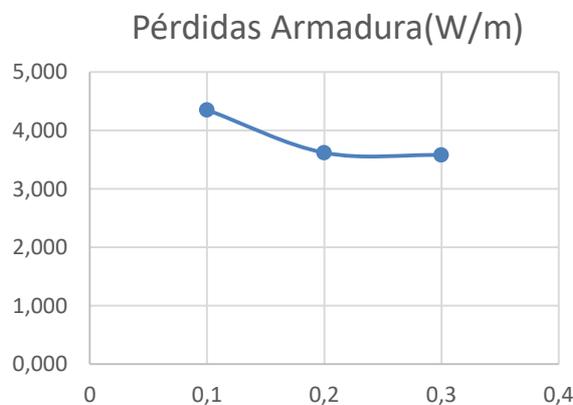


Figura 153. Pérdidas armadura Modelo 6

Como conclusión, se observa que la separación entre hilos sea lo mayor posible. De esta forma, el número de hilos será menor por la armadura, y por tanto, menores serán las pérdidas por ellas.

En este caso, el campo magnético generado escapa más al exterior y, por tanto, la inducción de corriente en los hilos es menor. También es menor el apantallado producido por la armadura del campo magnético dentro del cable. Por ello, interesa una separación de hilos, delta, lo mayor posible.

7.2.3 Conclusión

En este caso la geometría y la física del problema permiten que el campo magnético variable total induzca la circulación de intensidad a lo largo de cada hilo. Al ser un problema 2D, las líneas de flujo están contenidas en el plano y, su trayectoria es ir saltando de un hilo a otro. Esto induce esas corrientes perpendiculares al plano a lo largo de cada hilo.

Con ello, de estos estudios realizados en **2D**, se observa que interesa que la **separación entre hilos sea la mayor posible y que el diámetro de estos hilos sea de 5 milímetros**. Con ello, quedarán reducidas las pérdidas en el cable tanto en fases como pantallas y armadura, en cuanto a la capacidad que tiene la geometría física de influir en estos valores.

7.3 Variación de parámetros físicos del cable en modelos 2.5D

Para realizar este estudio, se sigue el mismo procedimiento que en el apartado anterior, pero esta vez con los modelos tipos 2.5D.

7.3.1 Variación del diámetro de los hilos de la armadura

Para este primer estudio, se analizan las modificaciones en las pérdidas de potencia de fases, pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, al variar el diámetro de los hilos, manteniendo constante la separación entre dos hilos. Los D_h serán 3,15 mm, 4 mm, 5 mm y 6 mm. A su vez, el valor de delta será de 0,3 mm.

En este caso no se representan las pérdidas por armadura puesto que son prácticamente nulas. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo 1						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	8,718	100%	2,708	100%	0,013	100%
5	8,727	100,11%	2,812	103,86%	0,027	207,93%
6	8,737	100,22%	2,916	107,70%	0,047	358,25%

Tabla 55. Pérdidas para D_h variable Modelo 1

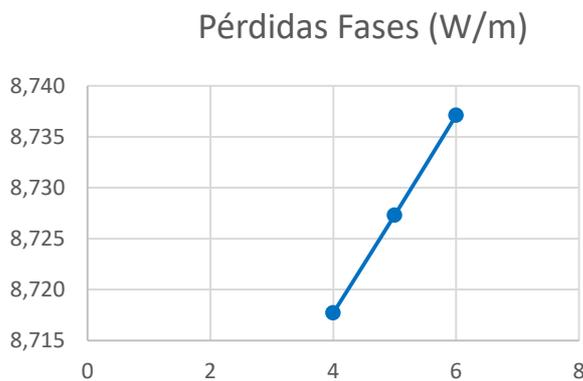


Figura 154. Pérdidas fases Modelo 1

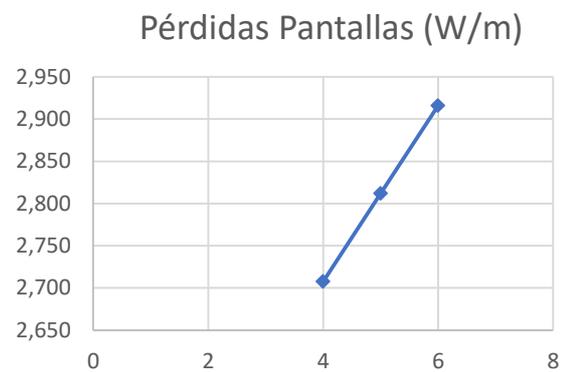


Figura 155. Pérdidas pantallas Modelo 1

Modelo 2						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	7,278	100%	2,934	100%	0,012	100%
5	7,293	100,20%	3,065	104,46%	0,028	227,99%
6	7,306	100,39%	3,180	108,38%	0,049	393,42%

Tabla 56. Pérdidas para D_h variable Modelo 2

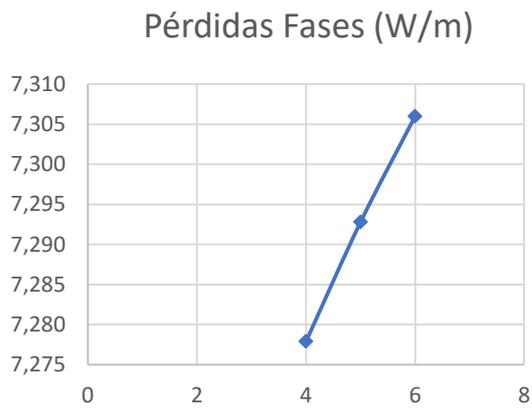


Figura 156. Pérdidas fases Modelo 2

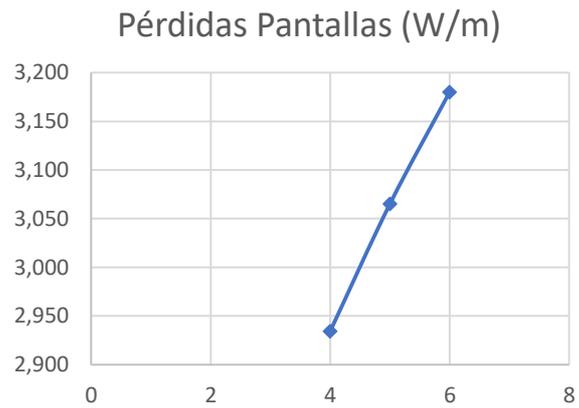


Figura 157. Pérdidas pantallas Modelo 2

Modelo 3						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	28,632	100%	10,867	100%	0,059	100%
5	28,757	100,44%	11,429	105,17%	0,140	238,09%
6	28,878	100,86%	11,967	110,12%	0,254	430,59%

Tabla 57. Pérdidas para D_h variable Modelo 3

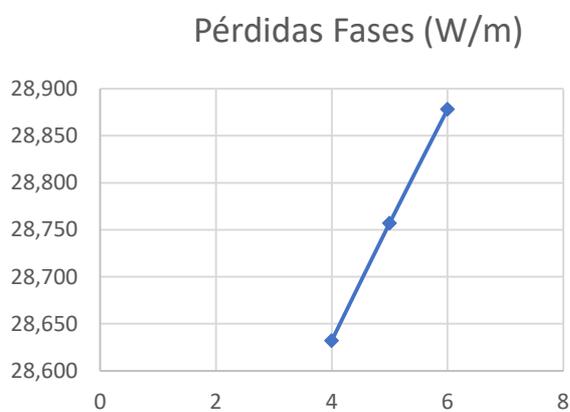


Figura 158. Pérdidas fases Modelo 3

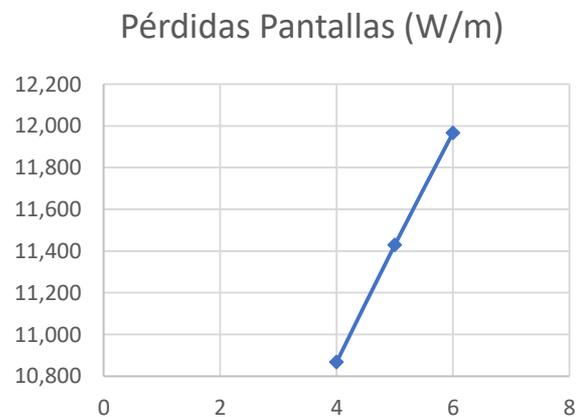


Figura 159. Pérdidas pantallas Modelo 3

Modelo 4						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	20,474	100%	5,807	100%	0,037	100%
5	20,528	100,26%	6,054	104,25%	0,078	210,14%
6	20,593	100,58%	6,338	109,15%	0,145	387,81%

Tabla 58. Pérdidas para D_h variable Modelo 4

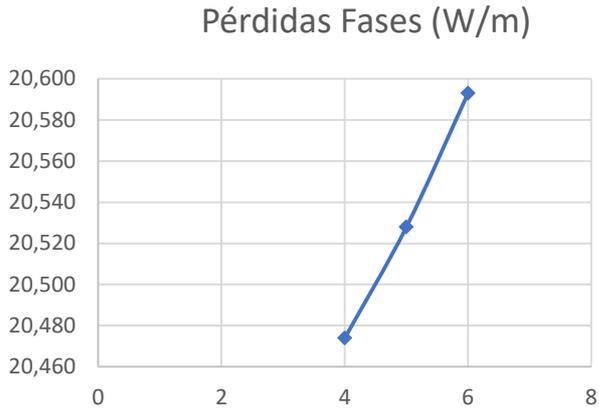


Figura 160. Pérdidas fases Modelo 4

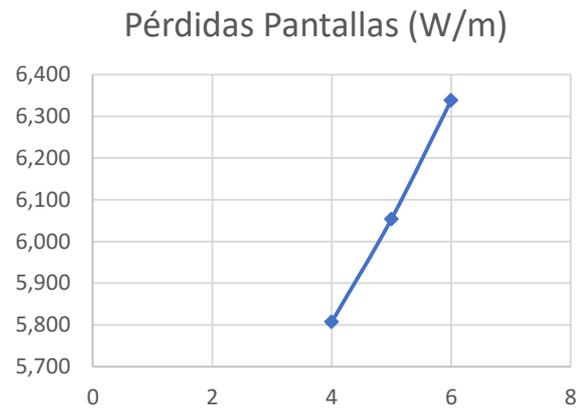


Figura 161. Pérdidas pantallas Modelo 4

Modelo 5						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	20,806	100%	12,766	100%	0,045	100%
5	20,881	100,36%	13,184	103,27%	0,097	214,34%
6	20,949	100,69%	13,556	106,19%	0,163	360,55%

Tabla 59. Pérdidas para D_h variable Modelo 5

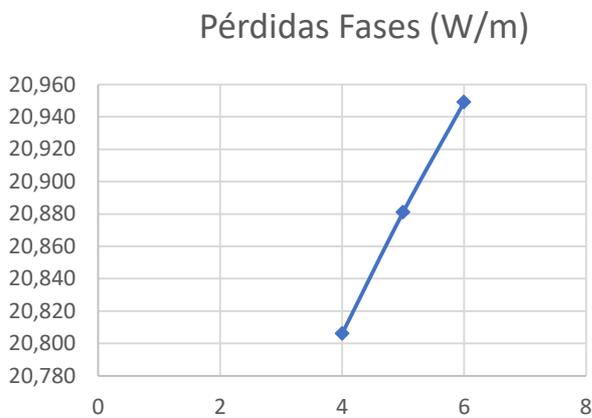


Figura 162. Pérdidas fases Modelo 5

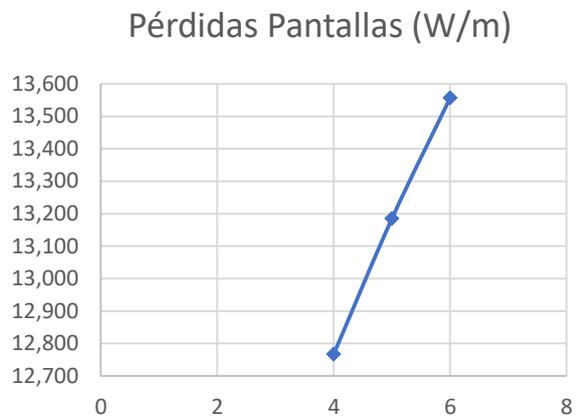


Figura 163. Pérdidas pantallas Modelo 5

Modelo 6						
D_h	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	14,737	100%	8,565	100%	0,031	100%
5	14,778	100,28%	8,855	103,39%	0,065	209,87%
6	14,819	100,56%	9,148	106,81%	0,114	366,89%

Tabla 60. Pérdidas para D_h variable Modelo 6

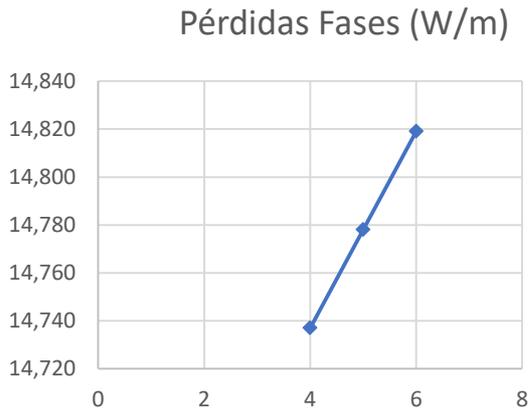


Figura 164. Pérdidas fases Modelo 6

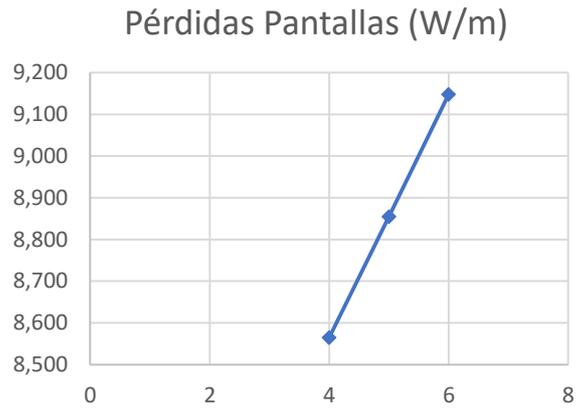


Figura 165. Pérdidas pantallas Modelo 6

De este estudio 2.5D, se observa que interesa que los cables tengan el menor diámetro de hilos posibles para reducir las pérdidas producidas.

7.3.2 Variación de delta, separación entre hilos de la armadura

A continuación, se analizan las modificaciones en las pérdidas de potencia de fases, pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, al variar la separación entre hilos, delta, manteniendo constante el diámetro de los hilos. El D_h será 6 mm. A su vez, el valor de delta variará entre 0,3 mm, 0,2 mm y 0,1 mm.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo 1						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	8,748	100%	3,034	100%	0,065	100%
0,2	8,737	99,87%	2,913	96,02%	0,042	65,27%
0,3	8,727	99,76%	2,812	92,69%	0,027	42,02%

Tabla 61. Pérdidas para δ variable Modelo 1

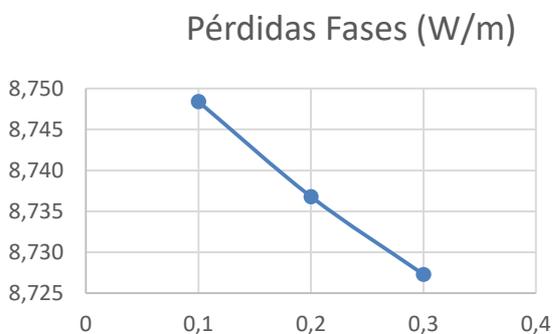


Figura 166. Pérdidas fases Modelo 1

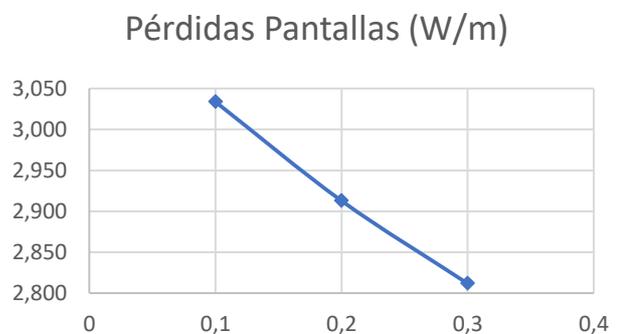


Figura 167. Pérdidas pantallas Modelo 1

Modelo 2						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	7,323	100%	3,329	100%	0,071	100%
0,2	7,306	99,76%	3,180	95,54%	0,049	68,64%
0,3	7,293	99,58%	3,065	92,08%	0,028	39,77%

Tabla 62. Pérdidas para δ variable Modelo 2

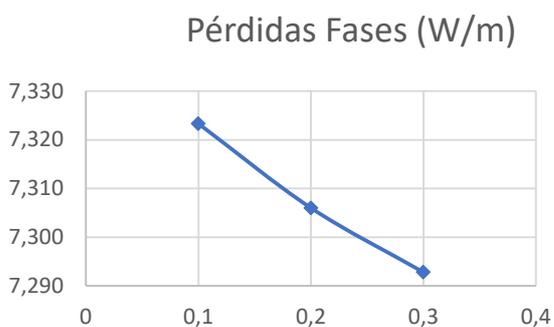


Figura 168. Pérdidas fases Modelo 2

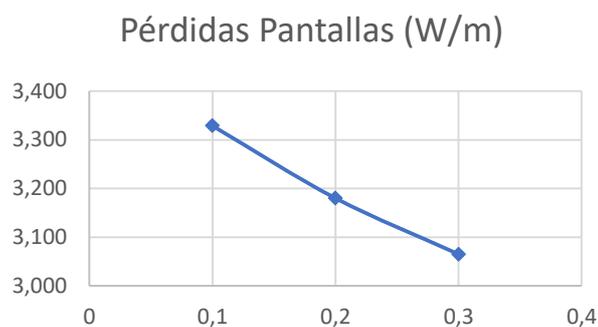


Figura 169. Pérdidas pantallas Modelo 2

Modelo 3						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	29,017	100%	12,569	100%	0,375	100%
0,2	28,869	99,49%	11,923	94,86%	0,228	60,76%
0,3	28,757	99,10%	11,429	90,93%	0,140	37,42%

Tabla 63. Pérdidas para δ variable Modelo 3

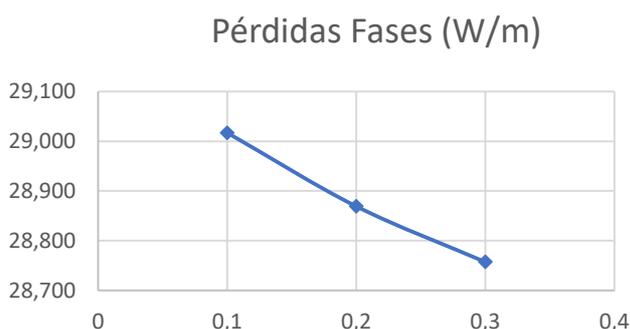


Figura 170. Pérdidas fases Modelo 3

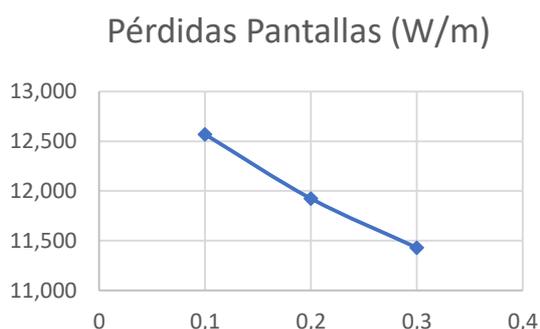


Figura 171. Pérdidas pantallas Modelo 3

Modelo 4						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	20,672	100%	6,682	100%	0,216	100%
0,2	20,589	99,60%	6,323	94,62%	0,129	59,61%
0,3	20,528	99,30%	6,054	90,60%	0,078	36,28%

Tabla 64. Pérdidas para δ variable Modelo 4

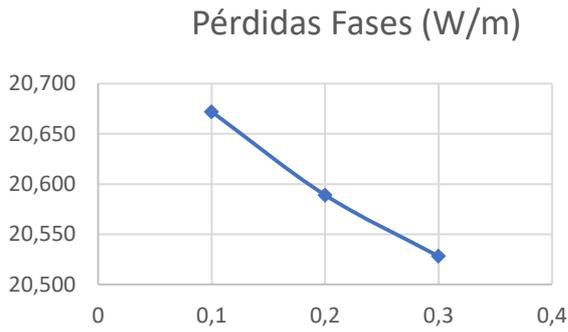


Figura 172. Pérdidas fases Modelo 4

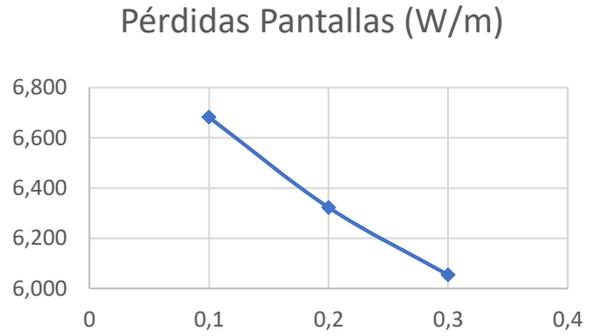


Figura 173. Pérdidas pantallas Modelo 4

Modelo 5						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	21,067	100%	14,180	100%	0,262	100%
0,2	20,928	99,34%	13,439	94,77%	0,131	50,02%
0,3	20,881	99,12%	13,184	92,98%	0,097	36,97%

Tabla 65. Pérdidas para δ variable Modelo 5

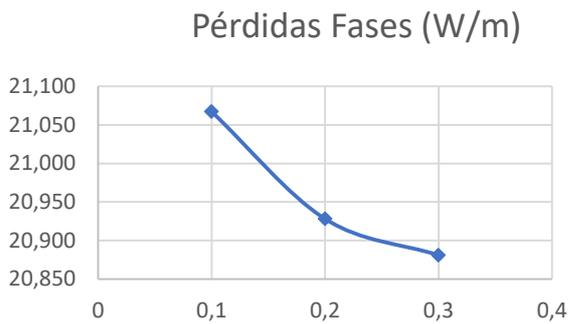


Figura 174. Pérdidas fases Modelo 5

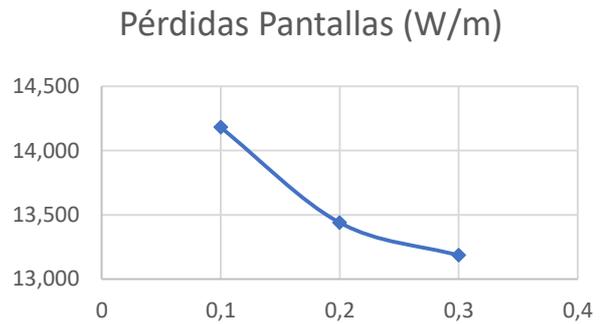


Figura 175. Pérdidas pantallas Modelo 5

Modelo 6						
δ	Pconductores (W/m)	(%)	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	14,884	100%	9,591	100%	0,180	100%
0,2	14,813	99,52%	9,103	94,91%	0,097	53,97%
0,3	14,778	99,29%	8,855	92,32%	0,140	77,99%

Tabla 66. Pérdidas para δ variable Modelo 6

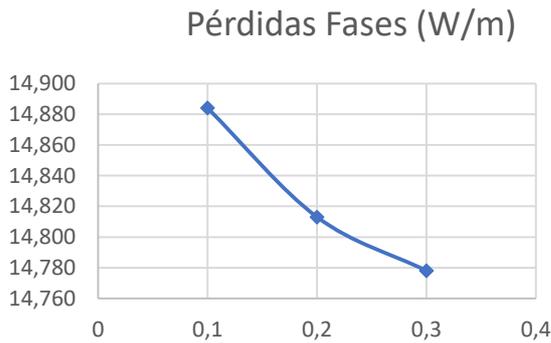


Figura 176. Pérdidas fases Modelo 6

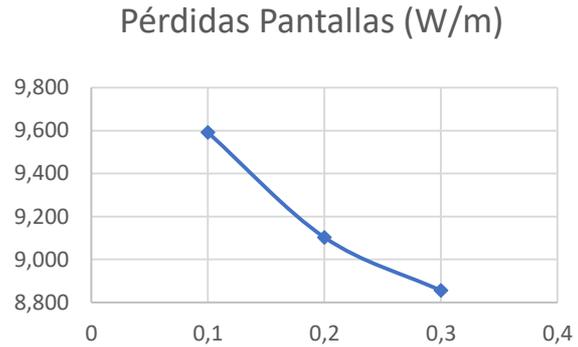


Figura 177. Pérdidas pantallas Modelo 6

Por tanto, de las gráficas se puede concluir, que interesa que la separación entre hilos de la armadura, delta, sea la mayor posible.

7.3.3 Conclusión

En el caso de modelos 2.5D, ocurre lo mismo que en el caso de modelos 2D, es decir, el flujo magnético sólo puede ir saltando de hilo en hilo en el plano 2D, pero ahora se obliga a que la corriente neta en cada hilo sea cero. Por tanto, en los hilos se inducen corrientes con una distribución totalmente distinta. Mientras en 2D circulaban de forma neta en sentido saliente (o entrante, según el hilo) a lo largo de cada hilo, en 2.5D en un mismo hilo la corriente va y viene por cada mitad del hilo, de forma que el total es cero. Obviamente el campo que generan estas corrientes inducidas es muy diferente al del caso 2D, y por tanto afectará a las pérdidas de fases y pantallas.

Como conclusión final del estudio realizado de los modelos tipos **2.5D**, se observa que es recomendable que el **diámetro de los hilos sea el menor posible y la separación entre éstos sea lo mayor posible, 0,3 mm.**

7.4 Variación de parámetros físicos del cable en modelos 3D

Para realizar este estudio, se sigue el mismo procedimiento que en los apartados anteriores, pero esta vez con los modelos tipos 3D. Para estos estudios, se decide no simular todos los modelos tipos, debido a que el tipo de ejecución 3D requiere un tiempo elevado de simulación y a que las conclusiones pueden ser extraídas con menos modelos.

Además, tal y como se comenta en el estudio 3D, no se representan las pérdidas por fases debido a que al tomar las fases como hilos, Comsol no permite obtener las p

7.4.1 Variación del diámetro de los hilos de la armadura

Se procede a analizar las modificaciones en las pérdidas de potencia de pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, al variar el diámetro de los hilos, manteniendo constante la separación entre dos hilos. Los D_h serán 4 mm, 5 mm y 6 mm. A su vez, el valor de delta será de 0,3 mm.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo 1				
D_h	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	14,255	100%	29,672	100%
5	14,219	99,75%	35,572	119,88%
6	14,329	100,52%	37,022	124,77%

Tabla 67. Pérdidas para D_h variable Modelo 1

Pérdidas Pantallas (W/m)

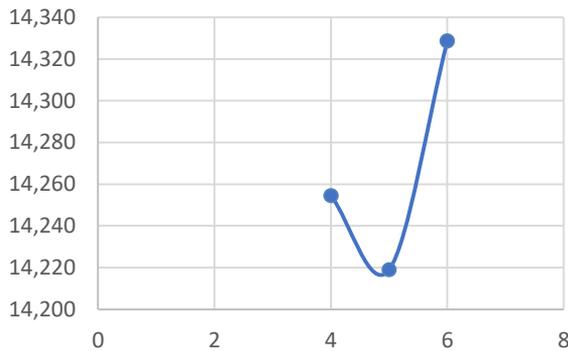


Figura 178. Pérdidas fases Modelo 1

Pérdidas Armadura (W/m)

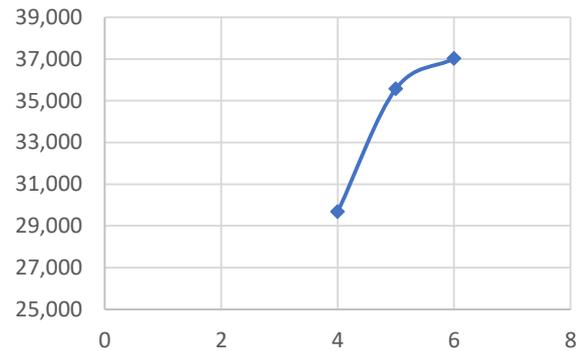


Figura 179. Pérdidas pantallas Modelo 1

Modelo 3				
D_h	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	59,802	100%	28,729	100%
5	59,653	99,75%	34,441	119,88%
6	60,113	100,52%	35,845	124,77%

Tabla 68. Pérdidas para D_h variable Modelo 3

Pérdidas Pantallas (W/m)

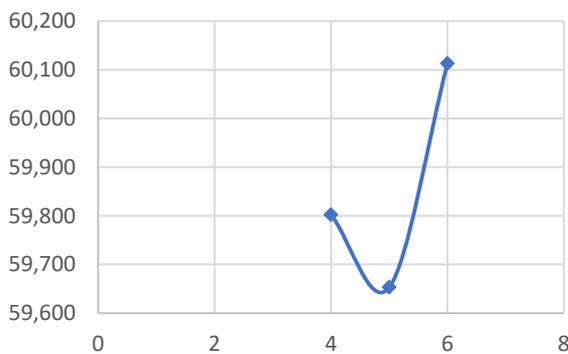


Figura 180. Pérdidas fases Modelo 3

Pérdidas Armadura (W/m)

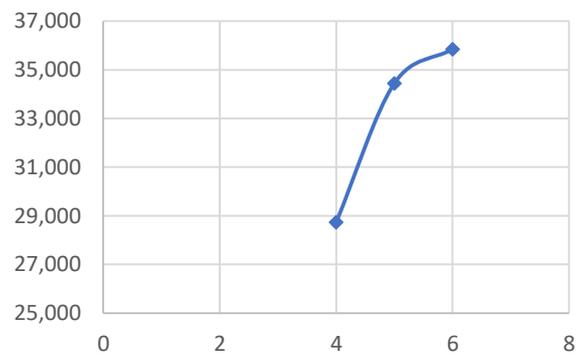


Figura 181. Pérdidas pantallas Modelo 3

Modelo 4				
D_h	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
4	30,914	100%	15,150	100%
5	30,834	99,74%	18,139	119,73%
6	31,138	100,72%	19,029	125,60%

Tabla 69. Pérdidas para D_h variable Modelo 4

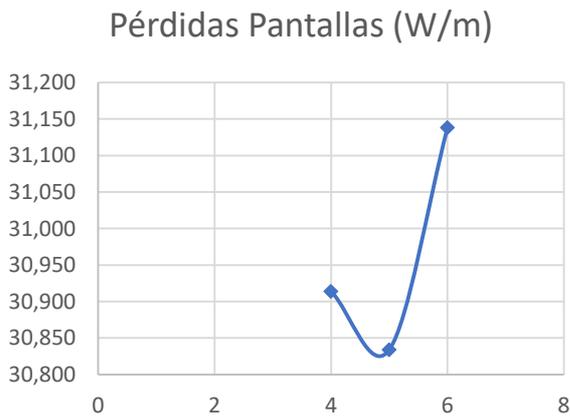


Figura 182. Pérdidas fases Modelo 4

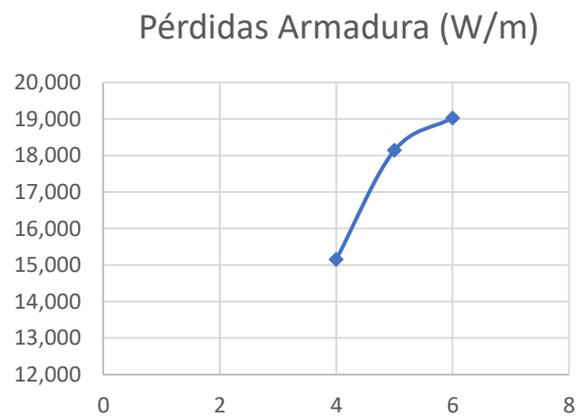


Figura 183. Pérdidas pantallas Modelo 4

En consecuencia, se observa que se obtienen unos resultados similares a los obtenidos en 2D.

7.4.2 Variación de delta, separación entre hilos de la armadura

A continuación, se analizan las modificaciones en las pérdidas de potencia de pantallas y armaduras de los seis modelos tipos, al variar la separación entre hilos, delta, manteniendo constante el diámetro de los hilos. El D_h será 6 mm. A su vez, el valor de delta variará entre 0,3 mm, 0,2 mm y 0,1 mm.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Modelo 1				
δ	Ppantallas (W/m)	(%)	Parmadura(W/m)	(%)
0,1	14,190	100%	8,470	100%
0,2	13,920	98,10%	8,331	98,36%
0,3	13,735	96,79%	8,190	96,69%

Tabla 70. Pérdidas para δ variable Modelo 1

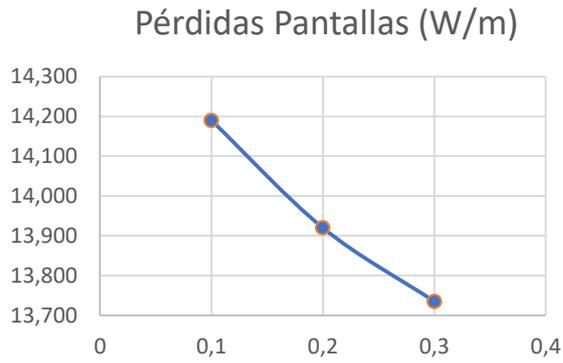


Figura 184. Pérdidas fases Modelo 1

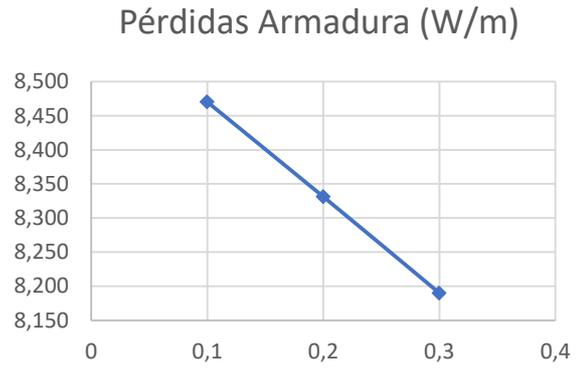


Figura 185. Pérdidas pantallas Modelo 1

Modelo 3				
δ	Pantallas (W/m)	(%)	Armadura(W/m)	(%)
0,1	62,105	100%	37,071	100%
0,2	60,923	98,10%	36,463	98,36%
0,3	60,113	96,79%	35,845	96,69%

Tabla 71. Pérdidas para δ variable Modelo 3

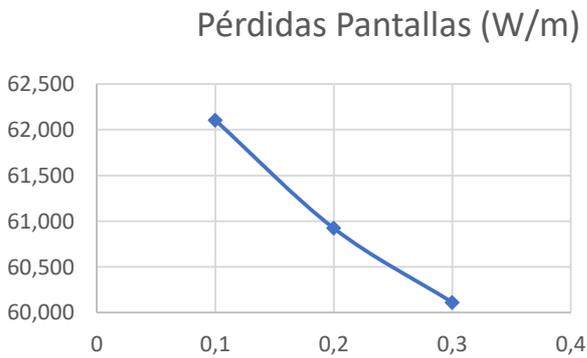


Figura 186. Pérdidas fases Modelo 3

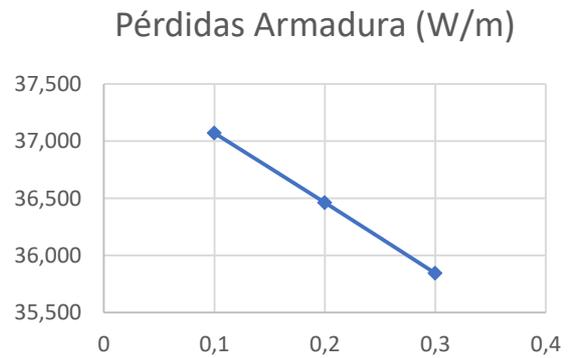


Figura 187. Pérdidas pantallas Modelo 3

Modelo 4				
δ	Pantallas (W/m)	(%)	Armadura(W/m)	(%)
0,1	31,863	100%	19,502	100%
0,2	31,351	98,39%	19,201	98,46%
0,3	31,138	97,72%	19,029	97,57%

Tabla 72. Pérdidas para δ variable Modelo 4

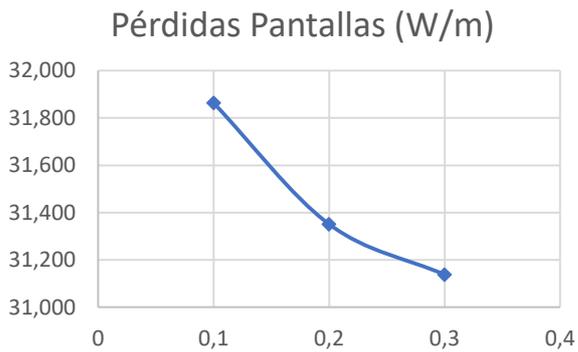


Figura 188. Pérdidas fases Modelo 4

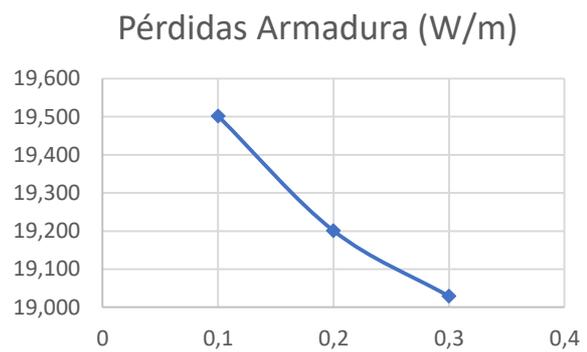


Figura 189. Pérdidas pantallas Modelo 4

7.4.3 Conclusión

En este análisis, como ya se ha analizado, se permite la circulación de corrientes en dirección longitudinal por los hilos, pero, salvo que coincida el sentido y el paso de fases y armadura, las corrientes no se inducen en este sentido. Es así porque en esta ocasión el flujo magnético puede no solo saltar de un hilo a otro, sino también puede quedar atrapado dentro de los hilos. Sólo durante los tramos donde ocurre esto, ese flujo longitudinal induce corrientes en los hilos cuya trayectoria queda encerrada en la propia sección del hilo. Así, el campo que generan estas corrientes inducidas nada tendrá que ver con el que las corrientes inducidas generaban en los casos 2D y 2.5D, dado que en los 3 casos estas corrientes tienen trayectorias y sentidos muy diferentes.

Como conclusión final del estudio sobre cómo afecta la variación del diámetro de los hilos y la separación de los mismos a las pérdidas producidas en fases, pantallas y armaduras, se observa, tal y como se ha comentado en los distintos epígrafes, que **cada modelo produce un campo magnético distinto en los hilos de la armadura y el flujo de corriente que se genera es distinto. Es por ello, que de los modelos 2D, 2.5D y 3D se obtienen unos resultados poco comparables entre sí.**

8 CONCLUSIONES

El estudio de optimización de la tipología, tecnología y caracterización física de los cables submarinos se encuentra en pleno desarrollo. Hasta el momento, estos cables están siendo implementados de forma sobredimensionada debido al gap de información existente desde diversos aspectos.

Actualmente, la formulación analítica empleada para el cálculo de dichas pérdidas se basa en la IEC 60287-1-1, que se corresponde con la UNE 21144-1-1. Esta formulación no tiene en cuenta ciertos aspectos relevantes del cable que influyen en el valor de las mismas, por lo que las pérdidas de potencia teóricas que se indican para los cables implementados no se corresponden con las reales.

Por ello, el objetivo principal del estudio es realizar una comparativa de las pérdidas de potencia que se obtienen desde diversos análisis. Por una parte, se realiza un estudio analítico basado en la formulación comentada anteriormente. Seguidamente, y a través de la herramienta Comsol Multiphysics, se realiza un estudio mediante simulaciones numéricas. Para este último estudio, se ha considerado inicialmente un análisis bidimensional para concluir con uno tridimensional. Para ello, se han considerado seis modelos tipos y sobre los cuales se han calculado sus pérdidas de potencia y se han analizado.

Fruto de los resultados analizados, se obtiene ciertas conclusiones respecto a cada uno de los análisis completados:

- Con respecto a la formulación analítica establecida en la IEC 60287-1-1, se comprueba que dicha formulación no contempla la totalidad de consideraciones que provocan y afectan a las pérdidas de un cable, sobre todo en referencia a las consideraciones tridimensionales. Entre otros, no contempla la influencia del trenzado en el mismo sentido u opuesto de las fases y armaduras. Tampoco tiene en consideración la influencia en las pérdidas de los posibles pasos del trenzado de los citados elementos. Estos aspectos provocan variaciones del campo magnético en el interior del cable, que provocan modificaciones en las pérdidas de las fases, pantallas e hilos de la armadura.
- Por su parte, el modelo basado en simulaciones numéricas 2D, al ser un modelo bidimensional, el campo magnético generado se sitúa en el plano perpendicular a los hilos, y esto induce una circulación de corriente longitudinal por ellos. Al ser un modelo 2D, cada hilo tiene una posición fija respecto a las fases, por lo que en cada uno de ellos circulará una corriente distinta en función de dicha posición, de forma que la corriente total que circula por la armadura es prácticamente nula, pero no lo es de forma individual por cada uno de los hilos. Este hecho, que no sucede en los sucesivos estudios realizados, modifica los valores reales de pérdidas que debieran darse.
- Debido a la consideración anterior, se han realizado estudios sobre modelos bidimensionales pero forzando a que la circulación de corriente por los hilos sea cero, en un intento de eliminar el problema anterior e intentar simular lo que sucede en 3D. Estos estudios son denominados 2.5D. Al forzar que la corriente por cada hilo de la armadura sea cero, se observa que no circula corriente de forma longitudinal por los hilos. Dado que al igual que en el estudio 2D no se inducen corrientes circulando en el plano del modelo, al ser también bidimensional, las muy reducidas pérdidas que se producen en los hilos son debidas a esa corriente longitudinal que se fuerza a que sea nula, pero que no lo es del todo.
- Como estudio final, se han realizado los mismos modelos pero en 3D. En estos modelos, apenas circula corriente longitudinal, pero, al ser tridimensional, se induce un flujo de campo magnético variable que queda atrapado dentro de los hilos de la armadura y los recorre de forma longitudinal. Este flujo, al ser variable y atravesar la sección de cada hilo, induce corrientes que circulan de forma perpendicular a él, quedando encerradas dentro de la propia sección del hilo. A su vez, a lo largo de la longitud del cable, los hilos de la armadura ocuparán una posición concreta respecto a las fases en función de los trenzados de las mismas, por lo que la corriente que se induce en dichos hilos no va a ser uniforme a lo largo de toda su longitud. Con estos estudios tridimensionales se permiten obtener

unos valores aparentemente más certeros a los que se producen en la realidad.

Debido a las consideraciones expuestas, y por motivos de capacidad de la tecnología disponible para el estudio, se han tomado una serie de simplificaciones que no han permitido medir las pérdidas de potencia en las fases en los modelos tridimensionales, lo cual ha evitado que se puedan medir los valores de λ_1 y λ_2 , referente a la relación de pérdidas por pantalla y fase y por armadura y fase, respectivamente. En su defecto, sí ha sido posible medir el valor de pérdidas de pantallas y armaduras y comparados con el resto de estudios de simulaciones.

En un segundo lugar, otro objetivo en el que se basa este estudio, es en intentar optimizar las características físicas del cable, sus dimensiones y composición, para reducir las pérdidas producidas. También se tiene como propósito analizar la composición estructural del cable para que el estudio 2.5D pueda ser representativo de lo que sucedería en un estudio 3D. Estos análisis también han sido realizados con los seis modelos tipos que se han descritos. De esta forma, con este estudio, se evita la sobredimensionalización de los cables que se pueden estar dando hasta el momento, al menos desde el punto de vista de las pérdidas.

Fruto de los resultados obtenidos, se concluye que es conveniente que el diámetro de los hilos de la armadura sea la menor posible y la separación de los hilos sea la mayor posible, teniendo siempre en consideración que estos parámetros están limitados por los fabricantes.

A su vez, se ha realizado un estudio sobre el sentido del trenzado de las fases y armaduras y sus correspondientes pasos de trenzado. Como conclusión principal, se establece que es más conveniente utilizar un trenzado de fases y armaduras en sentido opuesto y que la diferencia de dichos pasos debe ser lo más reducida posible, para evitar la perpendicularidad entre fases e hilos y que el flujo de corriente inducido de forma transversal a consecuencia del campo magnético generado, sea mayor. Con ello, las simulaciones 2.5D pueden sustituir a simulaciones 3D cuando armadura y pantalla tengan el mismo paso pero sentido de trenzado opuesto y cuando en el paso de la armadura y pantalla, una sea el doble de la otra con el trenzado en el mismo sentido. Además, en este punto, se consigue optimizar las pérdidas por armadura, consiguiendo así reducir sus pérdidas.

REFERENCIAS

1. IEC 60287-1-1, (UNE 21144-1-1)
2. Catálogo Nexans, “Submarine Power Cables”
3. Catálogo ABB, “XLPE Submarine Cable Systems. User’s Guide”
4. Thomas Worzyk, “Submarine Power Cables” “Design, Installation, Repair, Environmental Aspects”
5. “Simplified Computation of Magnetic Field Generated by Three-core Twisted” Juan Carlos del Pino López, Pedro Cruz Romero, Jarle Bremnes, Marius Hatlo,
6. Wikitel, “Cables submarinos”
7. Tutorial COMSOL Multphysics
8. Tutorial SolidWorks
9. “AC Resistance of Submarine Cables” Jicable. Versailles 21 June 2015
10. “Accurate analytical formula for calculation of losses in three-core submarine cables” 9th International Conference on Insulated Power Cables. Marius Hatlo, Espen Olsen, Ronny Stolan, Nexans AS, Norway.
11. “Effective Assessment of Electric Power Losses in Three-Core XLPE Cables” Ander Madariaga, José Luis Martín, Senior Member, Inmaculada Zamora, Salvador Ceballos, Olimpo Anaya-Lara, Member, IEEE Transactions on Power Systems, 4 November 2013.
12. “Induced Losses in Three-Core SL-Type High-Voltage Cables” Kevin Goddard, James A. Pilgrim, Member IEEE, Richard Chippeandale, Paul L. Lewin, Fellow, IEEE.
13. “Comparison of losses in an armoured and unarmoured three phase cable” 9th International Conference on Insulated Power Cables. Thomas Ebdrup, Filipe F. da Silva, Christian F. Jensen. Denmark
14. Estimating the Losses in Three-Core Submarine power Cables Using 2D and 3D FEA Simulations. Sebastian Sturm, Johannes Paulus, Karl-Ludwig, Frank Berger. 9th International Conference on Insulated Power Cables
15. “Power Loss and Inductance of Steel Armoured Multi-Core Cables” Cigre Session. Paris, 2010.
16. “Current dependent armour loss in three-core submarine XLPE cables” Jicable, 2011.