

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Diseño de Conductores Desnudos No Circulares para
Líneas Aéreas

Autor: David Garrido García

Tutores: Pedro Luis Cruz Romero y
Juan Carlos del Pino López

Dep. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de Conductores Desnudos No Circulares para Líneas Aéreas

Autor:

David Garrido García

Tutores:

Pedro Luis Cruz Romero

Juan Carlos del Pino López

Dep. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Diseño de Conductores Desnudos No Circulares para Líneas Aéreas

Autor: David Garrido García

Tutores: Pedro Luis Cruz Romero y Juan
Carlos del Pino López

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres, y a Isabel, por todo lo que hacen y han hecho por mí. Ellos me han dado una buena educación y unos valores que me han alentado a ser lo que soy hoy en día, me han animado y me han apoyado en los momentos difíciles durante la carrera. Quería dar las gracias especialmente a los profesores Don Pedro Luis Cruz Romero y Don Juan Carlos del Pino López, que me han dado la oportunidad de realizar este trabajo y sin su ayuda constante no hubiese sido posible esto. Con todo ello mencionar y dar las gracias a la universidad de Sevilla y a mis compañeros por formar parte de este camino en el que hemos demostrado que con esfuerzo y dedicación nos podemos superar. Gracias.

David Garrido García

2017

En este trabajo se ha llevado a cabo un análisis térmico de distintos modelos geométricos en dos dimensiones mediante el software COMSOL Multiphysics 5.2. Inicialmente se planteó realizar, además del análisis térmico, un análisis de la influencia en las propiedades eléctricas, como la inductancia, de los distintos modelos geométricos, pero considerando el volumen del trabajo se decidió abordarlo en otro trabajo futuro.

Se han diseñado 3 modelos geométricos con distintas variantes en cada uno de ellos y se ha analizado la temperatura máxima que alcanza cualquier punto de la geometría del conductor en régimen estacionario para todas las casuísticas que se han planteado en este trabajo.

In this paper it has been done a thermal analysis of different geometric models in two dimensions using the software COMSOL Multiphysics 5.2. Initially it was proposed to perform, besides the thermal analysis, an analysis of the influence on the electrical properties, such as the inductance, of the different geometric models, but considering the volume of the work it was decided to approach it in another future work.

Three geometric models with different variants have been designed in each one of them and the maximum temperature that reaches any point of the geometry of the conductor in the steady state has been analyzed for all the cases that have been raised in this work.

El continuo incremento de la población mundial y la demanda de electricidad, cada vez mayor, por parte de los países en vías de desarrollo hacen del abastecimiento energético un reto del futuro. La comisión Europea ha señalado como uno de sus objetivos, el desarrollo de una Unión de la Energía Sólida y con una política climática mucho más respetuosa con el medio ambiente. Para conseguir sus objetivos, algunos de los aspectos clave son la interconexión de todo el sistema eléctrico europeo y el avance en la descarbonización de la economía. Hay una necesidad global de maximizar el uso de las infraestructuras eléctricas permitiéndoles operar con densidades de corriente superiores a las actuales para incrementar el máximo flujo de potencia.

En la interconexión de todo el sistema eléctrico europeo son una pieza clave las redes eléctricas. Las redes eléctricas son elementos fundamentales de los sistemas eléctricos tal y como los conocemos hoy en día. Son la parte encargada de llevar la energía producida en los generadores hasta los consumidores y por ello, tienen un papel de gran relevancia y son objeto de un continuo estudio. Hallar una manera de aumentar la ampacidad de las líneas ya existentes cobra cada vez mayor importancia debido a la creciente dificultad para construir nuevas líneas por motivos económicos, medioambientales o socioculturales.

El objetivo de este trabajo es analizar las posibles mejoras en el diseño de conductores no circulares para aumentar la ampacidad de las líneas aéreas. Para ello, analizaremos la posible mejora térmica de diseños en 2D, sin considerar la torsión del conductor a lo largo de la línea, ni los efectos mecánicos soportados por el cable. Debido a la complejidad de los cálculos a realizar y la interconexión de las físicas involucradas, hemos recurrido al software COMSOL Multiphysics 5.2 para realizar el análisis de los modelos estudiados.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Prefacio	xv
Índice	xvii
Índice de Tablas	xix
Índice de Figuras	xxi
Notación	xxiv
1. Introducción	1
2. Físicas utilizadas	3
2.1 <i>Hipótesis del estudio.</i>	3
2.2 <i>Hipótesis del modelo</i>	3
2.3 <i>El problema térmico</i>	3
3. Método de los elementos finitos	7
4. Casos estudiados	9
4.1 <i>Parámetros</i>	9
4.1.1 Elíptico	9
4.1.2 Cuadrado	10
4.1.3 Hueso	10
4.2 <i>Geometría</i>	11
4.2.1 Geometrías finales	11
4.2.2 Elementos de las geometrías	13
4.2.3 Dominios	15
4.2.4 Contornos	18
4.3 <i>Materiales</i>	23
4.3.1 Propiedades físicas	23
4.3.2 Composición de los dominios	26
4.4 <i>Físicas añadidas a los modelos</i>	26
4.4.1 Transferencia de calor en sólidos	26
4.4.2 Flujo turbulento k- ϵ	29
4.4.3 Campos magnéticos	30
4.4.4 Multifísica	31
4.5 <i>Mallado</i>	32
5. Análisis de los resultados	35
5.1 <i>Resultados del modelo elíptico</i>	35
5.1.1 Estudio paramétrico 1	37
5.1.2 Estudio paramétrico 2	38
5.1.3 Parametrización 3	40
5.1.4 Análisis del modelo elíptico	41
5.2 <i>Resultados del modelo cuadrado</i>	41
5.2.1 Estudio paramétrico 4	43
5.2.2 Estudio paramétrico 5	44
5.2.3 Estudio paramétrico 6	46
5.2.4 Análisis del modelo cuadrado	48
5.3 <i>Modelo hueso</i>	48
5.3.1 Estudio paramétrico 7	50
5.3.2 Estudio paramétrico 8	52

5.3.3	Estudio paramétrico	9	54
5.3.4	Análisis modelo hueso		56
5.4	<i>Comparativa de modelos</i>		56
6.	Conclusiones		59
	Referencias		61
	Anexo A		63
	Anexo B		79
	Anexo C		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4–1. Parámetros del modelo elíptico	9
Tabla 4–2. Parámetros del modelo cuadrado	10
Tabla 4–3. Parámetros del modelo hueso	10
Tabla 4–4. Elementos de la geometría elíptica	13
Tabla 4–5. Elementos de la geometría cuadrado	13
Tabla 4–6. Operaciones del modelo cuadrado	14
Tabla 4–7. Elementos de la geometría del modelo hueso	14
Tabla 4–8. Operaciones del modelo hueso	14
Tabla 4–9. Propiedades del aire	23
Tabla 4–10. Expresiones de las funciones	23
Tabla 4–11. Propiedades del aluminio	24
Tabla 4–12. Propiedades del Acero	25
Tabla 4–13. Propiedades del vidrio de silicio	25
Tabla 4–14. Composición de los dominios	26
Tabla 4–15. Parámetros de transferencia de calor en sólidos	27
Tabla 4–16. Parámetros del flujo turbulento	29
Tabla 4–17. Parámetros de campos magnéticos	30
Tabla 4–18. Parámetros de multifísica	32
Tabla 0–1. Modelo elíptico: estudio paramétrico 1 primera casuística	79
Tabla 0–2. Modelo elíptico: estudio paramétrico 2 primera casuística	79
Tabla 0–3. Modelo elíptico: estudio paramétrico 3 primera casuística	79
Tabla 0–4. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 1 primera casuística	80
Tabla 0–5. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 primera casuística con $\text{Alpha}=0^\circ$	80
Tabla 0–6. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 primera casuística con $\text{Alpha}=45^\circ$	80
Tabla 0–7. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 primera casuística con $\text{Alpha}=0^\circ$	81
Tabla 0–8. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 primera casuística con $\text{Alpha}=45^\circ$	81
Tabla 0–9. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 primera casuística con factor de anchura=3	81
Tabla 0–10. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 primera casuística con factor de anchura=4	82
Tabla 0–11. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 primera casuística con factor de anchura=3	82
Tabla 0–12. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 primera casuística con factor de anchura=4	82
Tabla 0–13. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 primera casuística con factor de anchura=3	83
Tabla 0–14. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 primera casuística con factor de anchura=4	83
Tabla 0–15. Modelo elíptico: estudio paramétrico 1 segunda casuística	84
Tabla 0–16. Modelo elíptico: estudio paramétrico 2 segunda casuística	84

Tabla 0–17. Modelo elíptico: estudio paramétrico 3 segunda casuística	84
Tabla 0–18. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 1 segunda casuística	84
Tabla 0–19. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 segunda casuística con $\text{Alpha}=0^\circ$	85
Tabla 0–20. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 segunda casuística con $\text{Alpha}=45^\circ$	85
Tabla 0–21. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 segunda casuística con $\text{Alpha}=0^\circ$	85
Tabla 0–22. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 segunda casuística con $\text{Alpha}=45^\circ$	86
Tabla 0–23. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 segunda casuística con factor de anchura=3	86
Tabla 0–24. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 segunda casuística con factor de anchura=4	87
Tabla 0–25. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 segunda casuística con factor de anchura=3	87
Tabla 0–26. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 segunda casuística con factor de anchura=4	87
Tabla 0–27. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 segunda casuística con factor de anchura=3	88
Tabla 0–28. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 segunda casuística con factor de anchura=4	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1. Geometría modelo elíptico	11
Figura 4-2. Geometría modelo cuadrado	12
Figura 4-3. Geometría modelo hueso $\text{Alpha}=0^\circ$	12
Figura 4-4. Geometría modelo hueso $\text{Alpha}=90^\circ$	12
Figura 4-5. Modelo elíptico: Dominio 1	15
Figura 4-6. Modelo elíptico: Dominio 2	15
Figura 4-7. Modelo elíptico: Dominio 3	16
Figura 4-8. Modelo cuadrado: Dominio 1	16
Figura 4-9. Modelo cuadrado: Dominio 2	16
Figura 4-10. Modelo cuadrado: Dominio 3	17
Figura 4-11. Modelo hueso: Dominio 1	17
Figura 4-12. Modelo hueso: Dominios 3 y 4	17
Figura 4-13. Modelo hueso: Dominio 2	18
Figura 4-14. Contorno 4 del modelo elíptico	18
Figura 4-15. Contornos 2 y 3 del modelo elíptico	19
Figura 4-16. Contorno 1 del modelo elíptico	19
Figura 4-17. Contornos 5, 6, 9 y 12 del modelo elíptico	19
Figura 4-18. Contornos 2 y 3 del modelo cuadrado	20
Figura 4-19. Contorno 4 del modelo cuadrado	20
Figura 4-20. Contorno 1 del modelo cuadrado	21
Figura 4-21. Contornos 5, 6, 9 y 12 del modelo cuadrado	21
Figura 4-22. Contornos 2 y 3 del modelo hueso	22
Figura 4-23. Contorno 4 del modelo hueso	22
Figura 4-24. Contorno 1 del modelo hueso	22
Figura 4-25. Contornos 13-20 del modelo hueso	23
Figura 4-26. Vista general del mallado	32
Figura 4-27. Vista en detalle del mallado 1	33
Figura 4-28. Vista en detalle del mallado 2	33
Figura 5-1. Modelo elíptico: campo de velocidades y de temperaturas para $ff=1,3$	36
Figura 5-2. Modelo elíptico: campo de velocidades y de temperaturas para $ff=1$	36
Figura 5-3. Modelo elíptico: campo de velocidades y de temperaturas para $ff=0,7$	37
Figura 5-4. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 1	38
Figura 5-5. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 1	38
Figura 5-6. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 2	39

Figura 5-7. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio 2	39
Figura 5-8. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 3	40
Figura 5-9. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 3	41
Figura 5-10. Modelo cuadrado: campo de velocidades y de temperaturas para $\text{Alpha}=45^\circ$	42
Figura 5-11. Modelo cuadrado: campo de velocidades y de temperaturas para $\text{Alpha}=0^\circ$	42
Figura 5-12. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 4	43
Figura 5-13. Modelo cuadrado: gráfico temperaturas del estudio paramétrico 4	44
Figura 5-14. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 para $\text{Alpha}=0^\circ$	44
Figura 5-15. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio 5 para $\text{Alpha}=0^\circ$	45
Figura 5-16. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 para $\text{Alpha}=45^\circ$	45
Figura 5-17. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 5 para $\text{Alpha}=45^\circ$	46
Figura 5-18. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 para $\text{Alpha}=0^\circ$	46
Figura 5-19. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 para $\text{Alpha}=0^\circ$	47
Figura 5-20. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 para $\text{Alpha}=45^\circ$	47
Figura 5-21. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 para $\text{Alpha}=45^\circ$	48
Figura 5-22. Modelo hueso: campo de velocidades y de temperaturas para $\text{Alpha}=90^\circ$	49
Figura 5-23. Modelo hueso: campo de velocidades y de temperaturas para $\text{Alpha}=0^\circ$	49
Figura 5-24. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=3	50
Figura 5-25. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=3	51
Figura 5-26. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=4	51
Figura 5-27. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=4	52
Figura 5-28. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=3	52
Figura 5-29. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=3	53
Figura 5-30. Modelo hueso: Temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=4	53
Figura 5-31. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=4	54
Figura 5-32. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 9 para un factor de anchura=3	54
Figura 5-33. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 para un factor de anchura=3	55
Figura 5-34. Modelo hueso: temperaturas del estudio 9 para un factor de anchura=4	55
Figura 5-35. Modelo hueso: Gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 para un factor de anchura=4	56
Figura 5-36. gráfico comparativo de los distintos modelos	57
Figura 5-37. Gráfico comparativo de 3 modelos	57
Figura 0-1. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 1 segunda casuística	63
Figura 0-2. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 1 segunda casuística	64
Figura 0-3. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 2 segunda casuística	64
Figura 0-4. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 2 segunda casuística	65

Figura 0-5. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 3 segunda casuística	65
Figura 0-6. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 3 segunda casuística	66
Figura 0-7. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 4 segunda casuística	67
Figura 0-8. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 4 segunda casuística	67
Figura 0-9. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=0^\circ$	68
Figura 0-10. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=0^\circ$	68
Figura 0-11. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$	69
Figura 0-12. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$	69
Figura 0-13. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para $\text{Alpha}=0^\circ$	70
Figura 0-14. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para $\text{Alpha}=0^\circ$	70
Figura 0-15. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$	71
Figura 0-16. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$	71
Figura 0-17. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=3	72
Figura 0-18. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=3	72
Figura 0-19. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=4	73
Figura 0-20. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=4	73
Figura 0-21. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=3	74
Figura 0-22. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=3	74
Figura 0-23. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=4	75
Figura 0-24. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=4	75
Figura 0-25. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=3	76
Figura 0-26. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=3	76
Figura 0-27. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=4	77
Figura 0-28. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=4	77

P_J	Potencia aportada por efecto Joule
P_S	Potencia aportada por radiación solar
P_M	Potencia aportada por calentamiento magnético
P_i	Potencia aportada por efecto corona
P_C	Potencia evacuada por convección
P_r	Potencia disipada por radiación
P_W	Potencia disipada por evaporación
Q_J	Calor aportado por efecto Joule
Q_S	Calor aportado por radiación solar
Q_M	Calor aportado por calentamiento magnético
Q_i	Calor aportado por efecto corona
Q_C	Calor evacuado por convección
Q_r	Calor disipado por radiación
Q_W	Calor disipado por evaporación
x°	Notación de grado, x grados.
K_{sk}	Factor efecto pelicular
I	Intensidad
R_{dc}	Resistencia por unidad de longitud en corriente continua
ρ	Resistividad
A	Área de la sección del conductor
ρ_{20}	Resistividad a la temperatura de referencia
α_{20}	Coefficiente lineal de temperatura de la resistividad
ξ_{20}	Coefficiente cuadrático de temperatura de la resistividad
P_M	Pérdidas magnéticas totales

1. INTRODUCCIÓN

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.

-Albert Einstein-

Con el fin de optimizar los diseños de conductores para líneas aéreas, se han de analizar los diversos aspectos que influyen en la adecuación del conductor para la tarea que realiza.

Uno de ellos es el problema electromagnético. La inductancia interna de un cable depende de las características de la sección y sería interesante analizar los efectos que tienen distintas geometrías en ella, pero únicamente son objeto de nuestro estudio aquellos elementos del problema electromagnético que intervienen en el problema térmico. Sin embargo se propone el análisis de la influencia de la geometría en la inductancia propia para estudios futuros con el objeto de hallar una posible mejora. En [1] se podrá encontrar métodos de cálculo de la inductancia propia para conductores de sección no circular.

Otro de ellos es el problema mecánico, en el cual se han de analizar diversos aspectos como la resistencia a la tracción del conductor, la resistencia que ofrece al viento y la cantidad de hielo que pueda acumular sobre sí mismo. El uso de un conductor elíptico para reducir la resistencia que ofrece al viento se estudió en [2], si bien el análisis del problema mecánico no es objeto de estudio en este trabajo.

Otro de los aspectos que se va a analizar es el problema térmico. Los elementos de transmisión de calor que intervienen en un conductor por el que está circulando energía, son la generación de calor por efecto Joule, la conducción por el cable, la radiación, la radiación solar y la convección con el aire que lo rodea, siendo estos dos últimos los que presentan mayores influencias debido a la geometría.

El área y la geometría de la parte superior del cable es un factor clave que influye de manera determinante en la cantidad de radiación que recibe por parte del sol en las horas de mayor irradiación del día, que suelen ser entorno al medio día y las primeras horas de la tarde. La aportación de calor por parte del sol es suficientemente importante, especialmente en latitudes como la de nuestro país, como para que sea objeto de análisis a la hora de diseñar la geometría del conductor.

La convección forzada es el mecanismo de evacuación del calor más importante que se da en un conductor, por lo que el análisis de la influencia de la geometría en el mismo es también obligatorio a la hora de diseñar el contorno exterior del conductor. Teniendo en cuenta que según [2], un conductor elíptico con su eje mayor en la dirección axial favorece la disminución de la carga debido a la resistencia al viento, sería muy positivo si tras el análisis se concluyera que esa misma geometría favorece la evacuación del calor.

En este trabajo se busca analizar los efectos térmicos de distintas formas geométricas de la sección de un conductor para líneas aéreas. En otros estudios anteriores, como en [3] ya se había realizado un análisis con alguno de estos modelos, incluso en [4] se ha diseñado un modelo no macizo que intenta reproducir los hilos de los conductores. Para no entrar en una excesiva complejidad, la mayoría de las geometrías que se analizarán serán macizas y no tendrán en cuenta la geometría de los hilos de los conductores.

El análisis principal se centrará en la comparación de la máxima temperatura alcanzada en cualquier punto de la geometría del conductor para las distintas casuísticas, comparando los resultados obtenidos entre distintos modelos y casuísticas y buscando las tendencias.

2. FÍSICAS UTILIZADAS

Tal vez sea mejor en este mundo nuestro del presente que una idea revolucionaria o un invento, en lugar de ser ayudado y aplaudido, sea obstaculizado y maltratado en su adolescencia.

-Nikola Tesla-

Anteriormente se han nombrado las distintas físicas que intervienen en el estudio de los conductores para líneas aéreas. En este capítulo detallaremos las ecuaciones que intervienen en los problemas físicos que atañen a nuestro análisis. Comentaremos las hipótesis realizadas, las ecuaciones y los parámetros que intervienen.

2.1 Hipótesis del estudio.

En nuestro trabajo se van a asumir algunas hipótesis simplificadoras sobre el análisis para delimitar nuestro estudio. Las hipótesis son las que siguen:

- Se considerará que no existe torsión a lo largo de la dirección longitudinal del cable.
- No se considerará ningún efecto de carga mecánica sobre el cable, ni la carga mecánica provocada por el viento, ni la tensión de tracción, ni el propio peso del cable.
- Todos los materiales tendrán todas sus propiedades constantes, a excepción de la dependencia de la resistencia eléctrica con la temperatura, que consideraremos lineal.

2.2 Hipótesis del modelo

A la hora de diseñar nuestros modelos, también hemos asumido una serie de hipótesis que enumeraremos a continuación:

- Se considera que la dirección de la irradiancia solar es siempre perpendicular, sin considerar el movimiento del sol a lo largo del día.
- Se ha considerado que la irradiancia solar no varía con el tiempo.

2.3 El problema térmico

El estado térmico de un conductor desnudo para líneas aéreas depende de algunos parámetros ambientales como son la temperatura ambiente, la velocidad del viento, su dirección y la irradiancia solar, y de parámetros eléctricos así como de la corriente que circule a través de él.

Si suponemos que todos estos parámetros se mantienen constantes en el tiempo, la línea aérea se encontraría en un estado estacionario. En dicho caso, podríamos realizar un balance de transferencia de calor al conductor, donde el calor generado por efecto Joule y el aportado por la radiación solar es igual al calor evacuado por convección y radiación si no consideramos el calor aportado por el efecto corona ni por las pérdidas magnéticas en el núcleo de acero. Si incluimos estas dos aportaciones de calor y además las pérdidas de calor por evaporación, según [5] la ecuación del balance de calor en potencias queda como sigue:

$$P_J + P_S + P_M + P_i = P_C + P_r + P_W$$

Si usamos ahora calores en lugar de potencias en el balance la ecuación quedaría como sigue:

$$\text{Calor generado} = \text{Calor evacuado}$$

$$Q_J + Q_S + Q_M + Q_i + Q_C + Q_r + Q_W$$

El calentamiento producido por el efecto corona se puede despreciar ya que sólo es significativo bajo condiciones atmosféricas con un alto grado de humedad y altas velocidades del viento. Las pérdidas por evaporación, aunque pueden ser algo más significativas, no se tienen en cuenta a la hora de realizar los cálculos para hallar la intensidad máxima admisible del conductor.

$$Q_J + Q_S + Q_M = Q_C + Q_r$$

El calentamiento por efectos magnéticos se puede incluir en el término de Joule si incrementamos la resistencia eficaz del conductor, con lo que nuestra ecuación finalmente quedará como sigue:

$$Q_J + Q_S = Q_C + Q_r$$

Es una expresión más simple que la inicial pero no pierde demasiada precisión, con lo que será válida para nuestro análisis.

Cálculo del calor aportado por efecto Joule

En corriente alterna, tenemos que considerar el aumento de la resistencia efectiva del conductor debido al efecto pelicular, en el cual la corriente no se distribuye uniformemente por la sección del conductor sino que se distribuye de tal manera que en las zona exterior del conductor hay mayor densidad de corriente que por la zona interior del conductor. En este caso, el calentamiento producido por efecto Joule se puede expresar:

$$P_J = K_{Sk} \cdot I^2 \cdot R_{dc}$$

Los valores del factor corrector se pueden calcular analíticamente utilizando la función de Bessel o bien mediante un método gráfico, menos preciso pero más rápido.

La resistencia por unidad de longitud depende de la resistividad del material, que a su vez depende de la temperatura media del conductor, y del área de la sección del conductor.

$$R_{dc} = \rho(T) \cdot A$$

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20) + \xi_{20} \cdot (T - 20)^2]$$

Cálculo del calentamiento magnético

En los conductores con núcleo de acero, cómo nuestro conductor de aluminio reforzado con acero, el flujo magnético alterno axial provocado por las distintas capas conductoras provocan pérdidas que causan un calentamiento en el núcleo de acero, P_{core} . Al calentamiento provocado por la redistribución de las densidades de corriente en los alambres no ferrosos, P_{redis} , se le llama efecto transformador.

$$P_M = P_{core} + P_{redis}$$

Cálculo del calor aportado por radiación solar

La potencia que un conductor recibe por radiación solar depende del diámetro exterior del conductor, D (m), de la absorptividad de la superficie del conductor α_s , y de la irradiancia proveniente del sol Q_{sol} ($\frac{W}{m^2}$).

$$P_S = D \cdot \alpha_s \cdot Q_{sol}$$

El valor de la absorptividad de un conductor varía en función de la edad del conductor, de las condiciones del aire que lo rodea y de los distintos tratamientos que se le hayan podido aplicar. Un conductor nuevo podría tener un valor de absorptividad en torno a 0.2, mientras que uno que tuviese muchos años de uso en un entorno industrial podría tener un valor alrededor de 0.9. En este trabajo, se usarán valores de 0.6 o 0.8.

En cuanto al valor de la irradiancia, hay que hacer una serie de consideraciones. La irradiancia total que recibe el conductor no es siempre la misma a lo largo de toda la línea. Depende de su localización, de las condiciones ambientales, como la claridad del aire, la orientación, la radiación reflejada por el suelo, etc.

Para diseñar líneas específicas, se suele tomar siempre el caso más desfavorable, sin embargo, como en este trabajo no se está diseñando una línea concreta, sino que se está analizando cómo influye la geometría del conductor bajo diferentes condiciones, se tomarán diferentes valores de Irradiancia comprendidos entre 700 y $1300 \frac{W}{m^2}$.

Para un cálculo de la Irradiancia bajo unas condiciones concretas, véase [5]

Cálculo del calor evacuado por convección

La convección es el método de evacuación de calor más importante en los conductores de las líneas aéreas. Existen dos tipos de convección que deben considerarse, la convección natural y la forzada. La convección natural se da cuando la velocidad del viento es cero o prácticamente cero. En el caso de vientos moderados o fuertes, la contribución de la convección natural es despreciable frente a la de la forzada. En este trabajo, realizaremos los análisis con velocidades de viento comprendidas entre 1 y $10 \frac{m}{s}$.

La potencia evacuada por convección depende del coeficiente convectivo o coeficiente de película $h_c (\frac{W}{K \cdot m^2})$. Existen diversas maneras para el cálculo del coeficiente h_c , ya sea por métodos analíticos, numéricos o experimentales. De manera experimental, se puede calcular el calor evacuado por convección expresándolo en función del número de Nusselt de la siguiente manera:

$$P_C = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu$$

Siendo λ_f la conductividad térmica del aire a la temperatura T_f , que es la temperatura de la capa de aire en contacto con la superficie del conductor, T_s la temperatura de la superficie del conductor y T_a la temperatura ambiente. El valor de λ_f se puede calcular como sigue:

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2$$

Y el valor de T_f :

$$T_f = 0.5 \cdot (T_s + T_a)$$

El número de Nusselt se calculará con distintas fórmulas en función de si se trata de convección forzada o natural.

Cálculo del calor evacuado por radiación

El calor total evacuado por radiación se puede separar en dos componentes, el calor cedido por radiación al terreno y el calor cedido por radiación al cielo. Utilizando la ley de Stefan-Boltzmann:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \mathcal{F}_{c-g} \cdot \varepsilon_s \cdot \left[(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] + \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \mathcal{F}_{c-sky} \cdot \varepsilon_s \cdot \left[(T_s + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right]$$

Siendo D el diámetro del conductor en metros, σ_B la constante de Stefan-Boltzmann, \mathcal{F}_{c-g} es la fracción de energía radiada por el conductor que va al terreno, ε_s es la emisividad de la superficie del conductor, T_s es la temperatura de la superficie del conductor, T_g es la temperatura del terreno, \mathcal{F}_{c-sky} es la fracción de energía radiada por el conductor que va al cielo y T_{sky} es la temperatura del trozo de cielo que está sobre el conductor. Suponer que T_g y T_{sky} son iguales a la temperatura ambiente no supondrá una pérdida de precisión significativa, y dado que la suma de \mathcal{F}_{c-g} y \mathcal{F}_{c-sky} es igual a uno, podemos reescribir la ecuación como sigue:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_s \cdot \left[(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right]$$

3. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

La física es demasiado importante para ser dejada a los físicos

-David Hilbert-

El método de los elementos finitos es uno de los métodos numéricos existentes que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias. Es especialmente potente cuando se trabaja con geometrías complejas. Existen otros métodos numéricos como el método de las diferencias finitas que pueden dar mejores resultados que el método de los elementos finitos para cierto tipo de problemas. Sin embargo, el método de los elementos finitos es el más extendido debido a que da buenos resultados en los dominios más dispares y a que se ha desarrollado software de elementos finitos muy potentes, como por ejemplo el software COMSOL Multiphysics 5.2, que será el software de elementos finitos que usaremos para realizar los análisis en este trabajo.

Todo problema físico se analiza mediante un modelo matemático que lo reproduce, gobernado por ecuaciones diferenciales. Para poder representar un problema físico con un modelo matemático, puede tener que realizarse una serie de suposiciones que lo idealicen, sobre la geometría, cinemática, condiciones de contorno, etc.

Cómo con toda solución procedente de un método numérico, es necesario evaluar el grado de precisión de dicha solución. Si no se cumpliesen los criterios establecidos sobre el grado de precisión de la solución, se debe repetir con unos parámetros de solución más afinados, como una malla más fina, hasta que se alcance una precisión que sea considerada suficiente.

Hay que tener en cuenta que el método de los elementos finitos nos dará una solución para un modelo matemático, con todas las suposiciones y simplificaciones que se le hayan realizado, por tanto no podemos esperar que nos aporte información del problema físico que no esté contenida en el modelo. La clave se halla pues, en seleccionar el modelo matemático apropiado.

Para elegir un modelo matemático apropiado debemos tener en cuenta cuál es el problema físico que queremos modelar, y además, seleccionar aquellos modelos que sean eficaces y fiables. Con eficacia nos referimos a que nos dé el mayor grado de precisión con el mínimo coste computacional y con fiabilidad nos referimos a que sabemos que la respuesta que buscamos, podemos obtenerla de un modelo matemático más simple con cierto grado de exactitud de la solución.

Según [6] Existen dos tipos de modelos matemáticos que se pueden usar para representar un problema físico. Los modelos de sistema discreto, como pueden ser los de parámetros agrupados, y los de sistema continuo, como los modelos basados en la mecánica de medios continuos.

La base de los modelos matemáticos de parámetros agrupados es asumir que el estado del sistema puede ser descrito con precisión por magnitudes de un número finito de variables de estado. Para obtener una solución de estos modelos aplicando el método de los elementos finitos hay que seguir 4 pasos:

1. Idealizar el sistema como si fuera un conjunto de elementos ensamblados, discretizando el dominio en una malla de elementos finitos.
2. Los requisitos de equilibrio se establecen en cada elemento en forma de variables de estado.
3. Se conectan los distintos elementos estableciendo ecuaciones entre ellos que relacionan las variables de estado y se introducen las condiciones de contorno.
4. Se resuelven las ecuaciones simultáneamente, obteniendo las variables de estado, y teniendo en cuenta la condición de equilibrio, se calcula la solución para cada elemento.

Los pasos básicos en la resolución de un modelo matemático de sistemas continuos son parecidos a los empleados en la solución de los modelos de parámetros agrupados. Sin embargo, en vez de tratar con elementos discretos, centran su atención en elementos diferenciales con el objetivo de obtener ecuaciones diferenciales que recojan los requisitos de equilibrio de los elementos, las relaciones constitutivas y las condiciones de contorno de los elementos.

4. CASOS ESTUDIADOS

La electricidad es el alma del universo.

-John Wesley-

En este capítulo vamos a detallar todos los modelos empleados para realizar las simulaciones con el software Comsol 5.2. Comentaremos los tres modelos que hemos analizado, el elíptico, el cuadrado y el modelo hueso.

4.1 Parámetros

Son definiciones globales que se podrán emplear en todos los apartados del modelo. En las siguientes tablas mostraremos los parámetros definidos en cada uno de los modelos. Hay que señalar que, durante los análisis, los valores numéricos de algunos parámetros se modifican para realizar estudios paramétricos. En caso de no indicarse nada, se tomará el valor de referencia mostrado en las tablas de este apartado.

4.1.1 Elíptico

En la siguiente tabla se muestran los parámetros del modelo elíptico que se han usado para el estudio. En la tabla se especifica el nombre del parámetro, la expresión que lo define, el valor de referencia y la descripción del mismo.

Tabla 4–1. Parámetros del modelo elíptico

Nombre	Expresión	Valor de referencia	Descripción
Ral	$\sqrt{ff \cdot (\text{AreaAl}/\pi)}$	0.01174 m	Semieje a de la elipse exterior de la zona de aluminio
Rfe	$\sqrt{(\text{Areafe}/\pi) \cdot ff}$	0.0028209 m	Semieje a de la elipse exterior de la zona de acero
AreaAl	$4.3301e-4[\text{m}^2]$	$4.3301e-4 \text{ m}^2$	Sección de aluminio del conductor
Areafe	$25[\text{mm}^2]$	$2.5e-5 \text{ m}^2$	Sección de acero del conductor
I	$750[\text{A}]$	750 A	Intensidad que circula por el conductor
Qsol	$800[\text{W}/\text{m}^2]$	$800 \text{ W}/\text{m}^2$	Irradiancia solar
T0	$20[\text{degC}]$	293.15 K	Temperatura ambiente

Nombre	Expresión	Valor de referencia	Descripción
Vin	1[m/s]	1 m/s	Velocidad del viento
ff	1	1	Factor de forma de la elipse
ral	(AreaAl/pi)/Ral	0.01174 m	Semieje b de la elipse exterior de la zona de aluminio
rfe	(Areafe/pi)/Rfe	0.0028209 m	Semieje b de la elipse exterior de la zona de acero

4.1.2 Cuadrado

A continuación se muestra la tabla con los parámetros en relación al modelo cuadrado, en el que se puede observar, al igual que en el modelo elíptico los nombres, expresiones, valores de referencia y la descripción de los parámetros.

Tabla 4-2. Parámetros del modelo cuadrado

Nombre	Expresión	Valor de referencia	Descripción
Ral	sqrt(AreaAl)	0.020809 m	Longitud del lado del cuadrado de aluminio
Rfe	sqrt(Areafe)	0.005 m	Longitud del lado del cuadrado de acero
AreaAl	4.3301e-4[m ²]	4.3301e-4 m ²	Sección de aluminio del conductor
Areafe	25[mm ²]	2.5e-5 m ²	Sección de acero del conductor
I	750[A]	750 A	Intensidad que circula por el conductor
Qsol	800[W/m ²]	800 W/m ²	Irradiancia solar
T0	20[degC]	293.15 K	Temperatura ambiente
Vin	1[m/s]	1 m/s	Velocidad del viento
Alpha	0	0	Ángulo de inclinación del cable cuadrado sobre la horizontal

4.1.3 Hueso

Al igual que en los modelos anteriores, en la siguiente tabla se pueden observar los parámetros del modelo hueso.

Tabla 4-3. Parámetros del modelo hueso

Nombre	Expresión	Valor de referencia	Descripción
Ral	sqrt(AreaAl)	0.0089378 m	Radio mayor de la elipse exterior de la zona de aluminio
AnchuraFE	AlturaFE*factoranchura	0.02348 m	Longitud del lado del rectángulo de acero
AreaAl	433.01[mm ²]/2+AlturaFE*AlturaFE	2.5096e-4 m ²	Sección de aluminio del conductor

Nombre	Expresión	Valor de referencia	Descripción
AreaFE	AlturaFE*AnchuraFE	1.3783e-4 m ²	Sección de acero del conductor
I	750[A]	750 A	Intensidad que circula por el conductor
Qsol	800[W/m^2]	800 W/m ²	Irradiancia solar
T0	20[degC]	293.15 K	Temperatura ambiente
Vin	1[m/s]	1 m/s	Velocidad del viento
Alpha	0	0	Ángulo de inclinación del cable cuadrado
AlturaFE	(0.01174/2)[m]	0.00587 m	Altura del lado del rectángulo de acero
factoranchura	3	3	Relación entre la altura y la anchura del rectángulo de acero

4.2 Geometría

4.2.1 Geometrías finales

A continuación mostraremos unas imágenes con la geometría de los distintos modelos y mostraremos en unas tablas, los elementos con los que se han construido dichas geometrías.

En la Figura 4-1 se muestra la geometría del modelo elíptico para tres valores de factor de forma. Las geometrías de la siguiente imagen vistas de izquierda a derecha se corresponden con un factor de forma 1, 0,7 y 1,3.

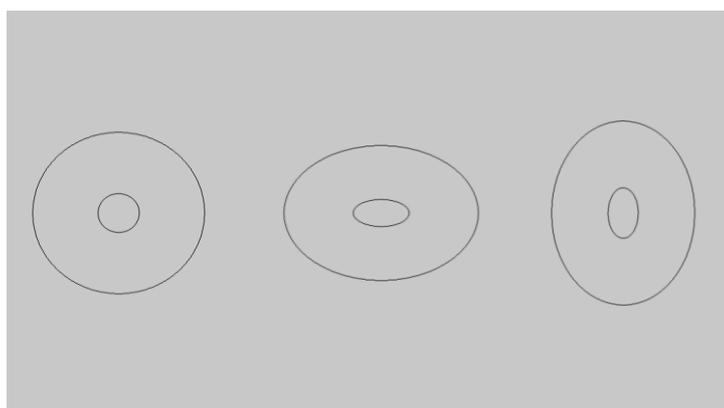


Figura 4-1. Geometría modelo elíptico

En la Figura 4-2 se pueden observar dos geometrías correspondientes al modelo cuadrado; la geometría de la izquierda se corresponde con un valor $\text{Alpha}=0^\circ$ y la geometría de la derecha, $\text{Alpha}=45^\circ$.

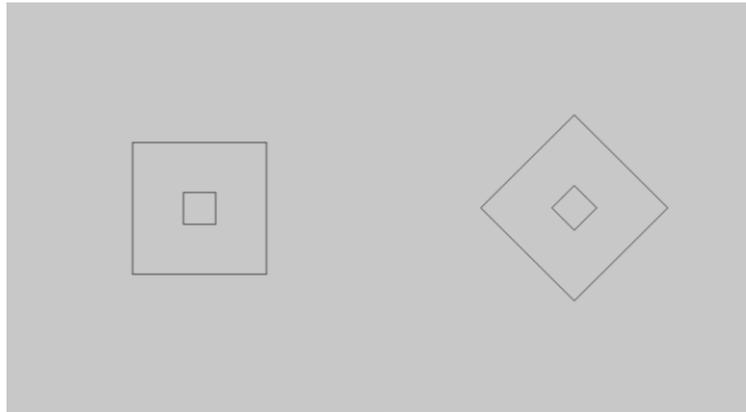


Figura 4-2. Geometría modelo cuadrado

La siguiente Figura, se refiere a la geometría del modelo hueso para $\text{Alpha}=0^\circ$, en el que la figura de la izquierda se corresponde con un factor de achura=3 y la figura de la derecha con un factor de anchura=4.

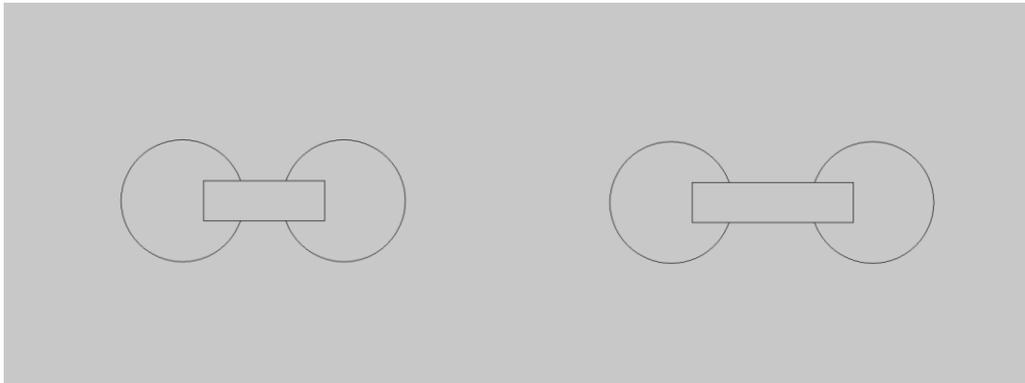


Figura 4-3. Geometría modelo hueso $\text{Alpha}=0^\circ$

La Figura 4-4 también se corresponde con la geometría del modelo hueso pero para $\text{Alpha}=90^\circ$. La figura de la izquierda se corresponde con un factor de achura=3 y la figura de la derecha con un factor de anchura=4, como en la Figura 4-3.

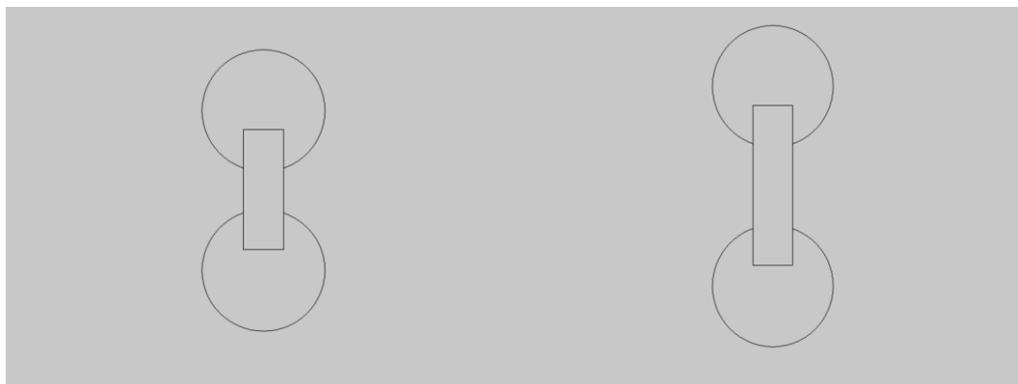


Figura 4-4. Geometría modelo hueso $\text{Alpha}=90^\circ$

4.2.2 Elementos de las geometrías

En el siguiente epígrafe se van a desarrollar los elementos de las geometrías usados para construir los modelos elíptico, cuadrado y de hueso.

4.2.2.1 Elíptico

En la siguiente tabla se especifican los elementos usados para crear la geometría elíptica. Dichos elementos están compuestos por dos elipses y un cuadrado, como se puede ver en la Figura 4-1. Se incluye el tamaño, la posición y el ángulo de rotación de los elementos.

Tabla 4-4. Elementos de la geometría elíptica

Elementos	Tamaño	Posición	Ángulo de rotación
Elipse 1	Semieje a: Ral Semieje b: ral	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0
Elipse 2	Semieje a: Rfe Semieje b: rfe	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0
Cuadrado	Longitud de lado: 1 m	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0

4.2.2.2 Cuadrado

En la Tabla 4-6 se pueden observar los elementos de la geometría para el modelo cuadrado. Dichos elementos se componen de tres cuadrados, como se muestra en la Figura 4-2. Como en la tabla anterior, se especifica además el tamaño, posición y ángulo de rotación.

Tabla 4-5. Elementos de la geometría cuadrado

Elementos	Tamaño	Posición	Ángulo de rotación
Cuadrado 1	Longitud de lado: Ral	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0
Cuadrado 2	Longitud de lado: Rfe	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0
Cuadrado 3	Longitud de lado: 1 m	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0

La siguiente tabla se refiere a las operaciones utilizadas en el modelo cuadrado, que en este caso es la rotación. Los elementos afectados son el cuadrado 1 y cuadrado 2.

Tabla 4-6. Operaciones del modelo cuadrado

Operación	Elementos afectados	Descripción
Rotación	Cuadrado 1 y Cuadrado 2	Rotación: Alpha (en grados)

4.2.2.3 Hueso

En la tabla que se expresa a continuación se reflejan los elementos de la geometría del modelo hueso. Los elementos se componen de dos círculos, un cuadrado y tres rectángulos, como se refleja en la Figura 4-2 y 4-3. También se especifica el tamaño, posición y ángulo de rotación.

Tabla 4-7. Elementos de la geometría del modelo hueso

Elementos	Tamaño	Posición	Ángulo de rotación
Círculo 1	Radio: Ral	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0
rectángulo 1	Anchura: AnchuraFE Altura: AlturaFE	Base: esquina X: Ral-AlturaFE Y: -AlturaFE/2	0
Cuadrado 1	Longitud de lado: 1 m	Base: Centro X: 0 m Y: 0 m	0
Círculo 1.1	Radio: Ral	Base: Centro X: AnchuraFE+AlturaFE Y: 0 m	0
Rectángulo 2	Anchura: AnchuraFE Altura: AlturaFE	Base: esquina X: Ral-AlturaFE Y: -AlturaFE/2	0
Rectángulo 3	Anchura: AnchuraFE Altura: AlturaFE	Base: esquina X: Ral-AlturaFE Y: -AlturaFE/2	0

La siguiente tabla se refiere a las operaciones utilizadas en el modelo hueso, que en este caso es la diferencia y la rotación. Los elementos afectados son los dos círculos y los tres rectángulos

Tabla 4-8. Operaciones del modelo hueso

Operación	Elementos afectados	Descripción
Diferencia 1	Objeto a añadir: Círculo 1 Objeto a sustraer: rectángulo 1	El objeto a sustraer es eliminado tras la operación
Diferencia 2	Objeto a añadir: Círculo 1.1 Objeto a sustraer: rectángulo 2	El objeto a sustraer es eliminado tras la operación
Rotación	Diferencia 1 Diferencia 2 Rectángulo 3	Rotación: Alpha (en grados)

4.2.3 Dominios

Vamos a definir los dominios para cada uno de los modelos empleados lo que facilitará a posteriori la identificación de los dominios afectados por cada física o los materiales de los que están compuestos dichos dominios.

4.2.3.1 Dominios modelo elíptico

En las figuras 4-9, 4-10 y 4-11 se muestran los dominios correspondientes al modelo elíptico. La Figura 4-9 se refiere al dominio 1, la Figura 4-10 al dominio 2 y la Figura 4-11 al dominio 3 como se muestra a continuación:

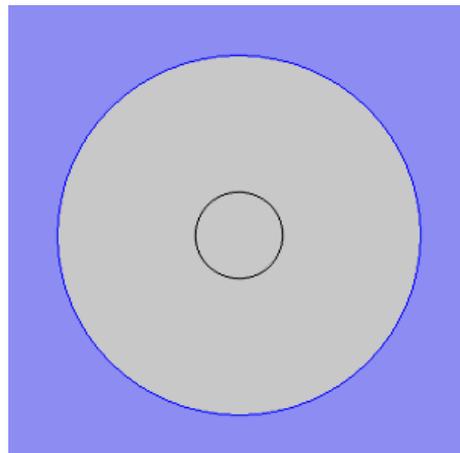


Figura 4-5. Modelo elíptico: Dominio 1

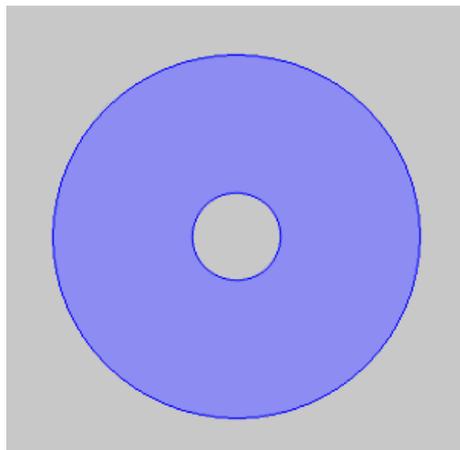


Figura 4-6. Modelo elíptico: Dominio 2

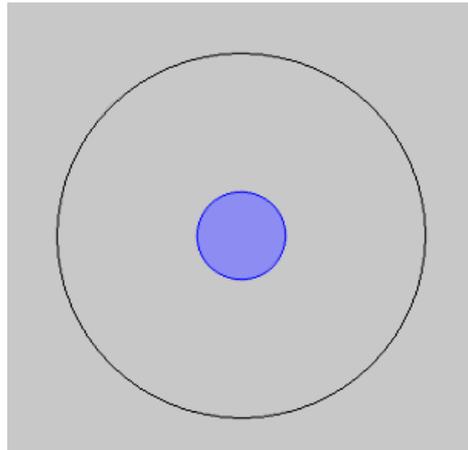


Figura 4-7. Modelo elíptico: Dominio 3

4.2.3.2 Dominios modelo cuadrado

En las figuras 4-12, 4-13 y 4-14 se muestran los dominios correspondientes al modelo cuadrado. La Figura 4-12 se refiere al dominio 1, la Figura 4-13 al dominio 2 y la Figura 4-14 al dominio 3 como se muestra a continuación:

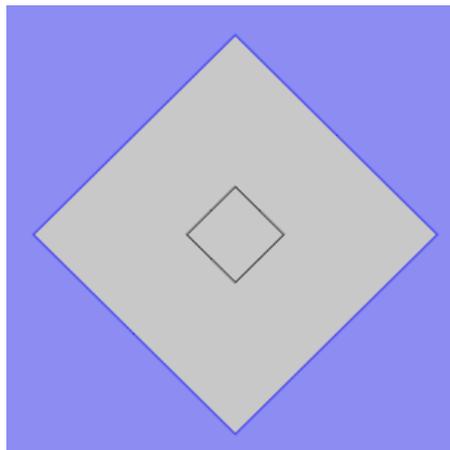


Figura 4-8. Modelo cuadrado: Dominio 1

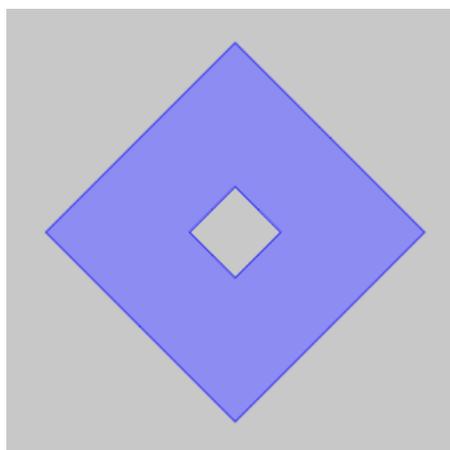


Figura 4-9. Modelo cuadrado: Dominio 2

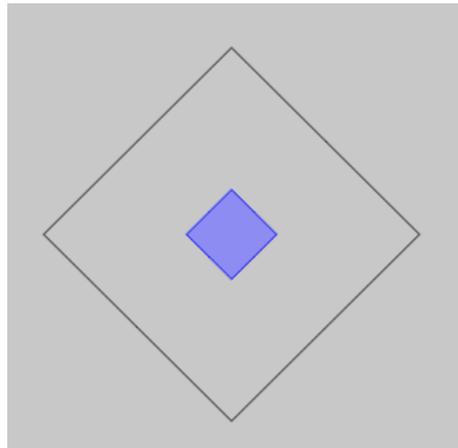


Figura 4-10. Modelo cuadrado: Dominio 3

4.2.3.3 Dominios modelo hueso

En las figuras 4-15, 4-16 y 4-17 se muestran los dominios correspondientes al modelo de hueso. La Figura 4-15 se refiere al dominio 1, la Figura 4-16 a los dominios 3 y 4, y la Figura 4-17 al dominio 2 como se muestra a continuación:

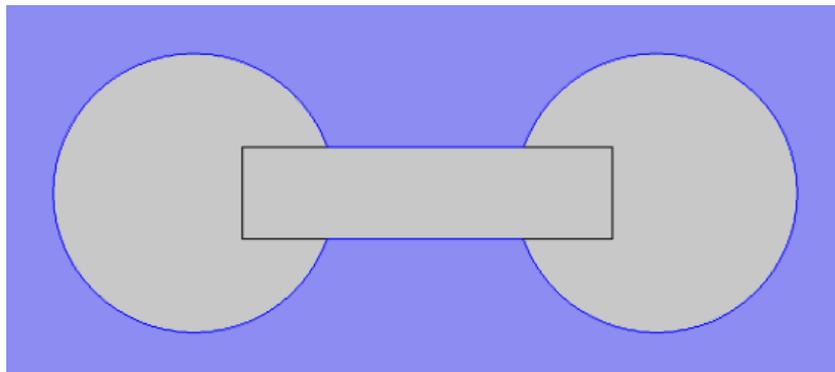


Figura 4-11. Modelo hueso: Dominio 1

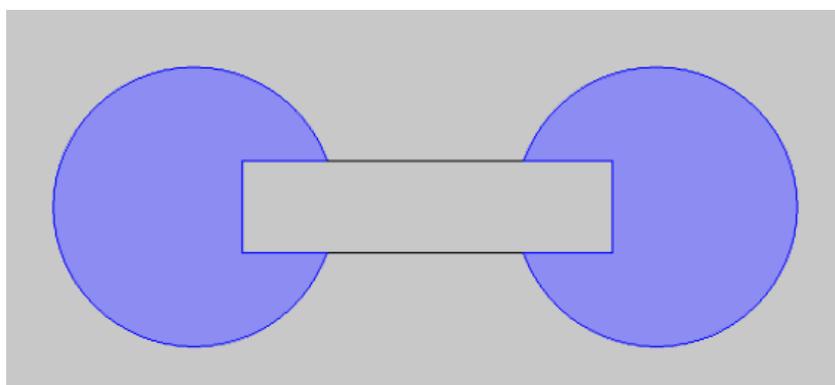


Figura 4-12. Modelo hueso: Dominios 3 y 4

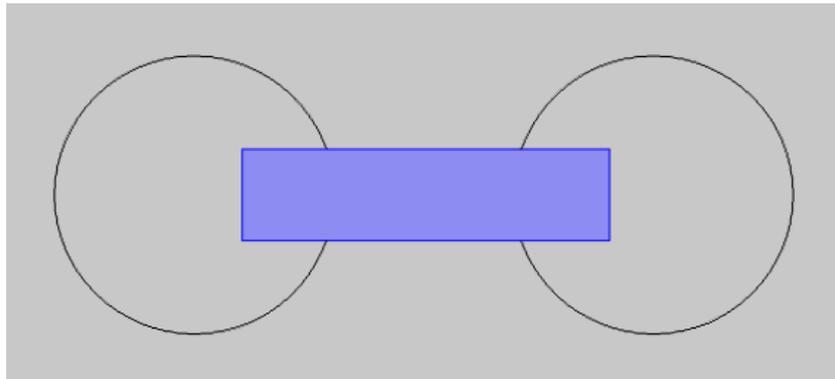


Figura 4-13. Modelo hueco: Dominio 2

4.2.4 Contornos

A continuación vamos a definir algunos contornos de los modelos, que usaremos más adelante para señalar los contornos afectados por algunas físicas.

4.2.4.1 Contornos modelo elíptico

En las figuras 4-21, 4-22, 4-23 y 4-24 se muestran los contornos correspondientes al modelo elíptico. La Figura 4-21 se refiere al contorno 4, la Figura 4-22 a los contornos 2 y 3, la Figura 4-23 al contorno 1 y la Figura 4-24 a los contornos 5, 6, 9 y 12 como se muestra a continuación:

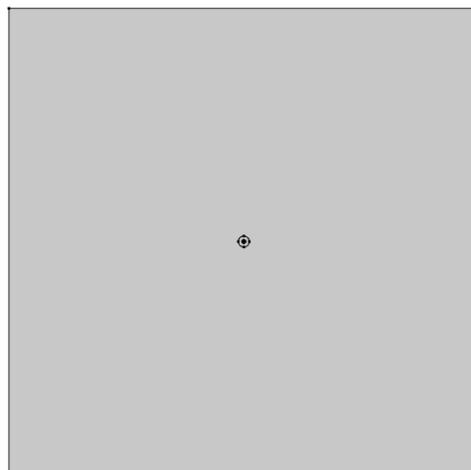


Figura 4-14. Contorno 4 del modelo elíptico

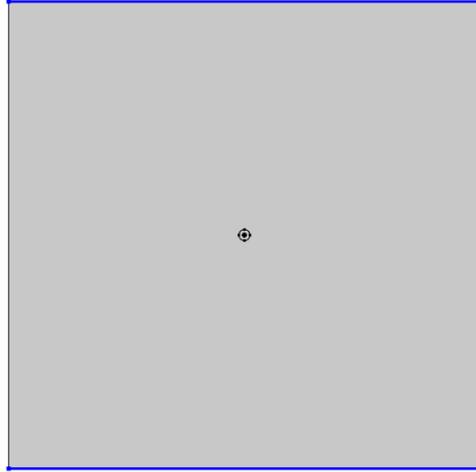


Figura 4-15. Contornos 2 y 3 del modelo elíptico

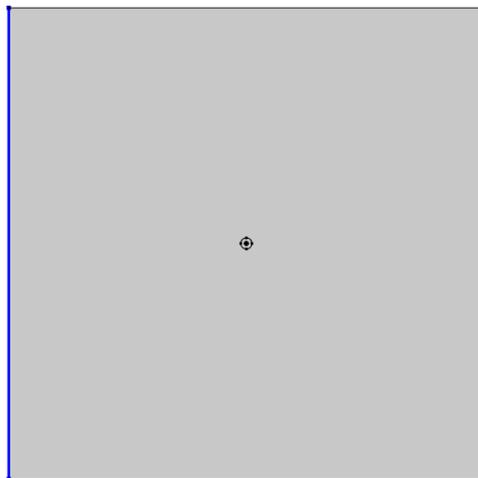


Figura 4-16. Contorno 1 del modelo elíptico

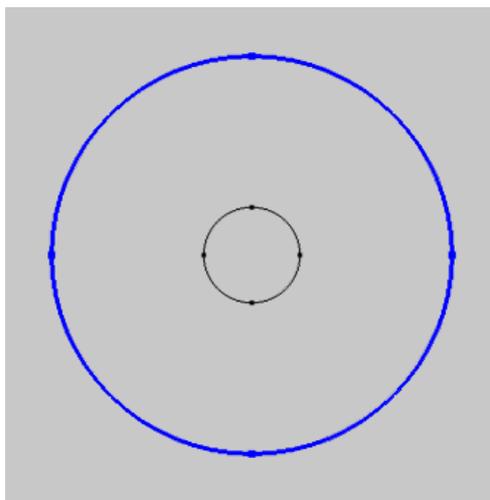


Figura 4-17. Contornos 5, 6, 9 y 12 del modelo elíptico

4.2.4.2 Contornos modelo cuadrado

En las figuras 4-25, 4-26, 4-27 y 4-28 se muestran los contornos correspondientes al modelo cuadrado. La Figura 4-25 se refiere a los contornos 2 y 3, la Figura 4-26 al contorno 4, la Figura 4-27 al contorno 1 y la Figura 4-28 a los contornos 5, 6, 9 y 12 como se muestra a continuación:

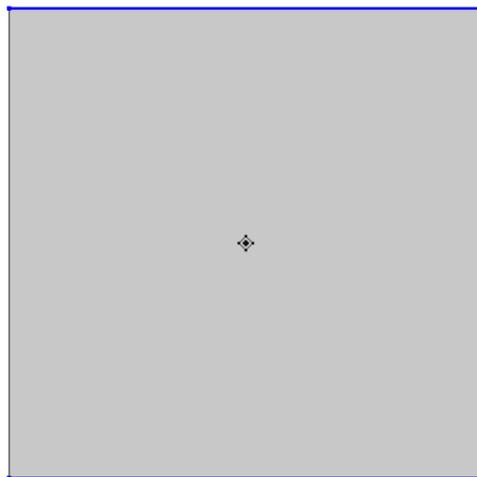


Figura 4-18. Contornos 2 y 3 del modelo cuadrado

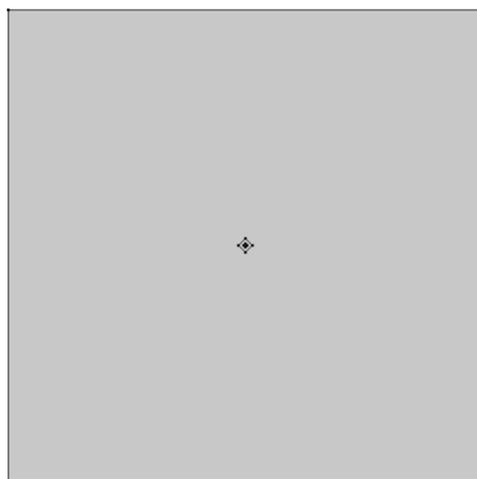


Figura 4-19. Contorno 4 del modelo cuadrado

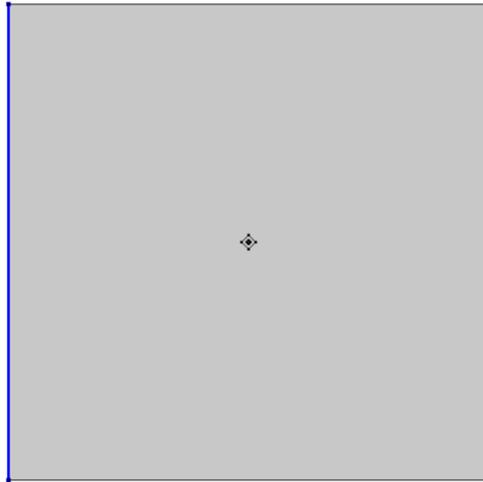


Figura 4-20. Contorno 1 del modelo cuadrado

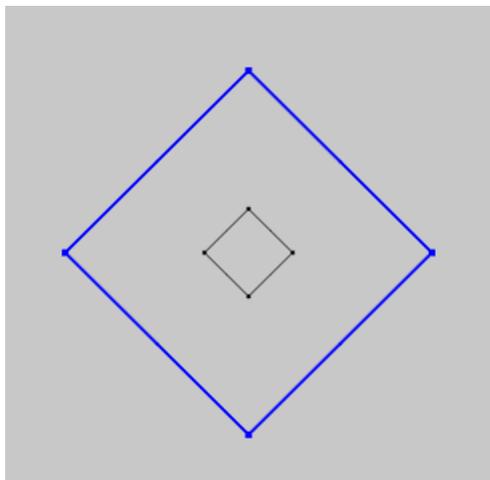


Figura 4-21. Contornos 5, 6, 9 y 12 del modelo cuadrado

4.2.4.3 Contornos modelo hueso

En las figuras 4-29, 4-30, 4-31 y 4-32 se muestran los contornos correspondientes al modelo de hueso. La Figura 4-29 se refiere a los contornos 2 y 3, la Figura 4-30 al contorno 4, la Figura 4-31 al contorno 1 y la Figura 4-32 a los contornos 13 al 20 como se muestra a continuación:

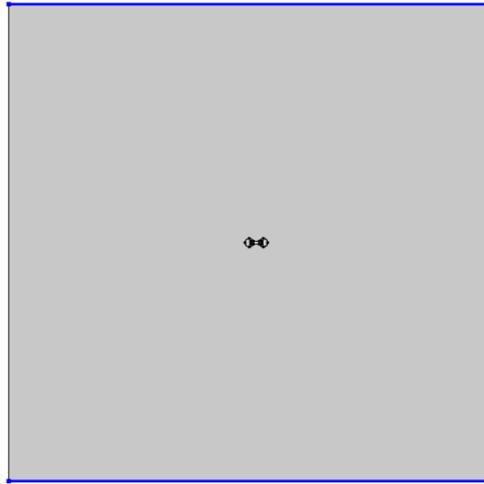


Figura 4-22. Contornos 2 y 3 del modelo hueso

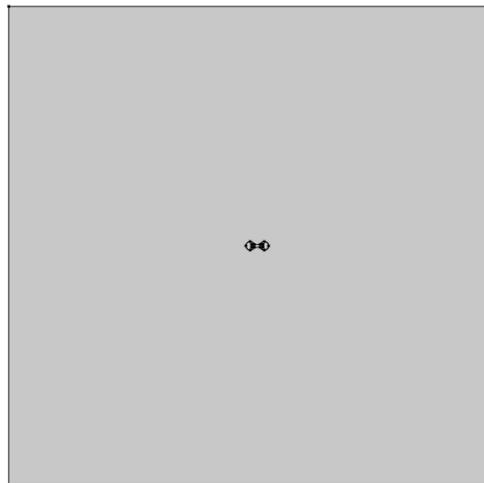


Figura 4-23. Contorno 4 del modelo hueso

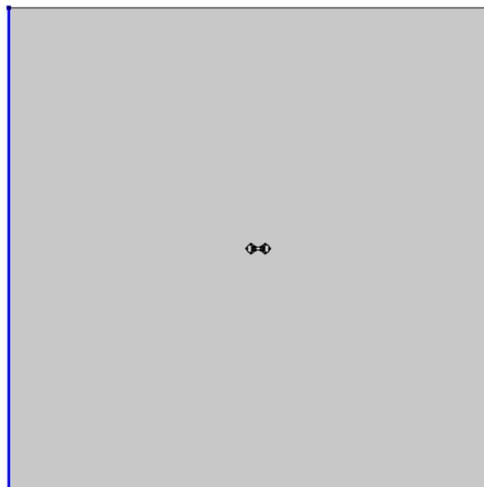


Figura 4-24. Contorno 1 del modelo hueso

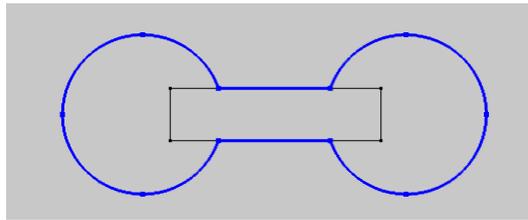


Figura 4-25. Contornos 13-20 del modelo hueso

4.3 Materiales

En este apartado definiremos los materiales de los que está compuesto cada dominio y sus propiedades.

4.3.1 Propiedades físicas

A continuación mostraremos los valores de las propiedades físicas de cada material empleado en nuestros modelos.

Tabla 4-9. Propiedades del aire

Aire				
Propiedad	Variable	Expresión	Unidad	Tamaño
Permeabilidad relativa	mur	1		3x3
Permitividad relativa	epsilon_r	1		3x3
Viscosidad dinámica	mu	$\eta(T[1/K])[Pa*s]$	Pa*s	1x1
Coefficiente de dilatación adiabática	gamma	1.4		1x1
Conductividad eléctrica	sigma	0[S/m]	S/m	3x3
Calor específico a presión constante	Cp	$C_p(T[1/K])[J/(kg*K)]$	J/(kg*K)	1x1
Densidad	Rho	$\rho(p_A[1/Pa], T[1/K])[kg/m^3]$	Kg/m ³	1x1
Conductividad térmica	k	$k(T[1/K])[W/(m*K)]$	W/(m*K)	3x3
Velocidad del sonido	C	$c_s(T[1/K])[m/s]$	m/s	1x1
Índice de refracción, parte real	n	1		3x3
Índice de refracción, parte imaginaria	ki	0		3x3

Tabla 4-10. Expresiones de las funciones

Función	Expresión
eta	$-8.38278E-7+8.35717342E-8*T^1-7.69429583E-11*T^2+4.6437266E-14*T^3-1.06585607E-17*T^4$
Cp	$1047.63657-0.372589265*T^1+9.45304214E-4*T^2-6.02409443E-7*T^3+1.2858961E-10*T^4$

Función	Expresión
Rho	$\rho_A \cdot 0.02897 / (8.314 \cdot T)$
K	$-0.00227583562 + 1.15480022E-4 \cdot T^1 - 7.90252856E-8 \cdot T^2 + 4.11702505E-11 \cdot T^3 - 7.43864331E-15 \cdot T^4$
cs	$\sqrt{1.4 \cdot 287 \cdot T}$

Tabla 4–11. Propiedades del aluminio

Aluminio				
Propiedad	Variable	Expresión	Unidad	Tamaño
Permeabilidad relativa	mur	1		3x3
Calor específico a presión constante	Cp	900[J/(kg·K)]	J/(kg·K)	1x1
Conductividad térmica	k	238[W/(m·K)]	W/(m·K)	3x3
Conductividad eléctrica	sigma	3.774e7[S/m]	S/m	3x3
Permitividad relativa	epsilon _r	1		3x3
Coefficiente de expansión térmica	Alpha	23e-6[1/K]	1/K	3x3
Densidad	Rho	2700[kg/m ³]	Kg/m ³	1x1
Módulo de Young	E	70e9[Pa]	Pa	1x1
Coefficiente de Poisson	Un	0.33	1	1x1
Módulo elástico de tercer orden de Murnaghan	l	-2.5e11[Pa]	N/m ²	1x1
Módulo elástico de tercer orden de Murnaghan	m	-3.3e11[Pa]	N/m ²	1x1
Módulo elástico de tercer orden de Murnaghan	n	-3.5e11[Pa]	N/m ²	1x1
Parámetro de Lamé λ	lambLame	5.1e10[Pa]	N/m ²	1x1
Parámetro de Lamé μ	muLame	2.6e10[Pa]	N/m ²	1x1
Resistividad a la temperatura de referencia	rho0	1/3.774e7[S/m]	Ω·m	1x1
Coefficiente térmico de resistividad	Alpha	0.00403	1/K	1x1
Temperatura de referencia	Tref	20[degC]	K	1x1

Tabla 4–12. Propiedades del Acero

Acero AISI 4340				
Propiedad	Variable	Expresión	Unidad	Tamaño
Permeabilidad relativa	mur	1		3x3
Conductividad eléctrica	sigma	4.032e6[S/m]	S/m	3x3
Coefficiente de expansión térmica	Alpha	12.3e-6[1/K]	1/K	3x3
Calor específico a presión constante	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	1x1
Permitividad relativa	epsilon _r	1		3x3
Densidad	Rho	7850[kg/m ³]	Kg/m ³	1x1
Conductividad térmica	k	44.5[W/(m*K)]	W/(m·K)	3x3
Módulo de Young	E	205e9[Pa]	Pa	1x1
Coefficiente de Poisson	Un	0.28	1	1x1

Tabla 4–13. Propiedades del vidrio de silicio

Vidrio de silicio				
Propiedad	Variable	Expresión	Unidad	Tamaño
Permeabilidad relativa	mur	1		3x3
Conductividad eléctrica	sigma	1e-14[S/m]	S/m	3x3
Coefficiente de expansión térmica	Alpha	0.55e-6[1/K]	1/K	3x3
Calor específico a presión constante	Cp	703[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	1x1
Permitividad relativa	epsilon _r	2.09		3x3
Densidad	Rho	2203[kg/m ³]	Kg/m ³	1x1
Conductividad térmica	k	1.38[W/(m*K)]	W/(m·K)	3x3
Módulo de Young	E	73.1e9[Pa]	Pa	1x1
Coefficiente de Poisson	Un	0.17	1	1x1
Índice de refracción, parte real	n	1.45		3x3
Índice de refracción, parte imaginaria	ki	0		3x3

4.3.2 Composición de los dominios

En la siguiente tabla se muestra para cada material, cuales son los dominios que están constituidos por el mismo.

Tabla 4–14. Composición de los dominios

Elíptico	
Material	Dominio afectado
Aire	1
Aluminio	2
Acero AISI 4340	3
Cuadrado	
Material	Dominio afectado
Aire	1
Aluminio	2
Acero AISI 4340	3
Hueso	
Material	Dominio afectado
Aire	1
Aluminio	3 y 4
Acero AISI 4340	2
Vidrio de Silicio	2 (Sólo en los estudios que se indique)
Con hilos	
Material	Dominio afectado
Aire	1
Aluminio	2
Acero AISI 4340	3

4.4 Físicas añadidas a los modelos

A continuación vamos a detallar las físicas que hemos aplicado a los modelos para realizar las simulaciones. Dado que las físicas añadidas a los distintos modelos son exactamente las mismas y están configuradas exactamente igual, salvo por los dominios a los que afectan o variación de algunos valores en los estudios paramétricos, en este apartado vamos a detallar las físicas de manera general, indicando a qué dominio afectan en cada modelo.

4.4.1 Transferencia de calor en sólidos

La interfaz de transferencia de calor en sólidos se usa para modelar la transferencia de calor en sólidos por conducción, convección y radiación. También incluye funcionalidades disponibles para dominios de fluido.

Tabla 4–15. Parámetros de transferencia de calor en sólidos

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Transferencia de calor en sólidos	General	<p><u>Modelo físico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Radiación de superficie a superficie: Si -Radiación en medio participante: No -Transferencia de calor en tejido biológico: No -Dominio isotérmico: No -Transferencia de calor en medios porosos: No <p><u>Ajustes de radiación</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Dependencia de longitud de onda a la emisividad: Solar y ambiente -Punto final de intervalos 1: $\lambda_1=2.5$ [um] -Índice de refracción en medio transparente: $n=1$ -Radiación exterior, banda espectral ambiental: Exterior es transparente -Utilizar grupos de radiación: No -Método de radiación superficie a superficie: Hemicubo -Resolución de radiación: 256 -Nivel de discretización: Lineal 	1, 2 y 3	1, 2, 3 y 4	1, 2 y 3
Transferencia de calor en sólidos 1	Dominio	<p><u>Conducción de calor, sólido</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Conductividad térmica: del material <p><u>Termodinámica, sólido</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Densidad: Del material -Capacidad térmica a presión constante: Del material 	2 y 3	2, 3 y 4	2 y 3
Valores iniciales	Dominio	Temperatura: T_0	1, 2 y 3	1, 2, 3 y 4	1, 2 y 3
Aislamiento térmico	Contorno		2 y 3	2 y 3	2 y 3

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Transferencia de calor en fluidos	Dominio	<u>Conducción de calor, fluido</u> -Conductividad térmica: del material <u>Termodinámica, fluido</u> -Densidad: Del material -Capacidad térmica a presión constante: Del material -Coeficiente de dilatación adiabática: Del material	1	1	1
Temperatura	Contorno	Temperatura: T0	4	12	4
Flujo saliente	Contorno		1	1	1
Fuente de calor	Dominio	Origen general: Calentamiento electromagnético	2	3 y 4	2
Superficie difusa	Contorno	<u>Radiación superficie a superficie</u> -Incluir radiación superficie a superficie: Si <u>Ajustes de radiación</u> -Dirección de radiación de la banda espectral solar: Opacidad controlada -Dirección de radiación de la banda espectral ambiental: Opacidad controlada <u>Ambiente</u> -Temperatura ambiente: T0 <u>Potencia emisiva fraccional de superficie</u> -Potencia emisiva fraccional: Cuerpo negro/gris <u>Emisividad de superficie</u> -Absorción solar de la banda espectral solar: 0.6 -Emisividad de superficie de la banda espectral ambiental: 0.8	5, 6, 9 y 12	13,14,15,16,17,18,19 y 20	5

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Fuente de radiación externa	General	<p><u>Fuente de radiación externa</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Posición de fuente: Distancia infinita -Dirección de la radiación incidente: [0,-1] -Definición del flujo de calor de fuente: Cuerpo negro -Temperatura de fuente: 5780 K -Fuente de flujo de calor: Qsol 			

4.4.2 Flujo turbulento k-ε

La interfaz de flujo turbulento k-ε se utiliza para simular flujos monofásicos a números de Reynolds altos. La interfaz física es adecuada para flujos incompresibles y flujos compresibles con números de Mach bajos (típicamente menos de 0,3). Las ecuaciones resueltas por el flujo turbulento k-ε son las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds para la conservación del momento y la ecuación de continuidad para la conservación de la masa. Los efectos de la turbulencia se modelan utilizando el modelo k-ε de dos ecuaciones estándar con restricciones de realización.

Tabla 4–16. Parámetros del flujo turbulento

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Flujo turbulento k-ε	general	<p><u>Modelo físico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Compresibilidad: Flujo incompresible -Tipo de modelo de turbulencia: RANS -Modelo de turbulencia: k-ε -Nivel de presión de referencia: 1 atm <p><u>Parámetros de modelo de turbulencia</u></p> <ul style="list-style-type: none"> $C_{e1}=1.44$ $C_{e2}=1.92$ $C_{\mu}=0.09$ $\sigma_k=1$ $\sigma_\epsilon=1.3$ $K_v=0.41$ $B=5.2$ 	1	1	1
Propiedades de fluidos 1	Dominio	Viscosidad dinámica: del material	1	1	1

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Valores iniciales	Dominio	<u>Valores iniciales</u> -Campo de velocidades: [0,0] -Presión: 0 atm	1	1	1
Pared 1	Contorno	Condición de contorno: Funciones de pared	5, 6, 9 y 12	13,14,15,16,17,18,19 y 20	5
Entrada 1	Contorno	Condición de contorno: Velocidad Velocidad normal de entrada: V_{in}	4	4	4
Salida 1	Contorno	Condición de contorno: Presión Presión=0 Pa Suprimir reflujo	1	1	1
Simetría 1	Contorno		2 y 3	2 y 3	2 y 3

4.4.3 Campos magnéticos

La interfaz de campos magnéticos, se utiliza para calcular el campo magnético y las distribuciones de corriente inducida en y alrededor de bobinas, conductores e imanes. Está disponible en 2D y 3D el análisis estacionario, de dominio de frecuencia, de pequeña señal y el modelado en el dominio del tiempo. Se puede extender el rango de frecuencia útil hacia abajo añadiendo una baja conductividad. La interfaz física resuelve las ecuaciones de Maxwell, que se formulan usando el potencial vectorial magnético y, opcionalmente, para bobinas, el potencial eléctrico escalar como variables dependientes.

Tabla 4-17. Parámetros de campos magnéticos

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Campos magnéticos	General	Campo de fondo -Resuelve para: Campo de fondo Componentes -Componentes: Vector potencia fuera del plano Grosor Grosor fuera del plano: 1 m	1, 2 y 3	1, 2, 3 y 4	1, 2 y 3

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Ley de Ampere 1	Dominio	Corriente de conducción -Conductividad eléctrica: Del material Campo eléctrico -Permisividad relativa: Del material Campo magnético -Relación constitutiva: Permeabilidad relativa -Permeabilidad relativa: Del material	1 y 3	1 y 2	1 y 3
Aislamiento magnético	Contorno		1, 2, 3 y 4	1, 2, 3 y 12	1, 2, 3 y 4
Valores iniciales	Dominio	Vector de potencial magnético: [0,0,0]	1, 2 y 3	1, 2, 3 y 4	1, 2 y 3
Ley de ampere 2	Dominio	Corriente de conducción -Conductividad eléctrica: Resistividad linearizada -Resistividad de referencia: Del material -Temperatura de referencia: Del material -Coeficiente de temperatura: Del material Campo eléctrico -Permisividad relativa: Del material Campo magnético -Relación constitutiva: Permeabilidad relativa -Permeabilidad relativa: Del material	2	3 y 4	2
Embobinado simple 1	Dominio	Embobinado simple -Grupo de Bobina: No -Excitación del embobinado: Corriente -Corriente del embobinado: I	2	3 y 4	2

4.4.4 Multifísica

Multifísica contiene cualquier característica física acoplada que es probable que se utilice para un conjunto particular de interfaces físicas añadido al constructor de modelos de COMSOL.

Tabla 4–18. Parámetros de multifísica

Nombre	Ámbito de aplicación	Ajustes	Dominios/ contornos afectados elipse y cuadrado	Dominios/ contornos afectados hueso	Dominios/ contornos afectados con hilos
Flujo no isotérmico 1	General	Propiedades de material -Especifique densidad: Desde la interfaz de transferencia de calor Propiedad turbulencia del calor -Modelo de transferencia de calor con turbulencia: Kays-Crawford Calentamiento del flujo -Incluirán los trabajos realizados por los cambios de presión: No -Incluir disipación viscosa Interfaces acopladas -Flujo de fluido: Flujo turbulento, k-ε -Transferencia de calor: Transferencia de calor en sólidos	1	1	1

4.5 Mallado

El mallado lo ha definido COMSOL en función de las físicas involucradas en cada uno de los modelos. A continuación se muestran unas ilustraciones donde se puede apreciar el mallado construido por el programa.

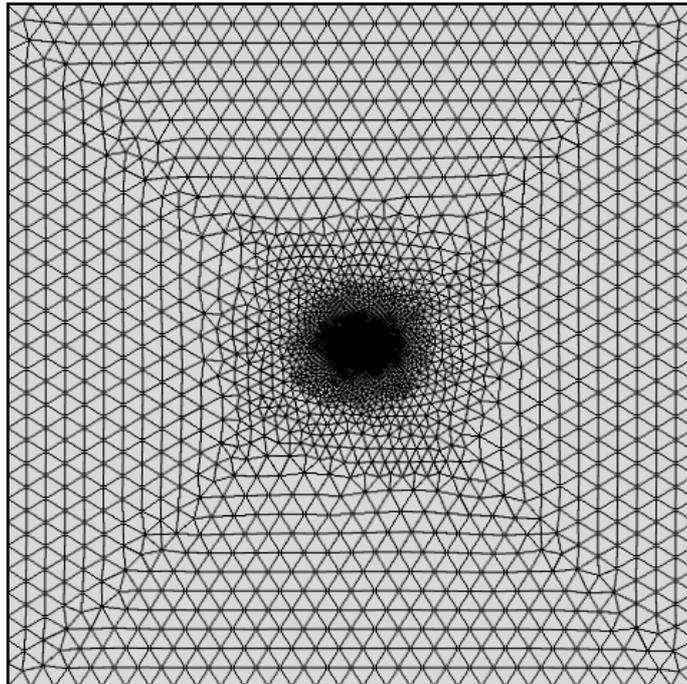


Figura 4-26. Vista general del mallado

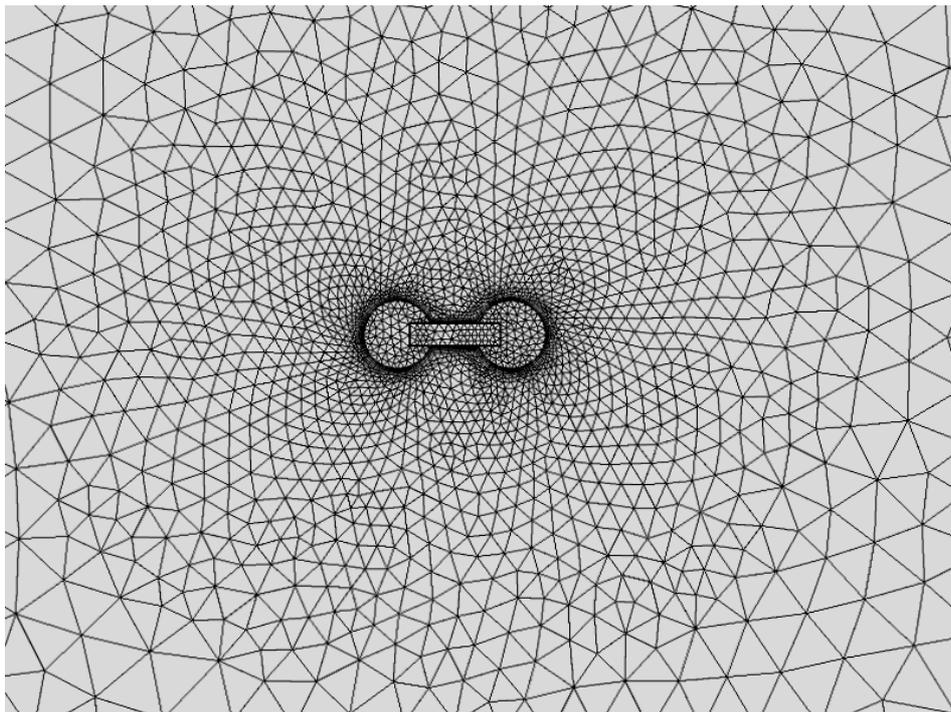


Figura 4-27. Vista en detalle del mallado 1

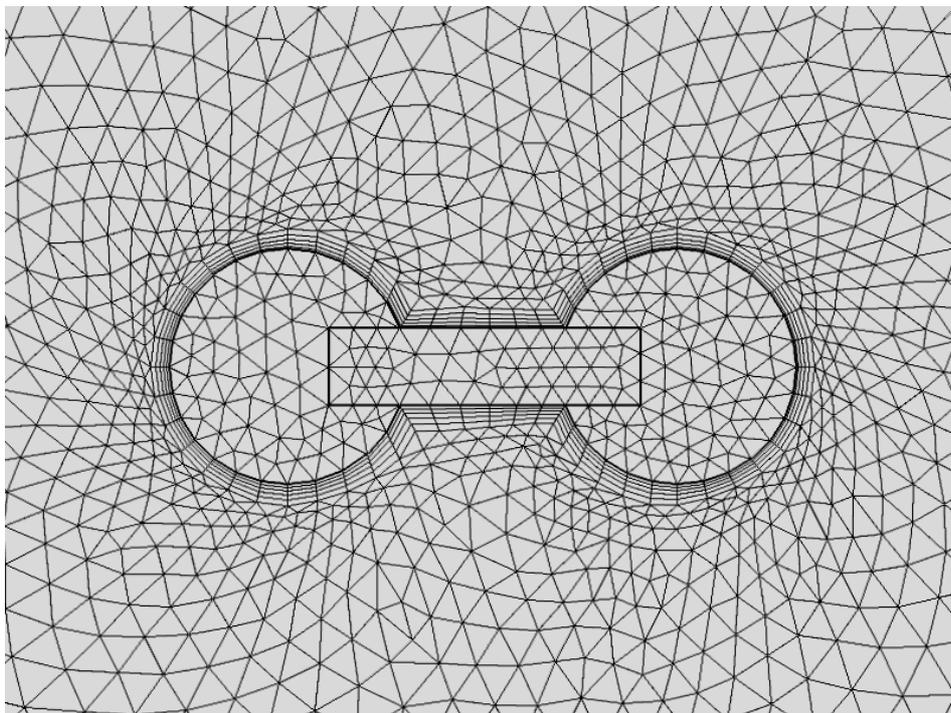


Figura 4-28. Vista en detalle del mallado 2

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Si tu odio pudiera ser convertido en electricidad, se
podría iluminar el mundo entero.

-Nikola Tesla-

En este apartado se van a analizar los valores de temperatura obtenidos de Comsol Multiphysics para los diferentes modelos que se han usado en este estudio. El estudio realizado es estacionario.

Se han realizado simulaciones con dos casuísticas diferentes para todos los modelos estudiados. En la primera casuística, el valor de irradiancia solar establecido es de 800 W/m^2 y la absorción solar de la banda espectral solar es 0,6 (véase el punto 4.4.1) mientras que en la segunda casuística, el valor de irradiancia solar establecido es de 1000 W/m^2 y la absorción solar de la banda espectral solar es 0,8.

En este apartado sólo se van a presentar imágenes y gráficas de la primera casuística, aunque sí se tendrán en cuenta a la hora de realizar el análisis, las imágenes y gráficas de la segunda casuística, que se podrán encontrar en el Anexo A de este documento. La totalidad de los datos que se han utilizado para la construcción de las imágenes y gráficas de este documento se podrán encontrar en el Anexo B.

Los resultados se van a presentar agrupados por modelo, y dentro de un mismo modelo, se van a presentar cada uno de los estudios paramétricos que se han realizado.

5.1 Resultados del modelo elíptico

A continuación se van a presentar los resultados de los estudios paramétricos de la temperatura máxima alcanzada en el conductor con el modelo elíptico. Se han realizado tres estudios; una parametrización de la velocidad del viento con el factor de forma, una parametrización del factor de forma frente a la intensidad que circula por el conductor y otra parametrización del factor de forma frente a la sección del conductor. De ahora en adelante se hará referencia a ellos como estudio paramétrico 1, 2 y 3 respectivamente.

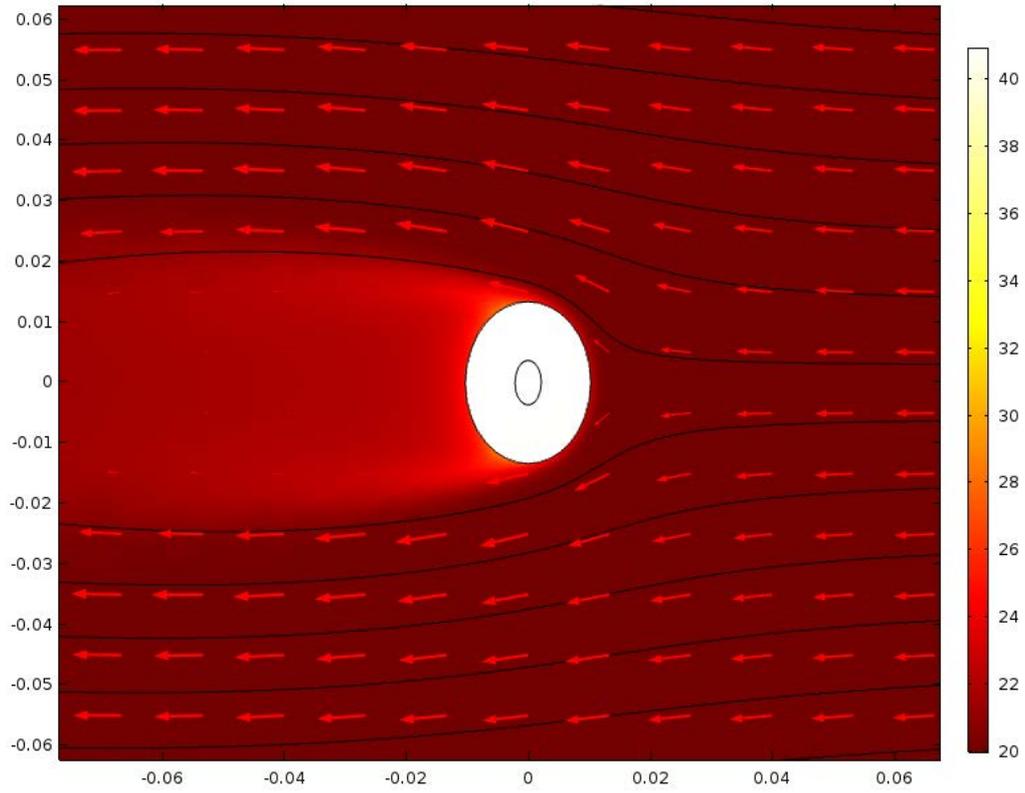


Figura 5-1. Modelo elíptico: campo de velocidades y de temperaturas para $ff=1,3$

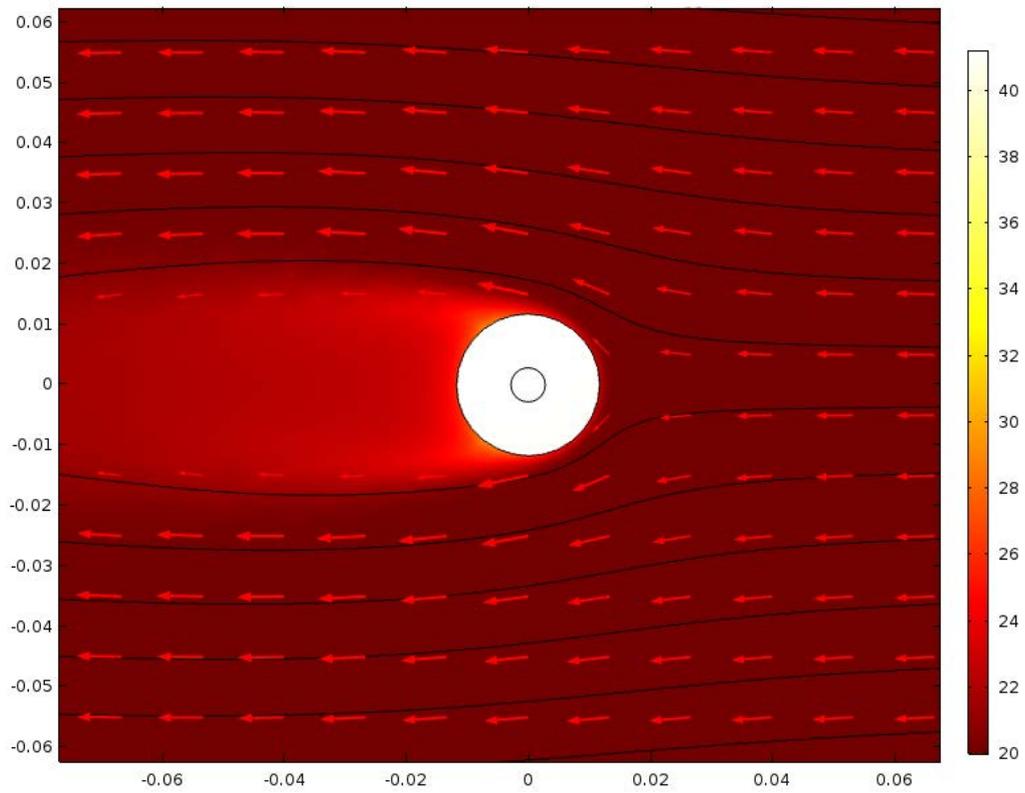


Figura 5-2. Modelo elíptico: campo de velocidades y de temperaturas para $ff=1$

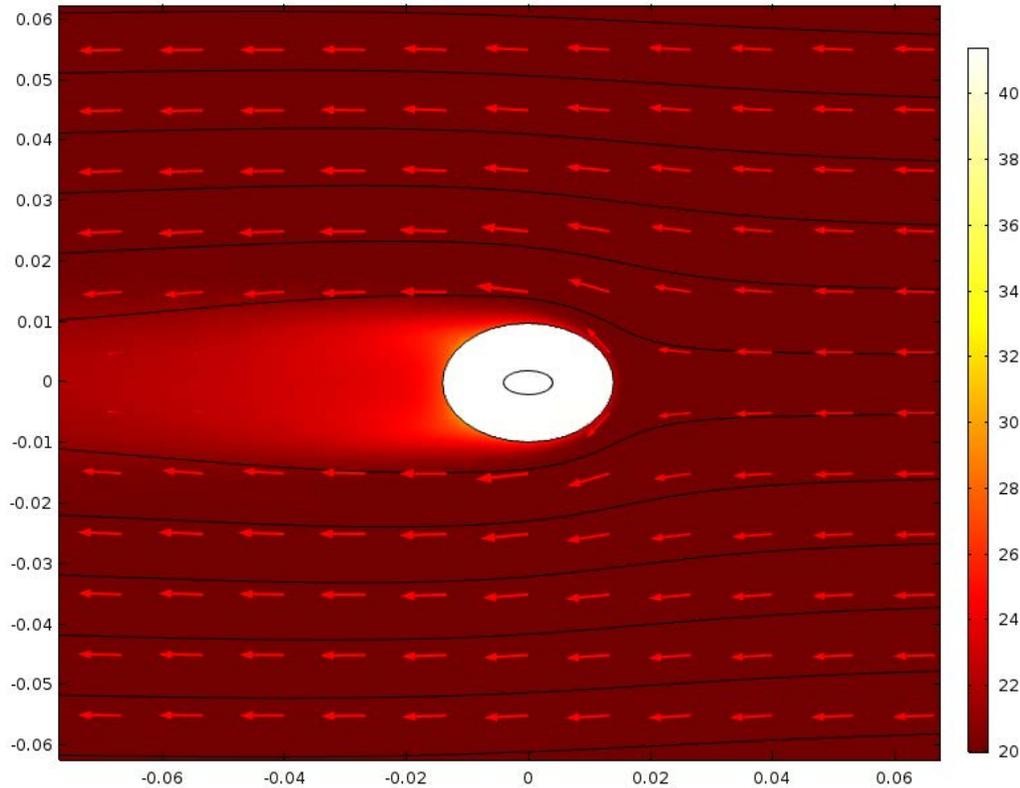


Figura 5-3. Modelo elíptico: campo de velocidades y de temperaturas para $ff=0,7$

5.1.1 Estudio paramétrico 1

En este estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de ff entre 0,7 y 1,3 con variaciones de 0,1 y de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s.

Como puede observarse en las figuras 5-4 y 5-5, entre el modelo elíptico horizontal ($ff=0,7$), o elipse horizontal, el modelo elíptico vertical ($ff=1,3$), o elipse vertical, y el círculo ($ff=1$), la elipse vertical es la que presenta una menor temperatura, con un promedio, en la primera casuística, dos décimas de grado menor que el circular y un promedio seis décimas de grado menor que la elipse horizontal. En la segunda casuística, la elipse vertical presenta un promedio de temperaturas cuatro décimas de grado menor que el circular y de un grado y dos décimas menor que la elipse horizontal. Si observamos las tablas 0-1 y la tabla 0-15 se observa que el modelo elíptico vertical aumenta en menor cuantía su temperatura de la primera a la segunda casuística, lo que indica un mejor comportamiento frente a una subida de la irradiancia.

Según los datos de la segunda casuística, las diferencias de temperatura entre las distintas geometrías del modelo elíptico se ven reducidas a medida que aumenta la velocidad del viento. Esta tendencia no se observa tan claramente en la primera casuística debido a la menor temperatura del conductor, lo que reduce el calor evacuado por convección. Esto nos lleva a deducir que el modelo elíptico horizontal se comporta mejor que el resto en cuanto a la disipación de calor por convección.

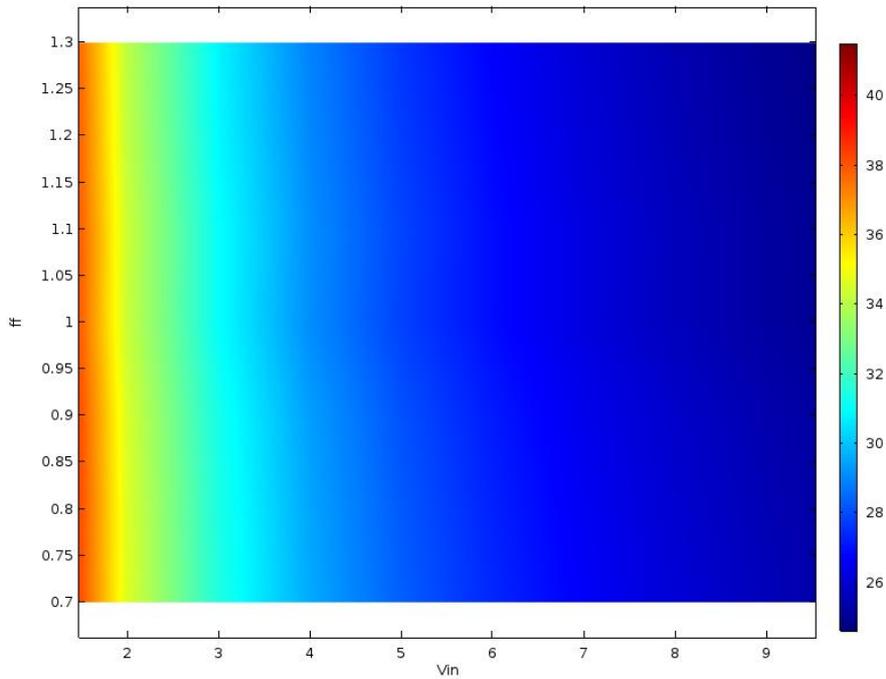


Figura 5-4. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 1

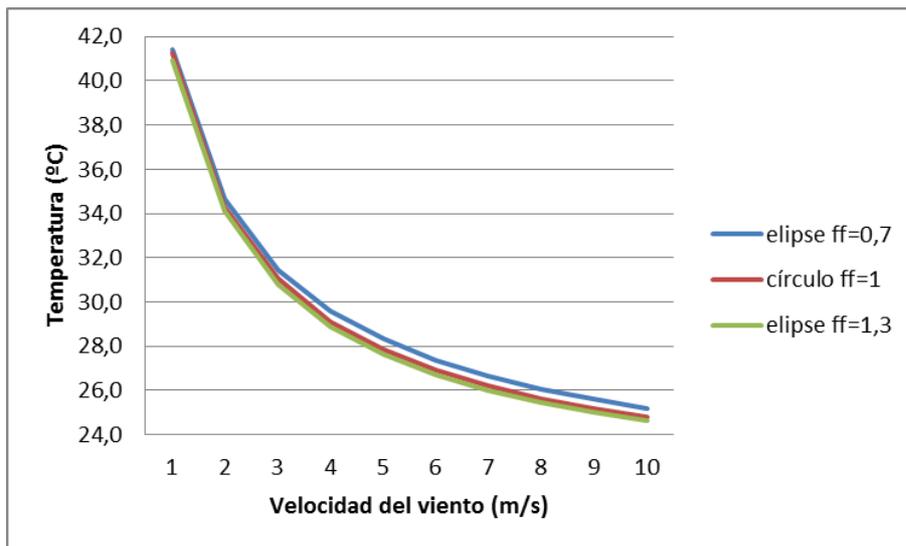


Figura 5-5. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 1

5.1.2 Estudio paramétrico 2

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de ff entre 0,7 y 1,3 con variaciones de 0,1 y de los valores de intensidad entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

En la figura 5-7 se puede observar que el modelo elíptico vertical presenta temperaturas menores que el resto para valores bajos de intensidad mientras que para valores de intensidad más elevados, el que presenta una menor temperatura es el modelo elíptico horizontal. Las diferencias de temperatura prácticamente se anulan para un valor de intensidad próximo a los 900 A. En base a estos resultados se deduce que conforme el cable alcanza mayores temperaturas, es el modelo elíptico horizontal el que contribuye en mayor medida a la disipación del calor, presentando una menor temperatura que el modelo elíptico vertical o el modelo circular.

Los datos del mismo estudio paramétrico correspondiente a la segunda casuística, figura 0-4 (Véase Anexo A), confirman estos resultados pudiéndose apreciar las mismas tendencias con la única diferencia del punto de cruce, que es más elevado en la segunda casuística.

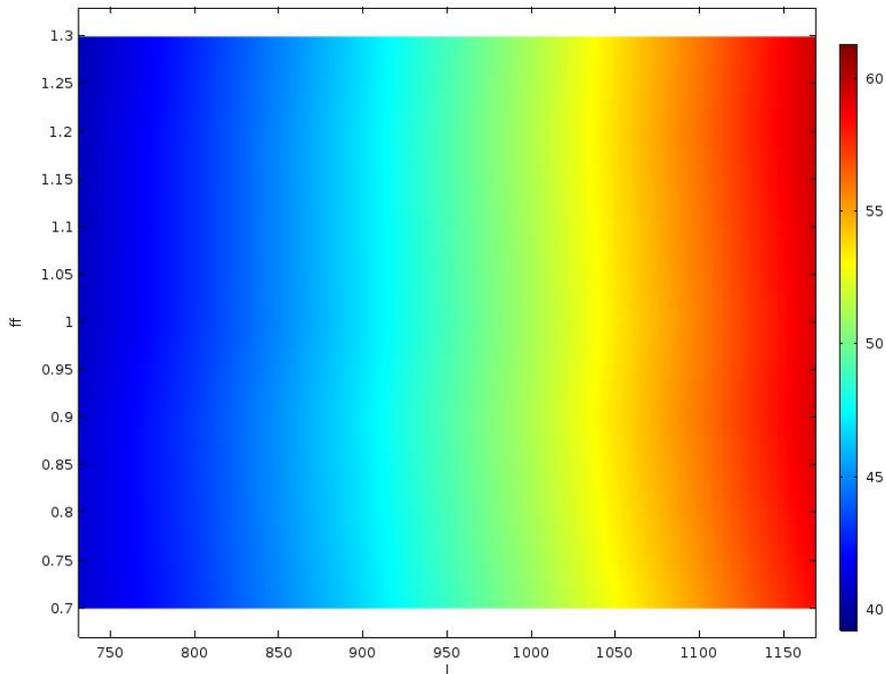


Figura 5-6. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 2

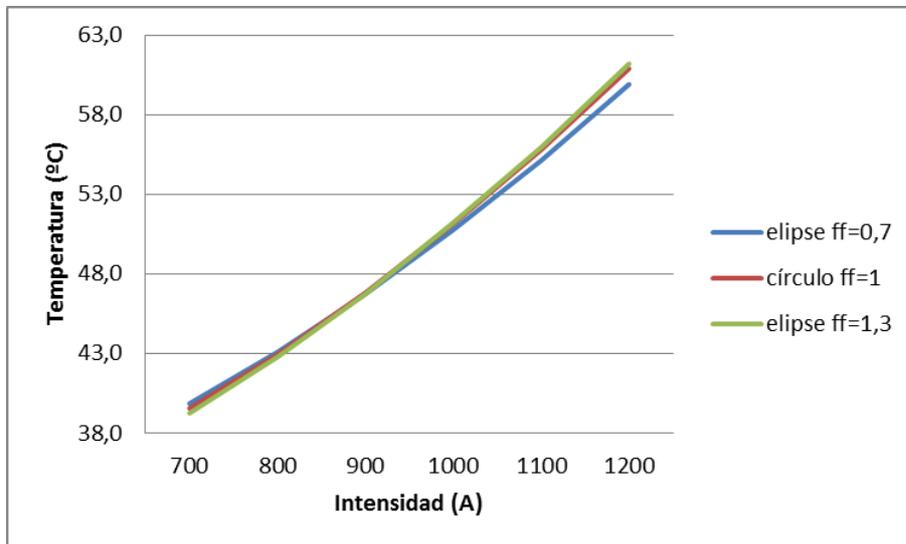


Figura 5-7. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio 2

5.1.3 Parametrización 3

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de ff entre 0,7 y 1,3 con variaciones de 0,1 y de los valores de sección del conductor entre 300 mm^2 y 700 mm^2 con variaciones de 100 mm^2 . Para este estudio paramétrico se ha variado el valor establecido de intensidad, cambiándolo de un valor fijo a un valor ligado a la sección del conductor, de manera que mantenga siempre la misma proporción, es decir, haciendo constante la densidad de corriente que circula por el cable.

A partir de la figura 5-9 se puede observar que el modelo elíptico vertical presenta una temperatura menor que el resto de modelos para todos los valores de sección del conductor analizados. También se observa una reducción de las diferencias entre los modelos a medida que aumenta la sección.

En la figura 0-6, perteneciente a la segunda casuística (véase Anexo A), también es el modelo elíptico vertical el que presenta una menor temperatura, si bien no se observa con tanta claridad la tendencia hacia una reducción de las diferencias entre los modelos a medida que la sección aumenta.

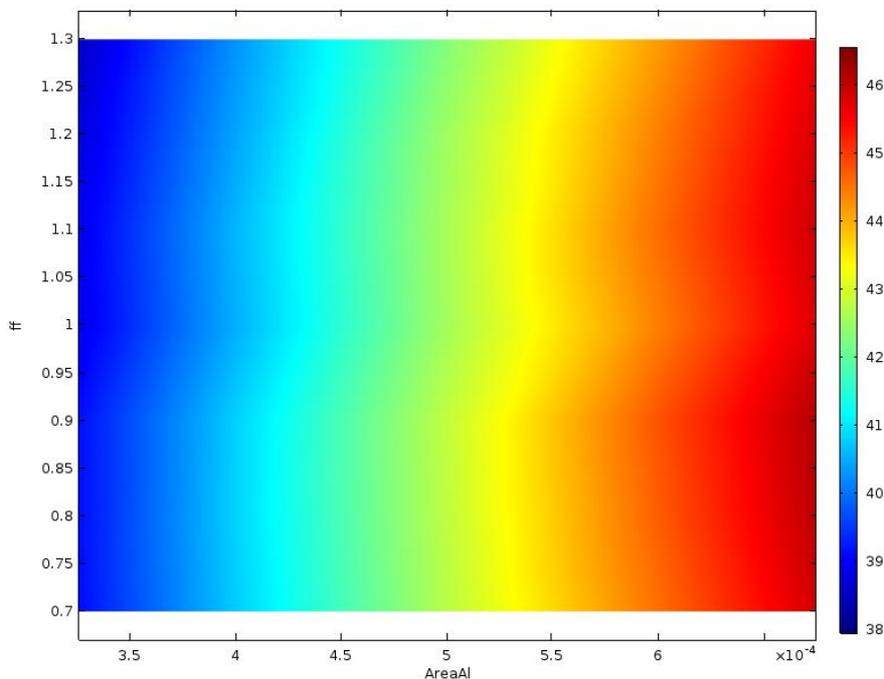


Figura 5-8. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 3

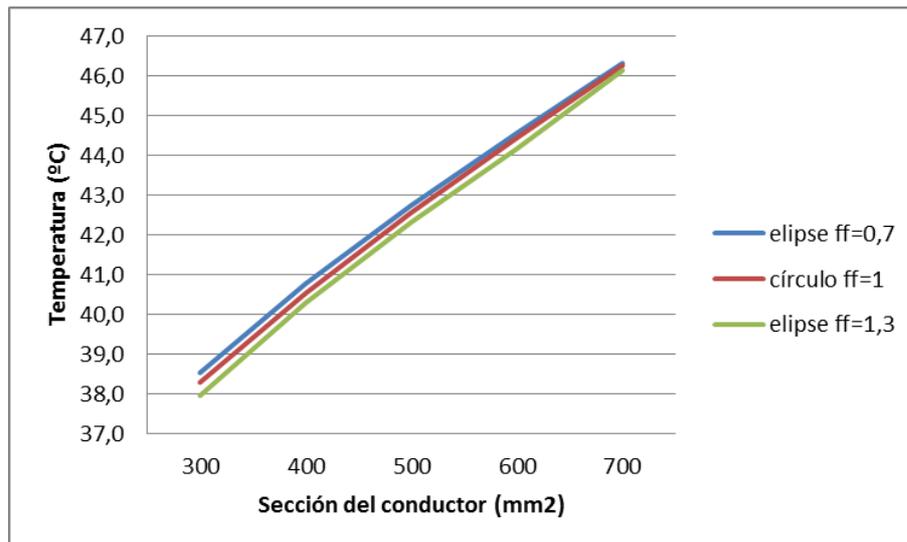


Figura 5-9. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 3

5.1.4 Análisis del modelo elíptico

En base a los resultados obtenidos con los estudios paramétricos realizados al modelo elíptico, podemos deducir que una disposición elíptica horizontal favorece la disipación del calor por convección ya que, a medida que aumenta la velocidad del viento, el modelo elíptico horizontal reduce su temperatura en mayor cuantía que el modelo elíptico vertical.

También podemos deducir que una disposición elíptica vertical ofrece un mejor comportamiento frente a la radiación solar como se deduce de la menor diferencia de temperaturas, entre la primera y la segunda casuística, de la que presenta el modelo elíptico horizontal.

Otro hecho que apoya estas deducciones es que el modelo elíptico horizontal es más favorable que el resto, en el caso de que por el conductor circulen altas intensidades de corriente, lo cual hace predominante el efecto disipativo por convección frente a la menor aportación de calor por radiación solar. Por otro lado, si la intensidad de corriente que circula por el conductor tiene un valor más moderado, la cuantía del calor aportado por radiación adquiere una mayor importancia con respecto a la disipación de calor por convección, y en este escenario el que menor temperatura presenta es el modelo elíptico vertical.

5.2 Resultados del modelo cuadrado

A continuación se van a presentar los resultados de los estudios paramétricos de la temperatura alcanzada con el modelo cuadrado. Se han realizado tres estudios; una parametrización de la velocidad del viento con el ángulo Alpha, una parametrización de la velocidad del viento frente a la intensidad de corriente y otra parametrización de la irradiancia con la velocidad del viento. Las dos últimas parametrizaciones se han realizado para dos valores de Alpha; uno con Alpha=0° y otro con Alpha=45°. De ahora en adelante se hará referencia a ellos como estudio paramétrico 4, 5 y 6 respectivamente.

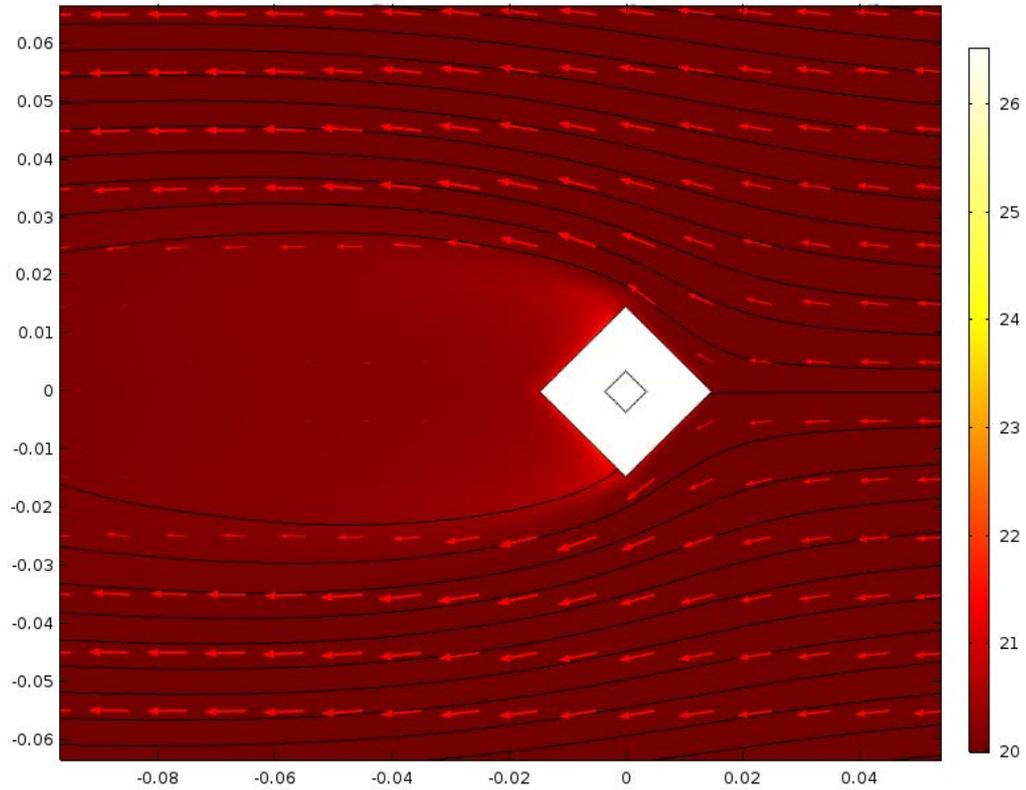


Figura 5-10. Modelo cuadrado: campo de velocidades y de temperaturas para $\text{Alpha}=45^\circ$

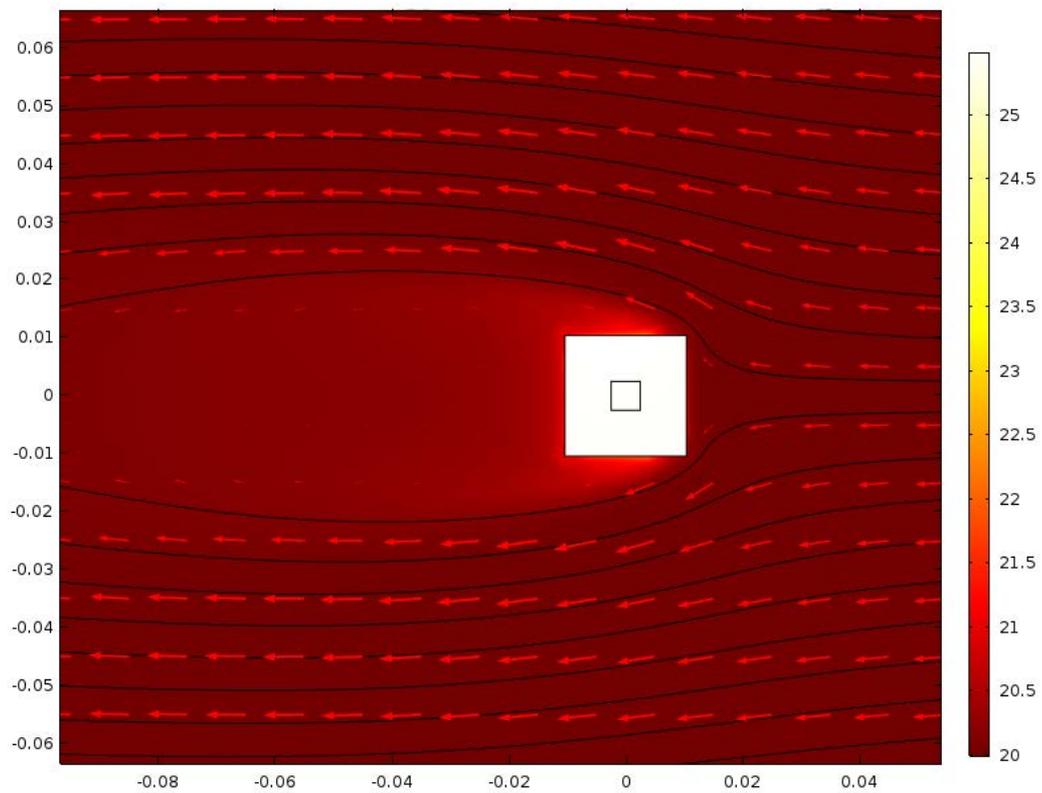


Figura 5-11. Modelo cuadrado: campo de velocidades y de temperaturas para $\text{Alpha}=0^\circ$

5.2.1 Estudio paramétrico 4

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores del ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, Alpha, entre 0° y 45° con variaciones de 11.25°.

Según se observa en la figura 5-13, para valores de Alpha=0°, que se corresponden con un cuadrado con su lado inferior completamente apoyado sobre la horizontal, el modelo presenta una menor temperatura que con el resto de valores de Alpha. La temperatura que presenta el modelo aumenta a medida que lo hace Alpha.

Además se observa una clara reducción de las diferencias entre los modelos a medida que aumenta la velocidad del viento, lo que nos indica que el modelo con Alpha=0° se comporta mejor que el resto cuanto menor es la velocidad, es decir, reduce sensiblemente la aportación de calor por radiación solar con respecto al modelo con alpha=45°.

En la figura 0-8, correspondiente a la segunda casuística se observa lo mismo que en la de la primera casuística, pero si comparamos los datos de la primera casuística con los de la segunda, observando las diferencias entre los datos de las tablas 0-4 y 0-18 se aprecia un menor aumento de temperatura de la primera a la segunda casuística para Alpha=0°, lo que indica que se comporta mejor ante un aumento de la irradiancia solar.

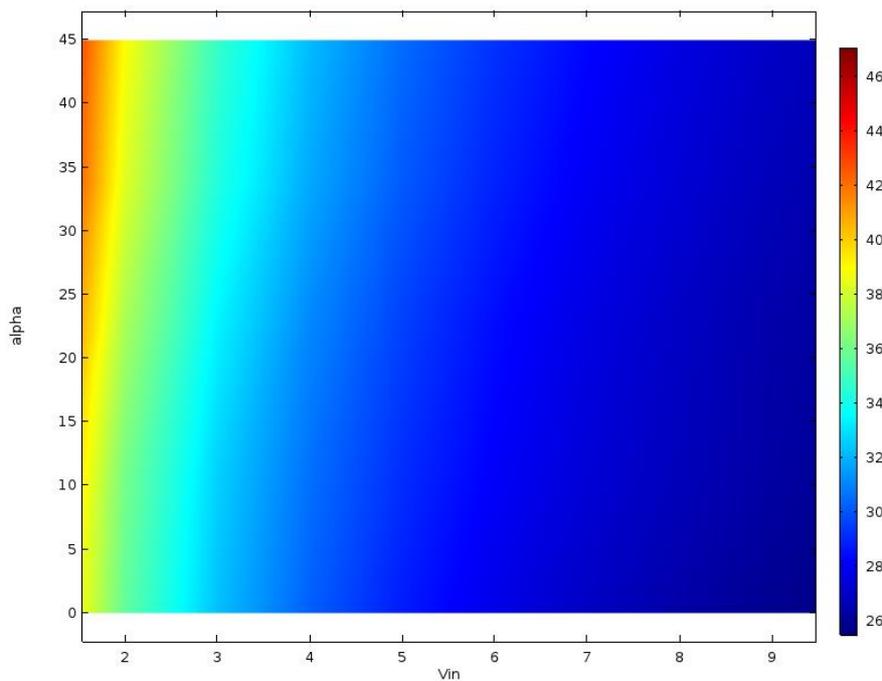


Figura 5-12. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 4

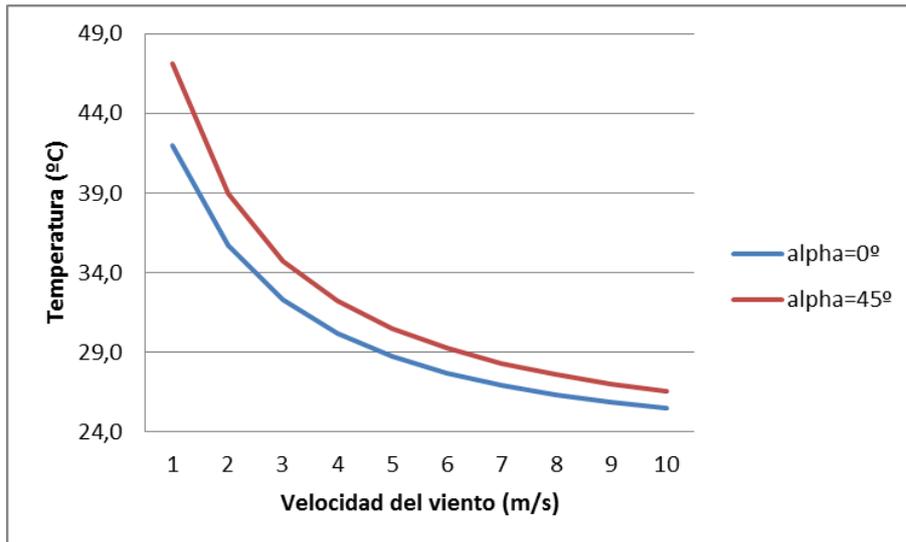


Figura 5-13. Modelo cuadrado: gráfico temperaturas del estudio paramétrico 4

5.2.2 Estudio paramétrico 5

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo cuadrado con $\text{Alpha}=0^\circ$ y con $\text{Alpha}=45^\circ$, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de intensidad de corriente, entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

Analizando los datos obtenidos en este estudio paramétrico se observa en las figuras 5-15 y 5-17, que obviamente, la temperatura del cable aumenta a medida que se incrementa la intensidad de corriente que circula por él y disminuye a medida que aumenta la velocidad del viento. Se observa también que las diferencias de temperaturas entre los casos con distintos valores de intensidad de corriente se reducen para velocidades de viento elevadas. No se aprecian diferencias en las tendencias entre el modelo con $\text{Alpha}=0^\circ$ y el modelo con $\text{Alpha}=45^\circ$, simplemente la diferencia de temperaturas que se apreció en el anterior estudio paramétrico.

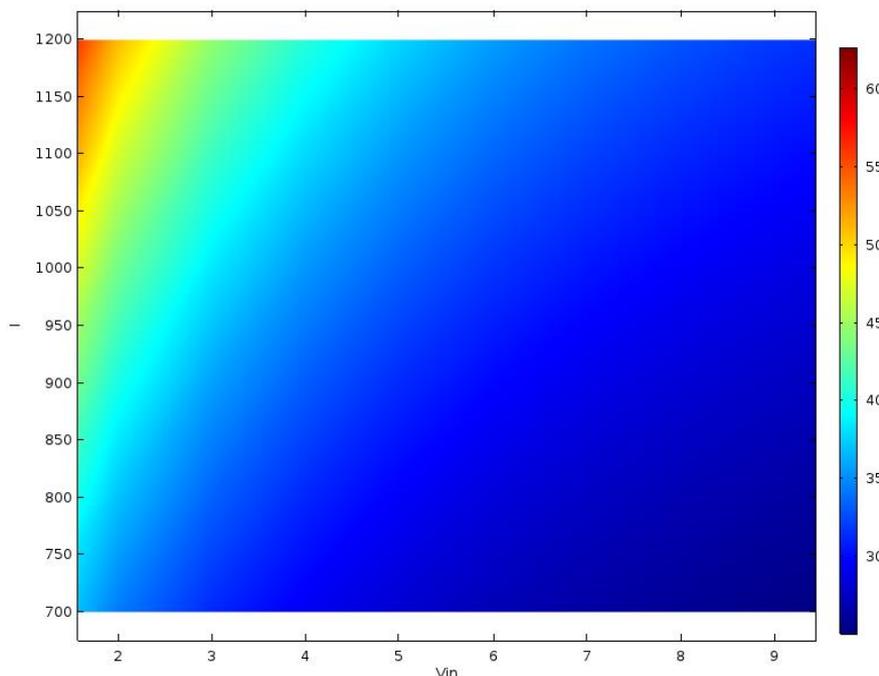


Figura 5-14. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 para $\text{Alpha}=0^\circ$

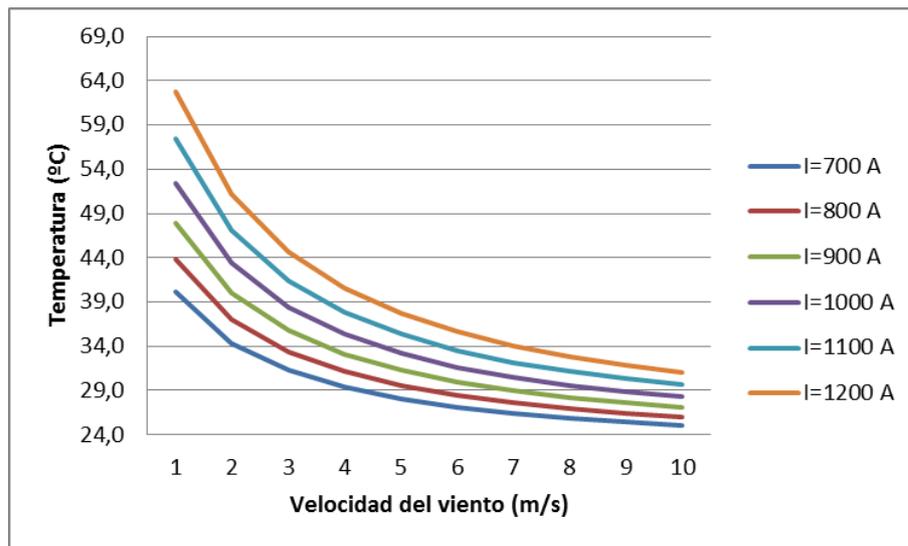


Figura 5-15. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio 5 para $\text{Alpha}=0^\circ$

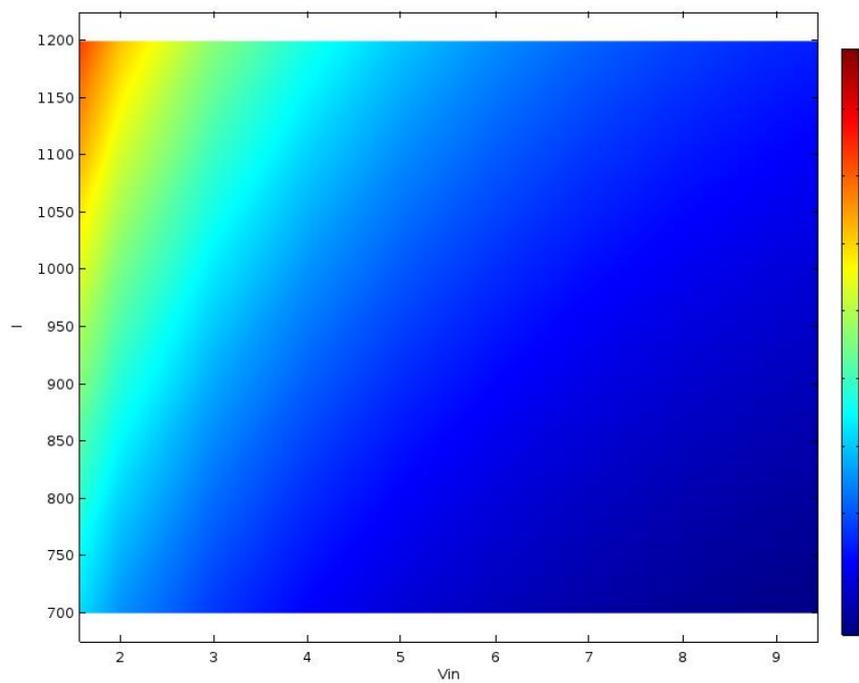


Figura 5-16. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 para $\text{Alpha}=45^\circ$

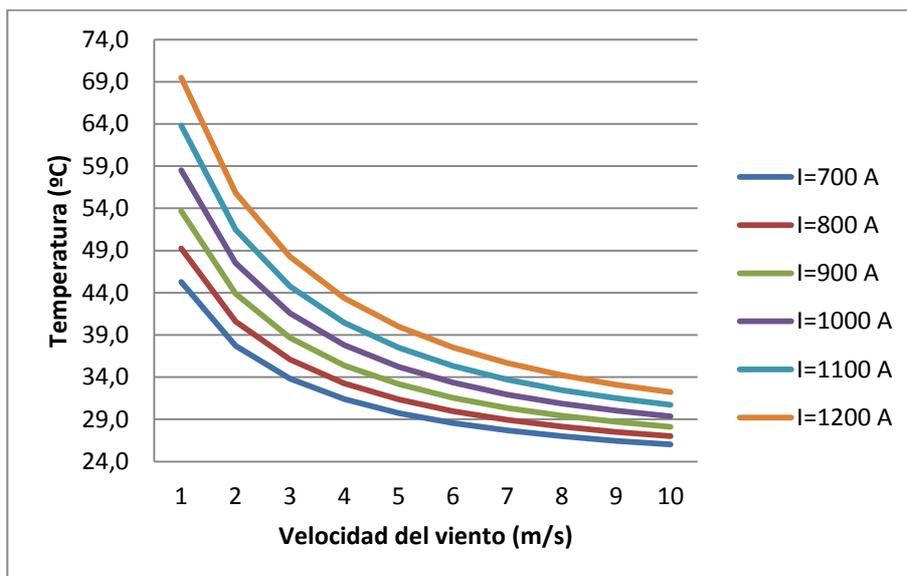


Figura 5-17. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 5 para Alpha=45°

5.2.3 Estudio paramétrico 6

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo cuadrado con Alpha=0° y con Alpha=45°, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de irradiancia, entre 700 W/m² y 1100 W/m² con variaciones de 100 W/m².

Analizando los datos se observa, obviamente, que la temperatura máxima alcanzada en el cable aumenta conforme aumenta el valor de irradiancia y disminuye a medida que aumenta la velocidad el viento. También se observa que a medida que se incrementa la velocidad del viento, disminuyen las diferencias de temperatura para los diferentes valores de irradiancia. De los datos de las tablas 0-7, 0-8, 0-21 y 0-22 también se puede observar como para una misma velocidad del viento, las diferencias de temperatura entre los distintos valores de irradiancia son mayores en el modelo con Alpha=45° que con Alpha=0°.

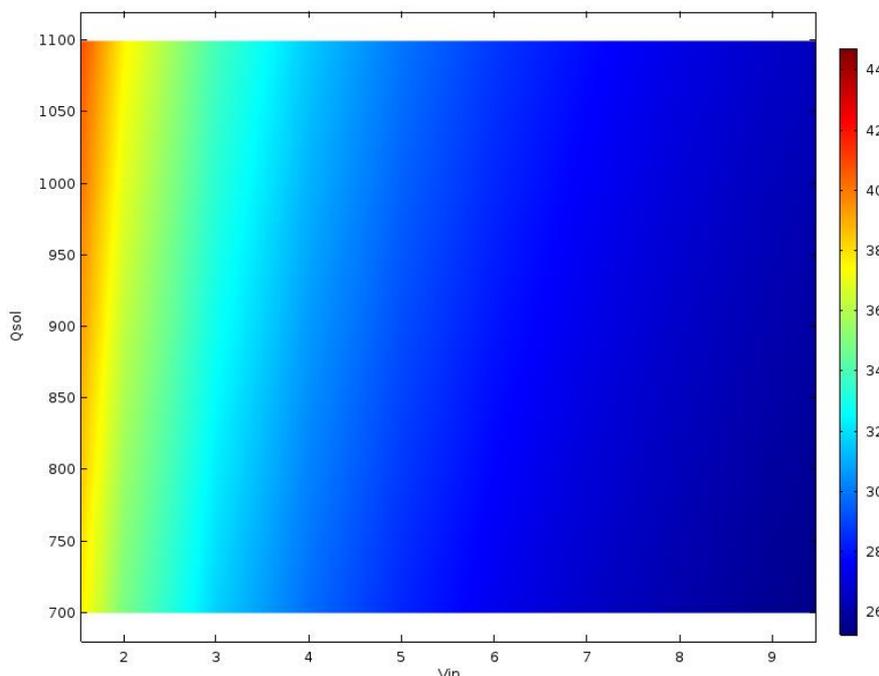


Figura 5-18. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 para Alpha=0°

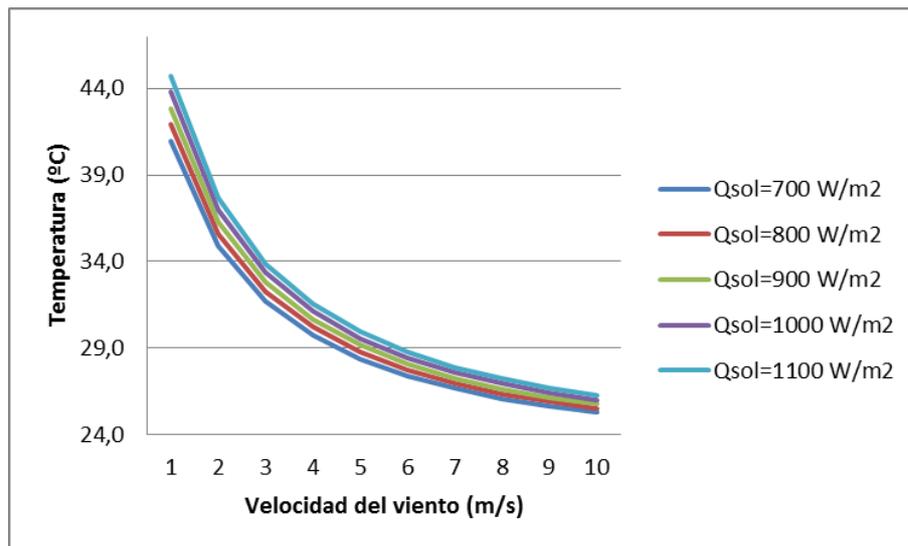


Figura 5-19. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 para Alpha=0°

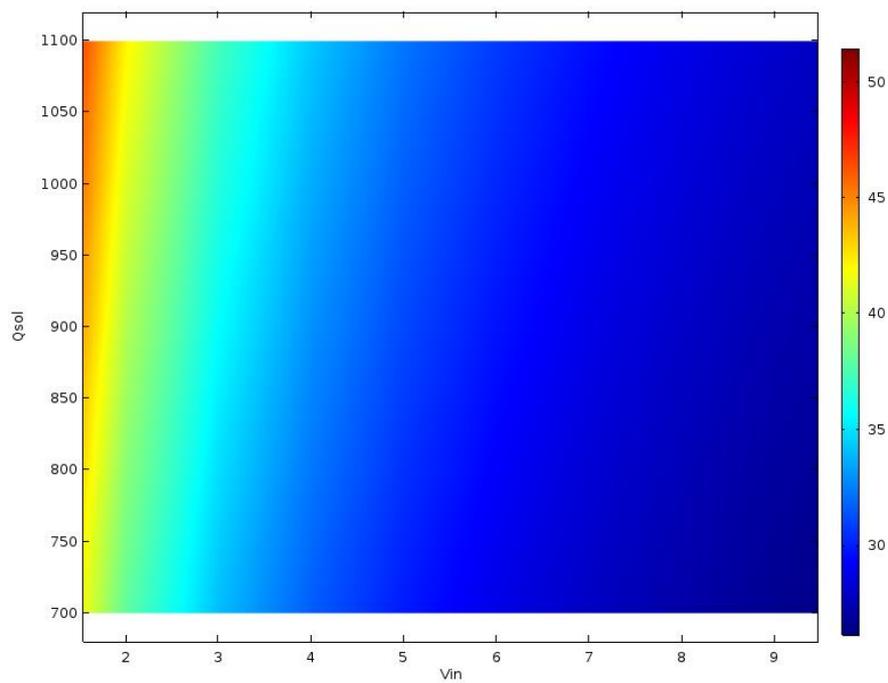


Figura 5-20. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 para Alpha=45°

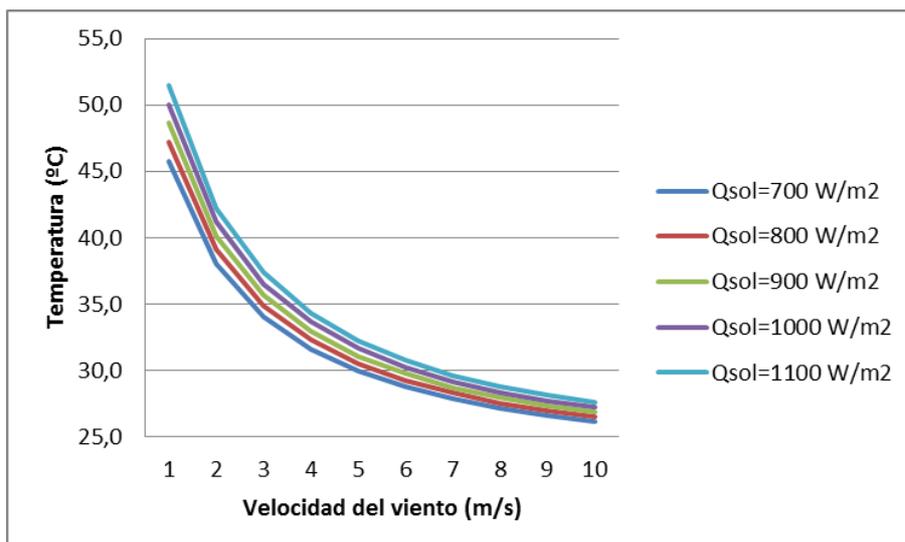


Figura 5-21. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 para Alpha=45°

5.2.4 Análisis del modelo cuadrado

A raíz de los datos obtenidos en los diferentes estudios paramétricos realizados al modelo cuadrado, se ha observado claramente que para Alpha=0° reduce de manera significativa, en unos 5°C, la temperatura máxima alcanzada en el conductor con respecto al resto de valores de Alpha en todas las situaciones que se han simulado. Además, el modelo cuadrado con Alpha=0° se ve menos afectado por un aumento de la irradiancia solar o por un aumento de la intensidad de corriente.

5.3 Modelo hueso

A continuación se van a presentar los resultados de los estudios paramétricos de la temperatura alcanzada con el modelo hueso. Se han realizado tres estudios; una parametrización de la velocidad del viento con el ángulo Alpha, una parametrización de la velocidad del viento frente a la intensidad de corriente y otra parametrización de la velocidad del viento frente a la intensidad de corriente para un modelo en el que se ha sustituido el núcleo de hierro del conductor por un núcleo de vidrio. Todas las parametrizaciones se han realizado para factor de anchura=3 y factor de anchura=4. De ahora en adelante se hará referencia a ellos como estudio paramétrico 7, 8 y 9 respectivamente.

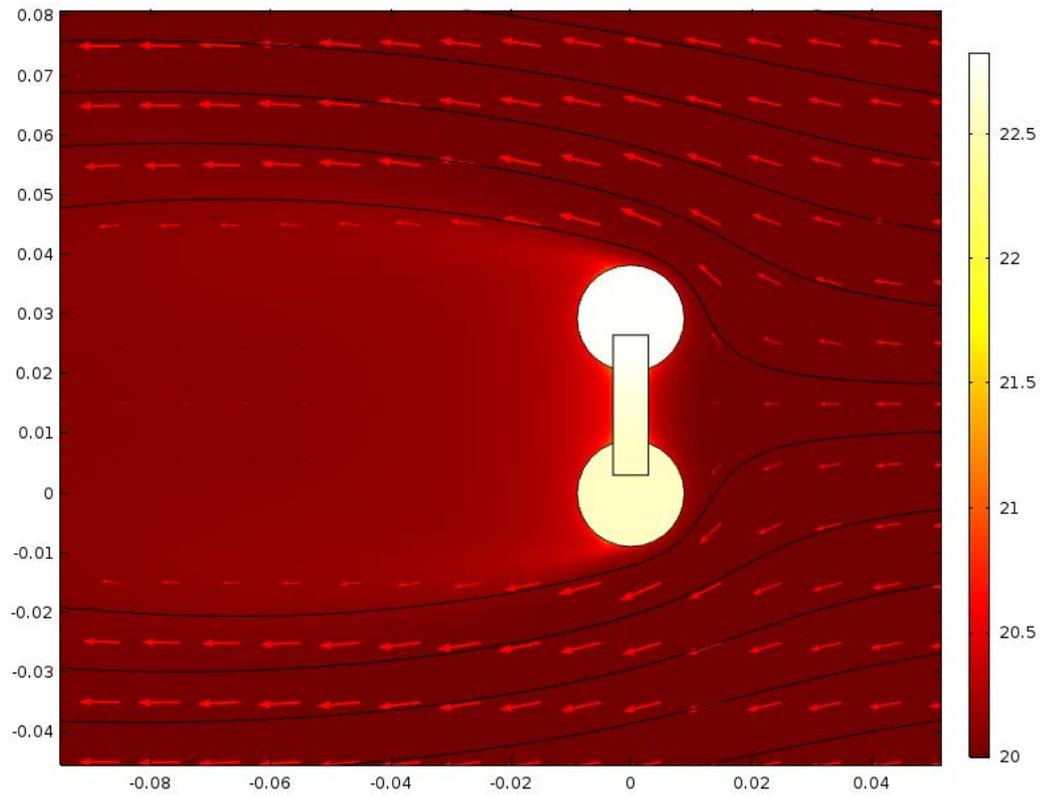


Figura 5-22. Modelo hueso: campo de velocidades y de temperaturas para $\alpha = 90^\circ$

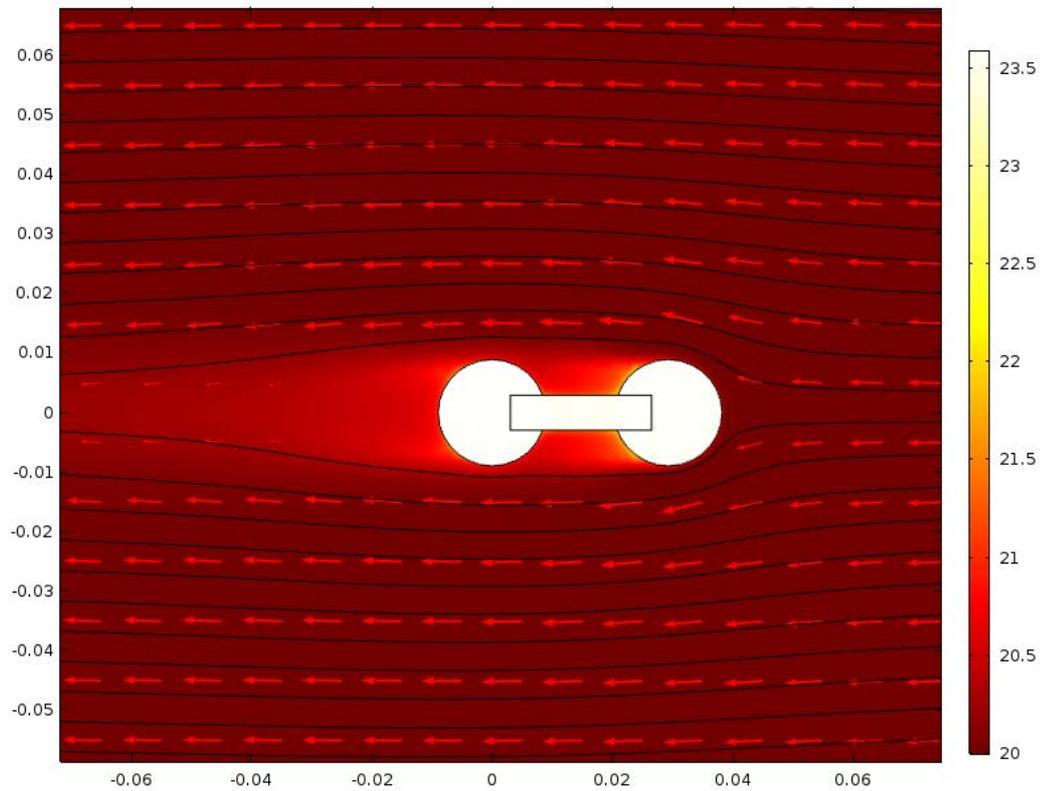


Figura 5-23. Modelo hueso: campo de velocidades y de temperaturas para $\alpha = 0^\circ$

5.3.1 Estudio paramétrico 7

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo hueso, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de Alpha, entre 0° y 90° con variaciones de 45°.

En las figuras 5-25 y 5-26 se observa que para Alpha=90° el modelo alcanza una menor temperatura máxima que con Alpha=0°. También se observa que con un factor de anchura=4, el modelo presenta una temperatura menor que con factor de anchura=3. Como ha sucedido en todos los estudios realizados, las diferencias de temperatura entre los distintos modelos se reducen al aumentar la velocidad del viento.

Si comparamos los datos de las tablas 0-9, 0-10, 0-23 y 0-24 correspondientes a los modelos para un factor de anchura=3 y para un factor de anchura=4 para la primera y segunda casuística, se observa que para alpha=90° la temperatura que alcanza el cable no aumenta tanto como con alpha=0° para valores de irradiancia solar mayores. Si comparamos como les afecta un incremento de la irradiancia solar a los modelos con factor de anchura=3 y factor de anchura=4, aunque el modelo con factor de anchura=4 sufre un menor incremento de temperatura, las diferencias no son significativas.

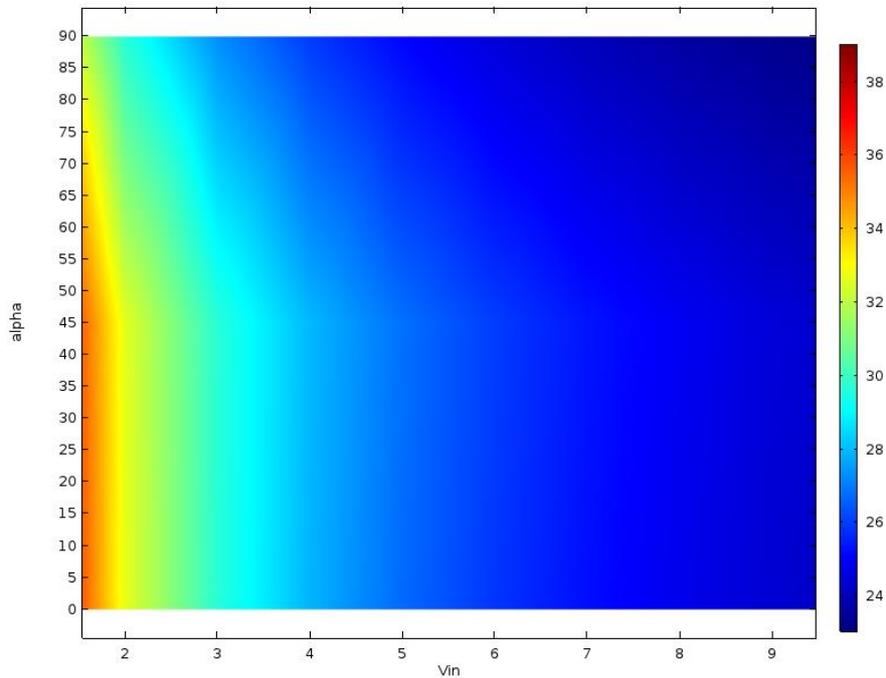


Figura 5-24. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=3

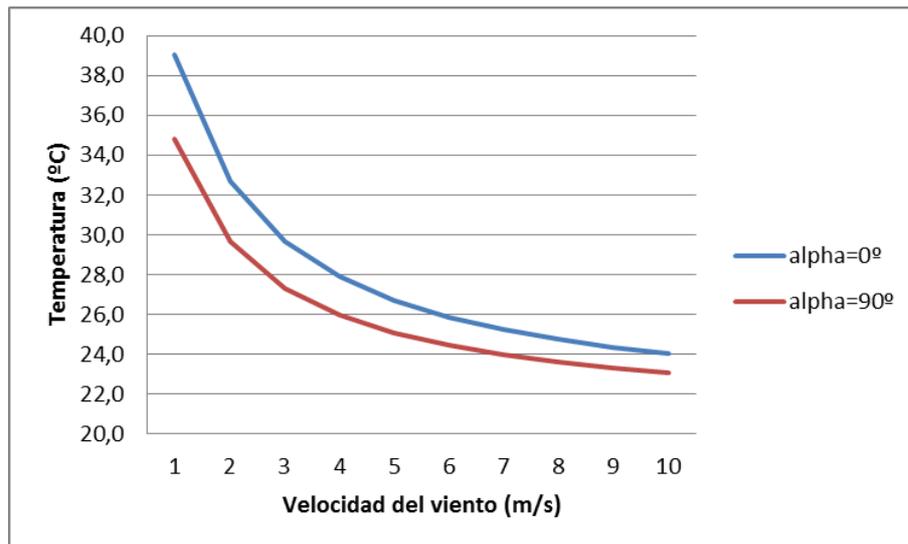


Figura 5-25. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=3

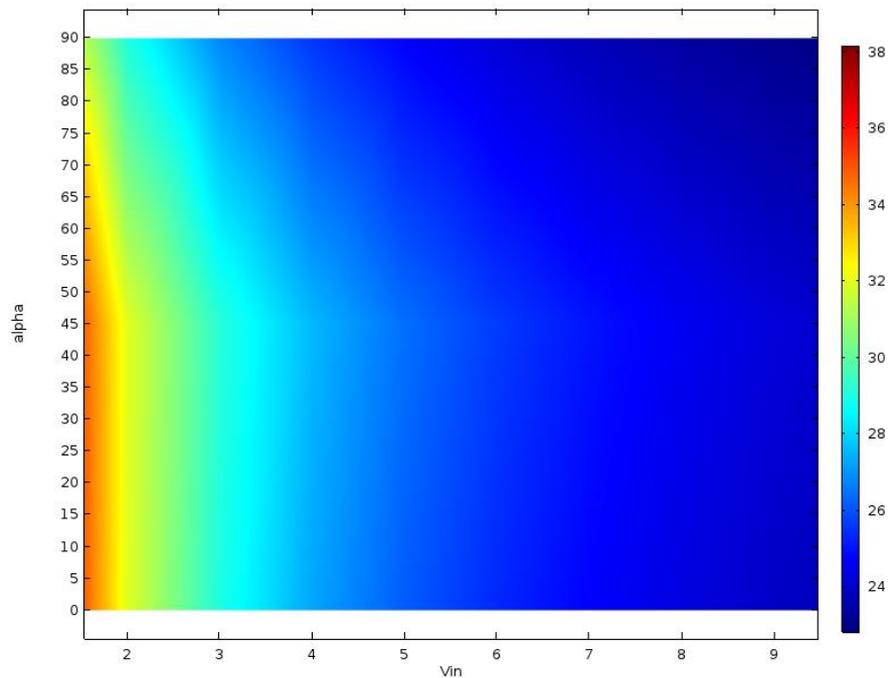


Figura 5-26. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=4

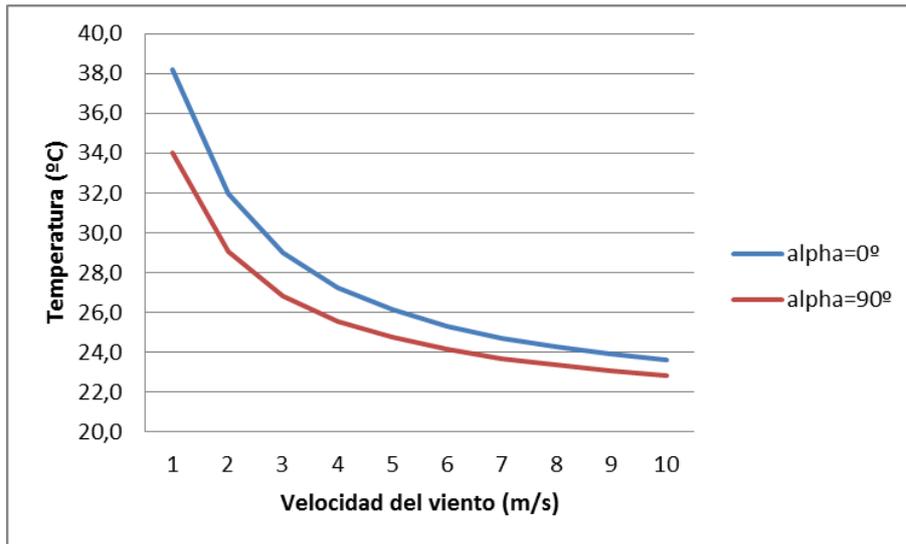


Figura 5-27. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 para un factor de anchura=4

5.3.2 Estudio paramétrico 8

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo hueso, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de intensidad de corriente, entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

Además de las tendencias habituales, en las que la temperatura aumenta conforme lo hace la intensidad de corriente y disminuye a medida que aumenta la velocidad del viento, se observa en las figuras 5-29 y 5-31 que la temperatura es menor en el modelo con un factor de anchura=4 que con un factor de anchura=3 y que las diferencias de temperatura entre los modelos con diferente valor de intensidad de corriente son mayores con un factor de anchura=3 que con un factor de anchura=4.

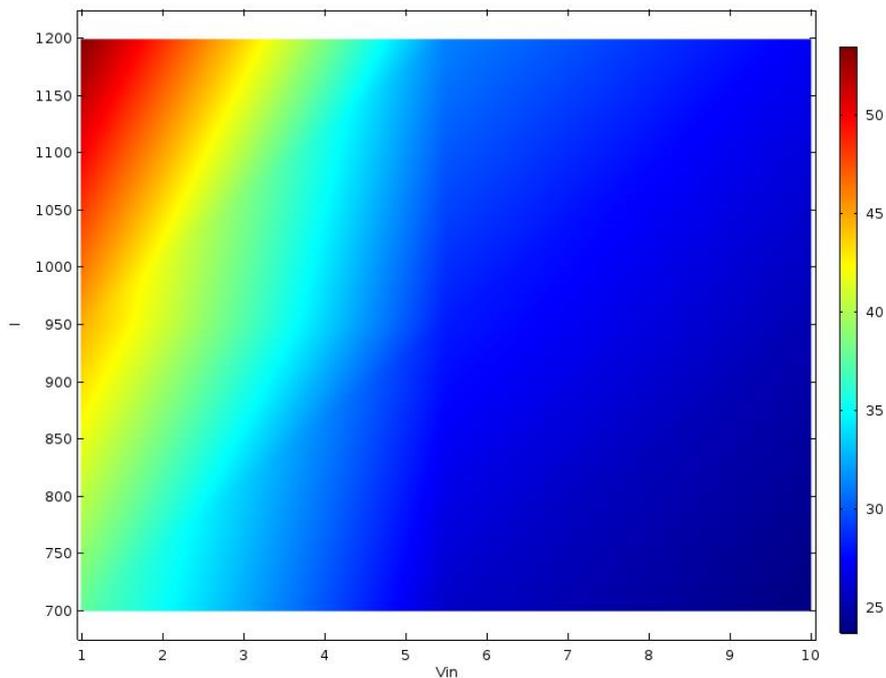


Figura 5-28. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=3

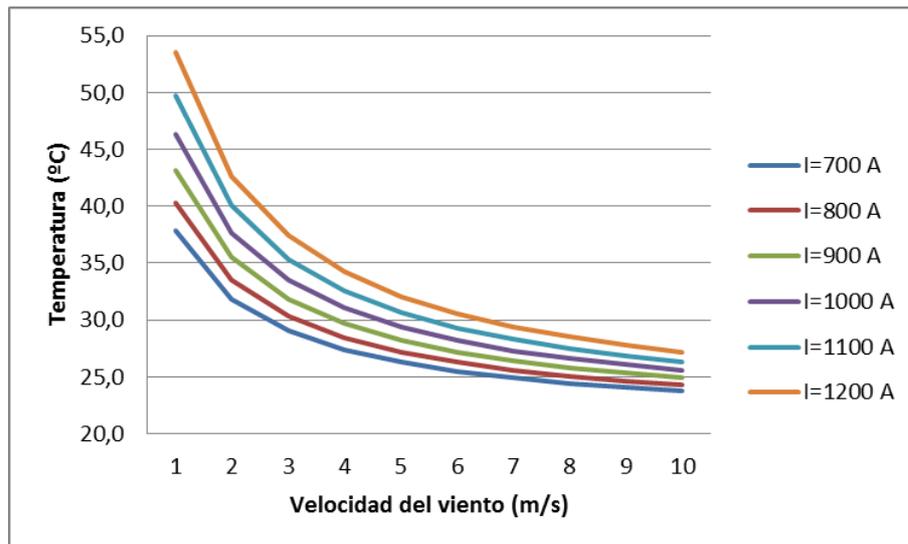


Figura 5-29. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=3

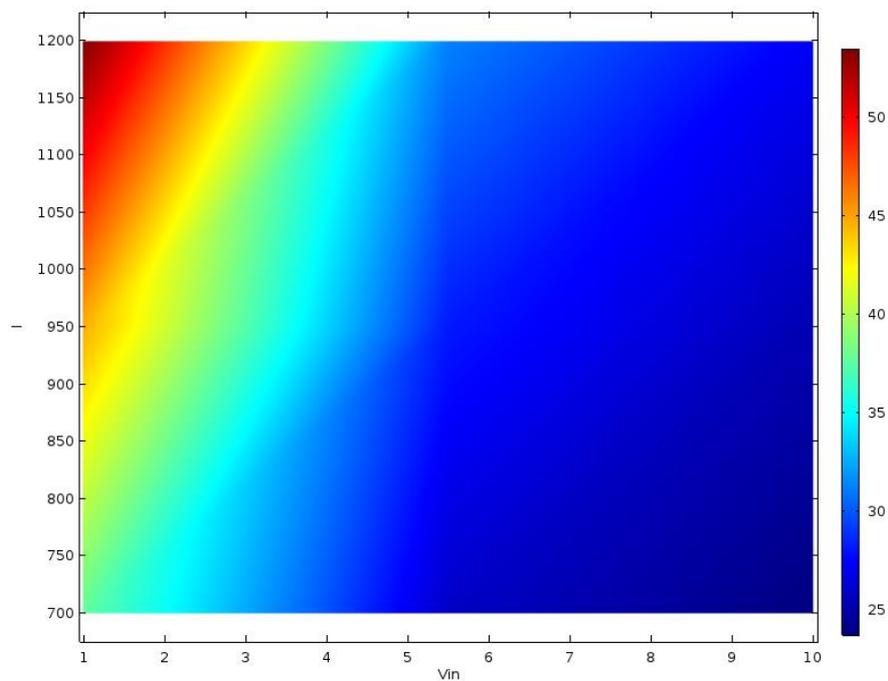


Figura 5-30. Modelo hueso: Temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=4

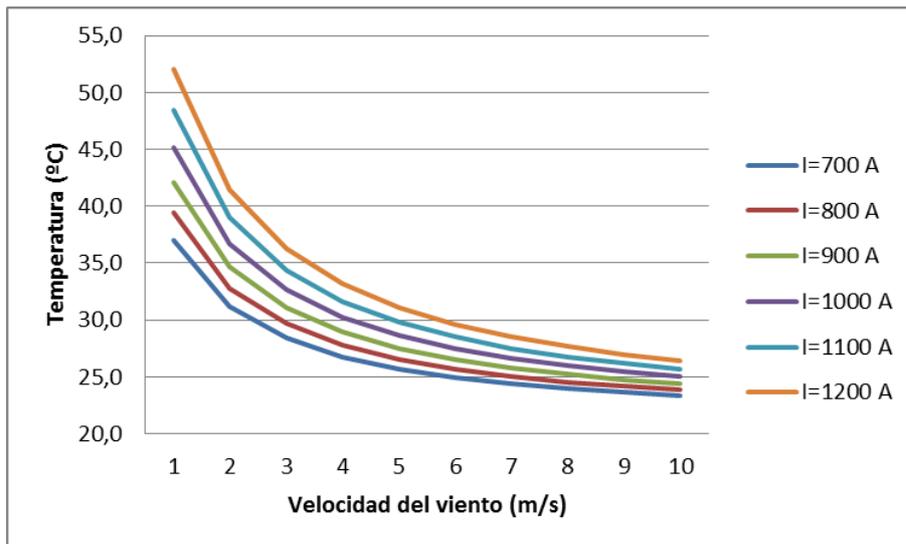


Figura 5-31. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 para un factor de anchura=4

5.3.3 Estudio paramétrico 9

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo hueso con núcleo de vidrio, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de intensidad de corriente, entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

En las figuras 5-33 y 5-35 se observa que la temperatura es menor en el modelo con un factor de anchura=4 que con un factor de anchura=3 y que las diferencias de temperatura entre los modelos con diferente valor de intensidad de corriente son mayores con un factor de anchura=4 que con un factor de anchura=3.

Tras analizar los datos de las tablas 0-13, 0-14, 0-27 y 0-28 se observa que el modelo con un factor de anchura=4 se comporta mejor que el modelo con un factor de anchura=3 tanto ante un aumento de intensidad de corriente como ante un aumento de irradiancia solar.

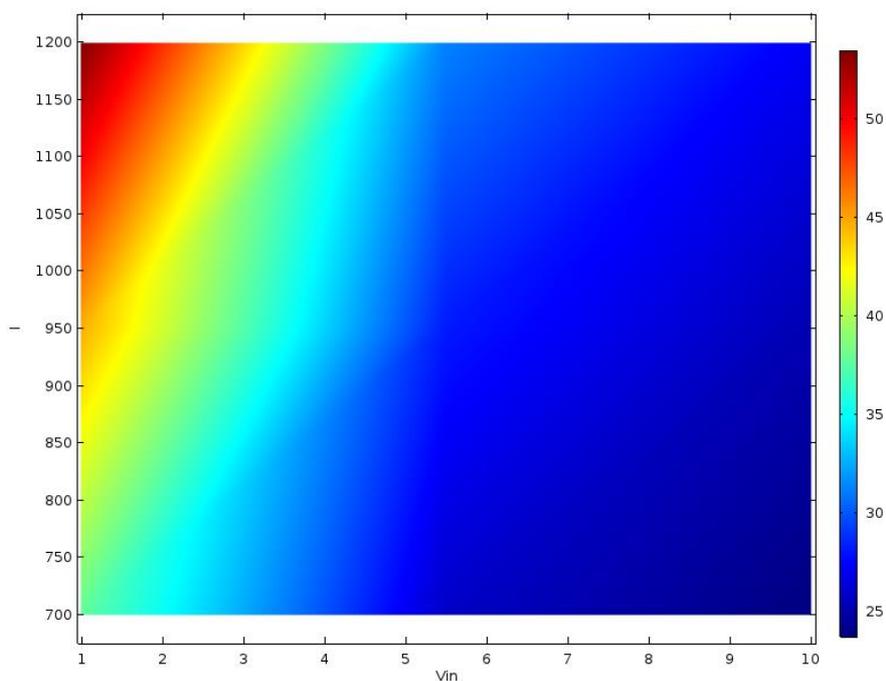


Figura 5-32. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 9 para un factor de anchura=3

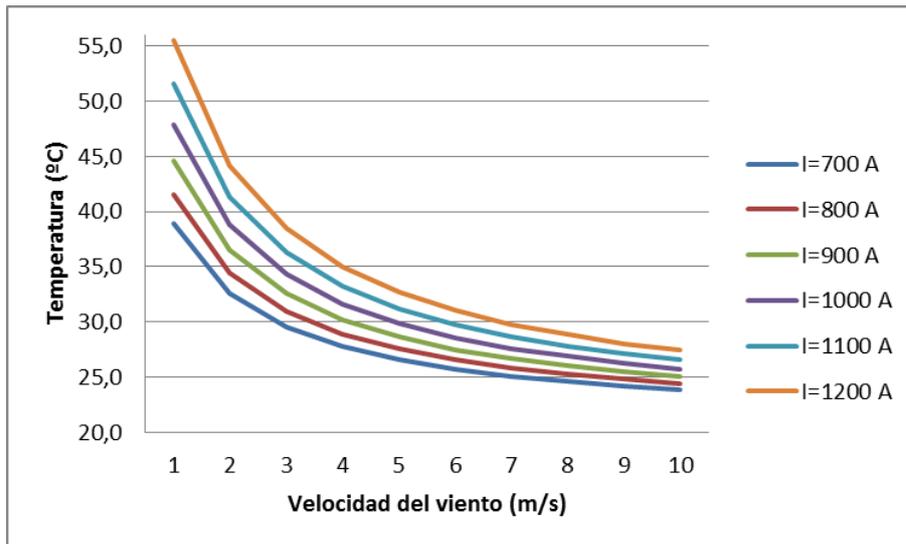


Figura 5-33. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 para un factor de anchura=3

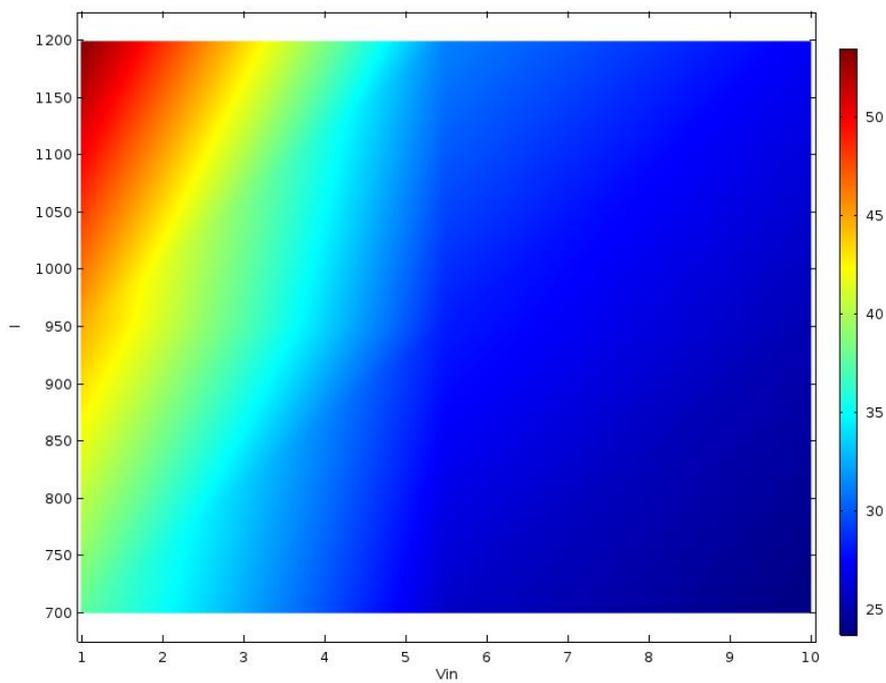


Figura 5-34. Modelo hueso: temperaturas del estudio 9 para un factor de anchura=4

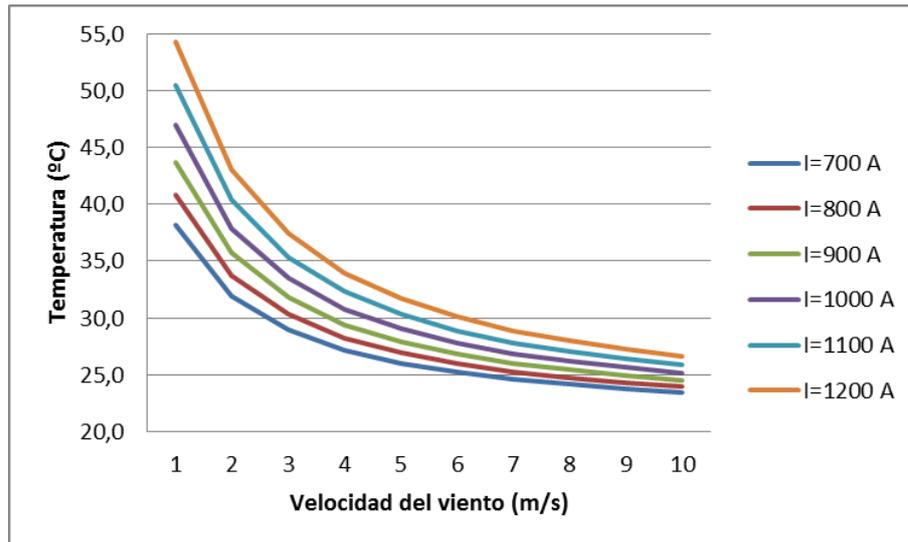


Figura 5-35. Modelo hueso: Gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 para un factor de anchura=4

5.3.4 Análisis modelo hueso

A partir de los resultados obtenidos de los distintos estudios paramétricos realizados al modelo hueso podemos deducir que para $\text{Alpha}=90^\circ$ el modelo alcanza una menor temperatura máxima que para el resto de valores de Alpha. También se observa que los modelos con un factor de anchura 4 alcanzan una menor temperatura máxima que los de factor de anchura 3.

Si comparamos el modelo de hueso con núcleo de vidrio con el de núcleo de hierro, veremos que el de núcleo de hierro presenta unas temperaturas máximas menores que el de núcleo de vidrio.

5.4 Comparativa de modelos

A continuación se va a proceder a realizar un análisis comparativo entre los distintos modelos que se han expuesto en este documento. En la figura 5-36 vemos una gráfica comparativa de todos los modelos bajo las mismas condiciones, donde se pueden apreciar los modelos que alcanzan una menor temperatura máxima. Por orden de menor a mayor temperatura alcanzada son; el modelo hueso con núcleo de vidrio y factor de anchura=4, el modelo hueso con núcleo de vidrio y factor de anchura=3, el modelo elíptico vertical, el modelo circular, el modelo elíptico horizontal, el modelo cuadrado con $\text{Alpha}=0^\circ$ y el modelo cuadrado con $\text{Alpha}=45^\circ$.

En la figura 5-37 vemos una gráfica con la mejor variante de cada uno de los modelos analizados, el elíptico, el cuadrado y el hueso.

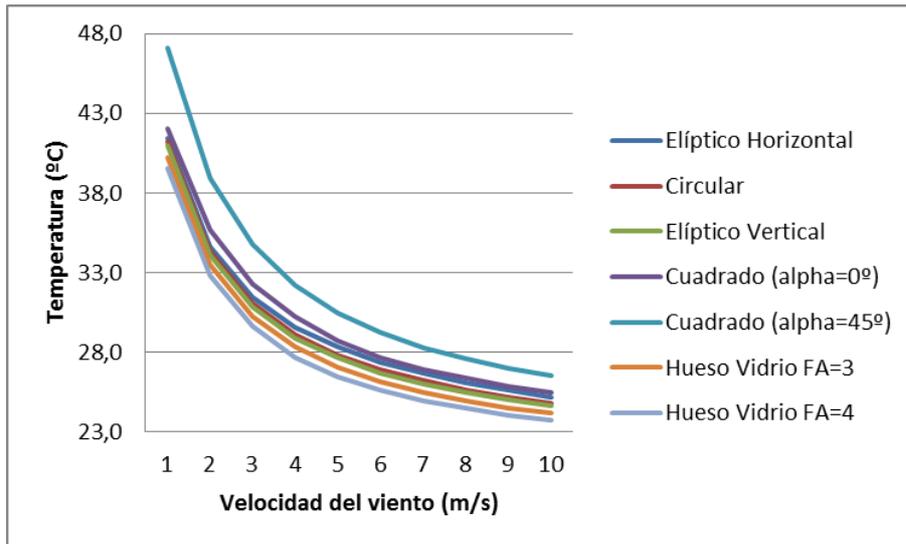


Figura 5-36. gráfico comparativo de los distintos modelos

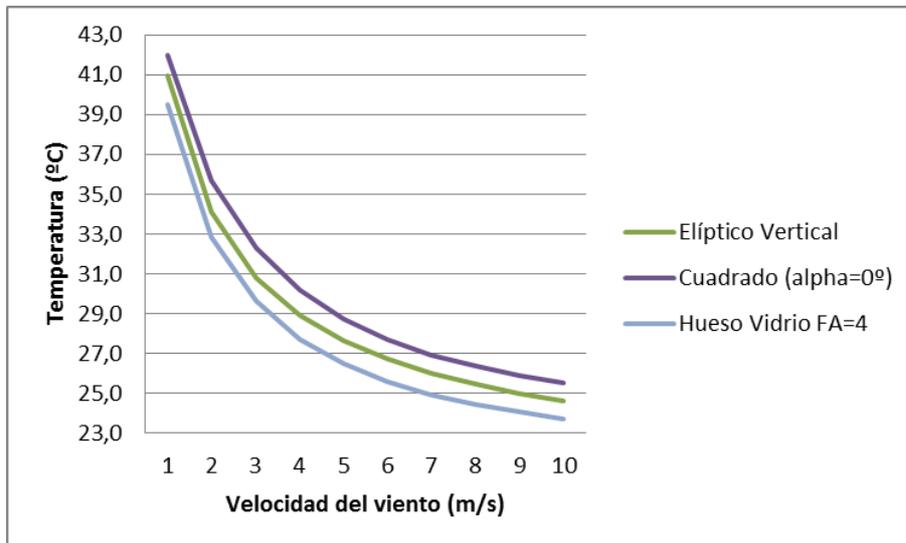


Figura 5-37. Gráfico comparativo de 3 modelos

6. CONCLUSIONES

Nunca me he tenido por ingeniero o inventor, solamente me considero un promotor y agitador de ideas.

-Enzo Ferrari-

Parece que los conductores cuya geometría se extiende en mayor medida a lo largo de la dirección vertical y es menor en dirección horizontal poseen un mejor comportamiento frente a altos niveles de radiación solar, lo cual puede ser interesante en ciertas localizaciones geográficas donde los niveles de irradiancia solar sean muy elevados.

En el caso inverso, para aquellos conductores cuya geometría se extiende en mayor medida a lo largo de la dirección horizontal y es menor en dirección vertical, parece que poseen unas mejores cualidades de cara a aprovechar mejor la velocidad del viento circundante al conductor, como elemento clave en la disipación de calor por convección.

En cuanto a los diseños de geometrías para conductores desnudos, el modelo hueso parece que ofrece mejores prestaciones térmicas que el resto de modelos analizados en este trabajo sin embargo, antes de poder postularlo como una posible mejora de los conductores desnudos utilizados a día de hoy, hay que tener en consideración otros factores, como la complejidad constructiva del modelo, su comportamiento eléctrico, su comportamiento mecánico y otros factores que requerirán de estudios futuros.

REFERENCIAS

- [1] Juan A. Martinez Velasco, «Power System Transients», CRC Press, 2010
- [2] T. Saito, Y. Hase, et. al., «Spiral-elliptic conductor with low-drag coefficient», in Proc. Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 4, pp. 2397-2402, January 2000.
- [3] J.C. del-Pino-López, D. Garrido-García, P. Cruz-Romero and A. Gómez-Expósito, «Influence of Overhead Power Conductor Shape on its Temperature», in Proc. 2nd Iberian Comsol Conference, Málaga, June 2015.
- [4] J.C. del-Pino-López, D. Garrido-García, P. Cruz-Romero and A. Gómez-Expósito, «Novel conductor design to increase the thermal rating of overhead lines», in International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16).
- [5] WG.B2.43, «Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines», Cigré TB 601, 2014
- [6] Klaus-Jürgen Bathe, «Finite Element Procedures», Prentice-Hall, 1996.

A continuación se van a exponer los resultados de los distintos modelos estudiados; elíptico, cuadrado y hueso para la segunda casuística.

Modelo elíptico

En este apartado se van a presentar los resultados de los estudios paramétricos de la temperatura máxima alcanzada en el conductor con el modelo elíptico. Se han realizado tres estudios; una parametrización de la velocidad del viento con el factor de forma, una parametrización del factor de forma frente a la intensidad que circula por el conductor y otra parametrización del factor de forma frente a la sección del conductor.

Estudio paramétrico 1

En este estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de ff entre 0,7 y 1,3 con variaciones de 0,1 y de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s.

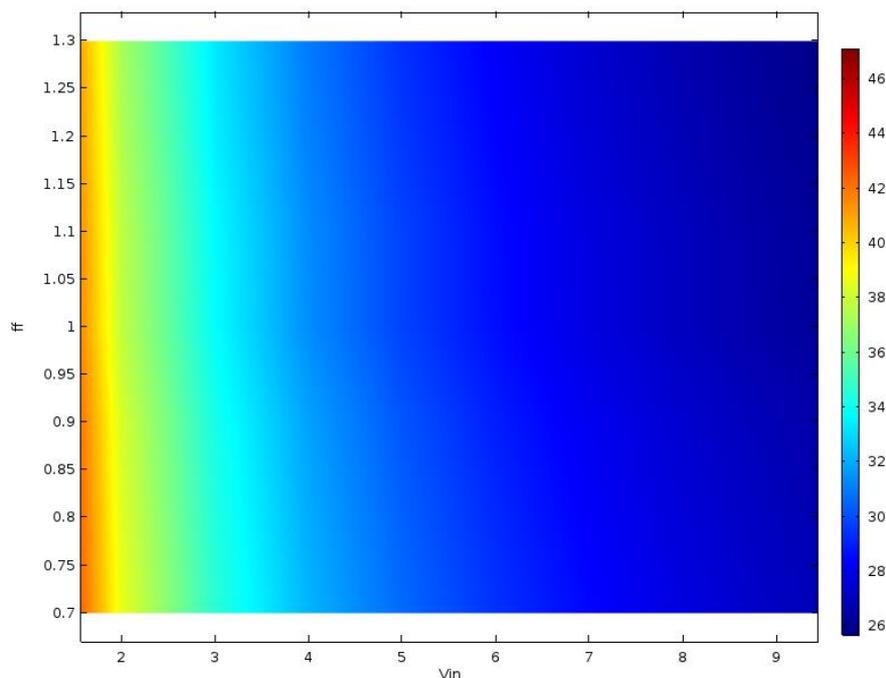


Figura 0-1. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 1 segunda casuística

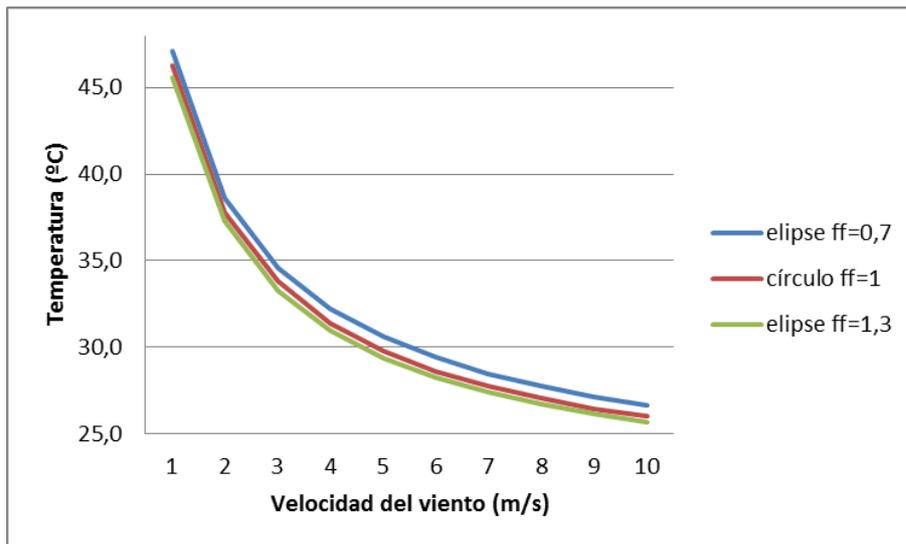


Figura 0-2. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 1 segunda casuística

Estudio paramétrico 2

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de ff entre 0,7 y 1,3 con variaciones de 0,1 y de los valores de intensidad entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

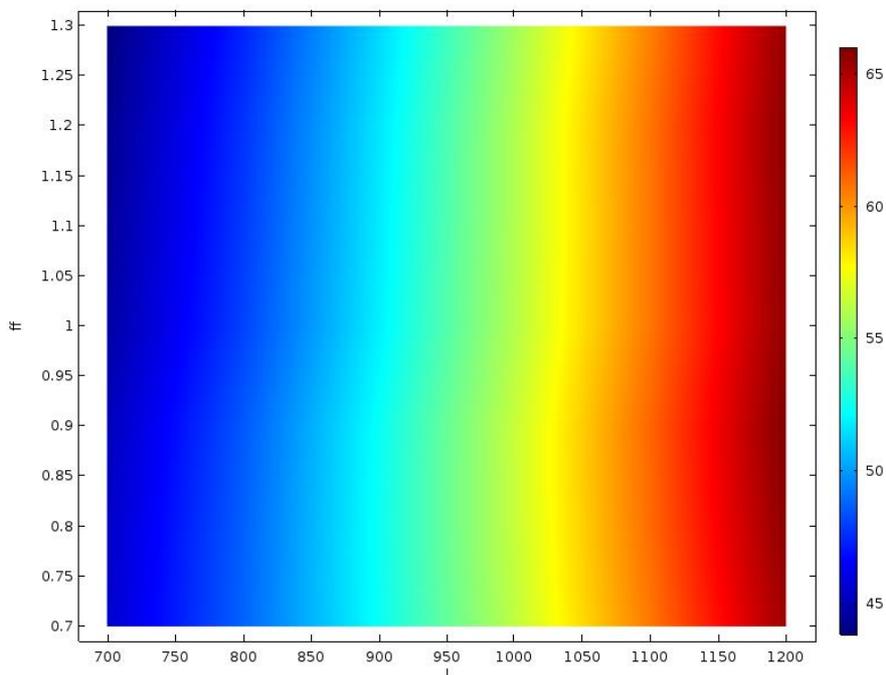


Figura 0-3. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 2 segunda casuística

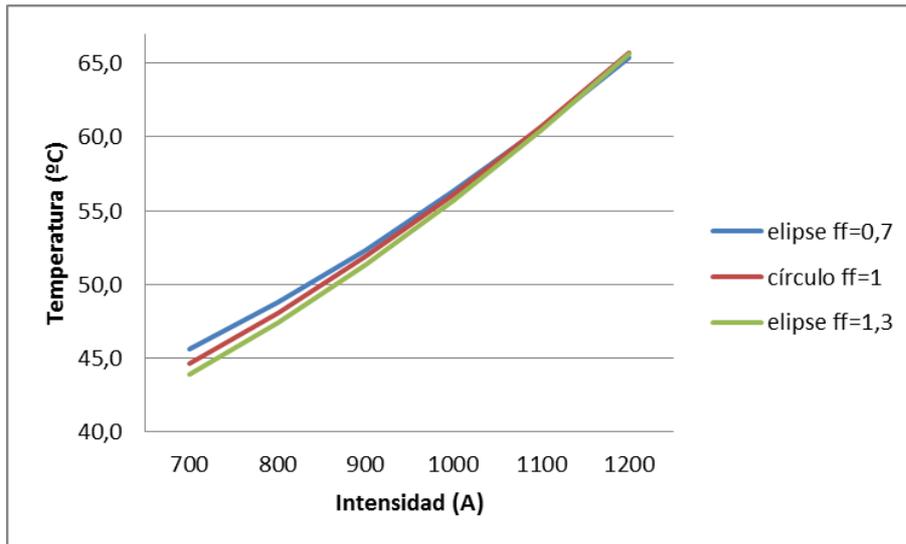


Figura 0-4. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 2 segunda casuística

Estudio paramétrico 3

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de ff entre 0,7 y 1,3 con variaciones de 0,1 y de los valores de sección del conductor entre 300 mm^2 y 700 mm^2 con variaciones de 100 mm^2 . Para este estudio paramétrico se ha variado el valor establecido de intensidad, cambiándolo de un valor fijo a un valor ligado a la sección del conductor, de manera que mantenga siempre la misma proporción, es decir, haciendo constante la densidad de corriente que circula por el cable.

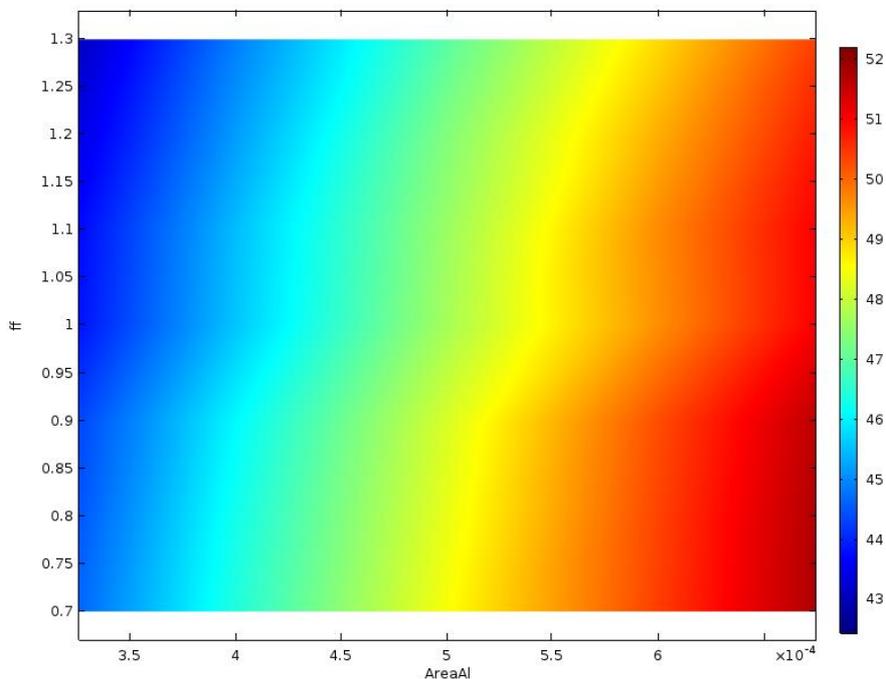


Figura 0-5. Modelo elíptico: temperaturas del estudio paramétrico 3 segunda casuística

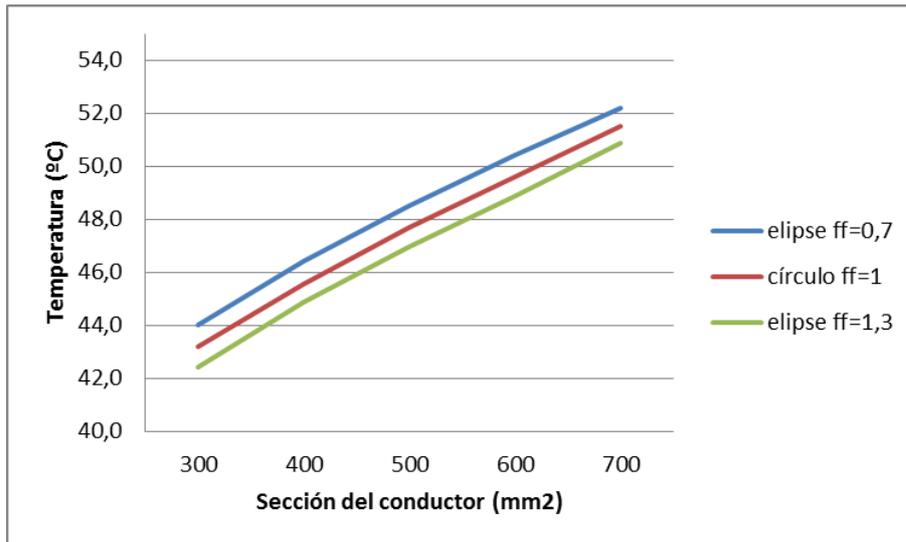


Figura 0-6. Modelo elíptico: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 3 segunda casuística

Modelo cuadrado

A continuación se van a presentar los resultados de los estudios paramétricos de la temperatura alcanzada con el modelo cuadrado. Se han realizado tres estudios; una parametrización de la velocidad del viento con el ángulo Alpha, una parametrización de la velocidad del viento frente a la intensidad de corriente y otra parametrización de la irradiancia con la velocidad del viento. Las dos últimas parametrizaciones se han realizado para dos valores de Alpha; uno con Alpha=0° y otro con Alpha=45°.

Estudio paramétrico 4

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores del ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, Alpha, entre 0° y 45° con variaciones de 11.25°.

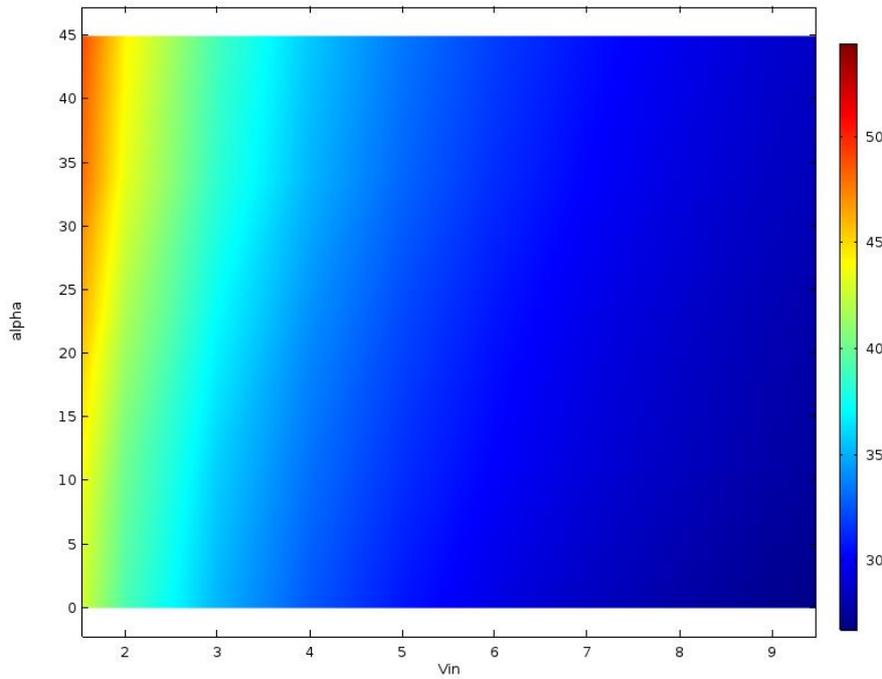


Figura 0-7. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 4 segunda casuística

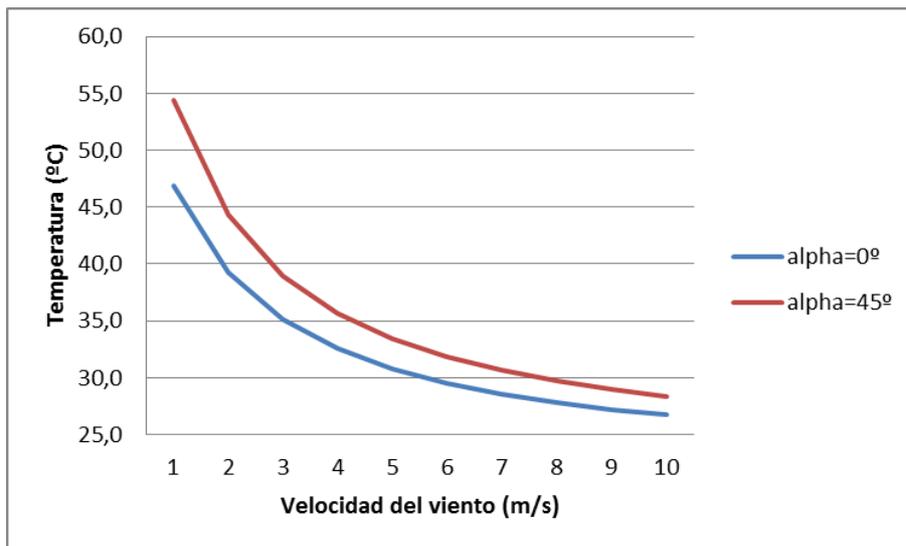


Figura 0-8. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 4 segunda casuística

Estudio paramétrico 5

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo cuadrado con Alpha=0° y con Alpha=45°, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de intensidad de corriente, entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

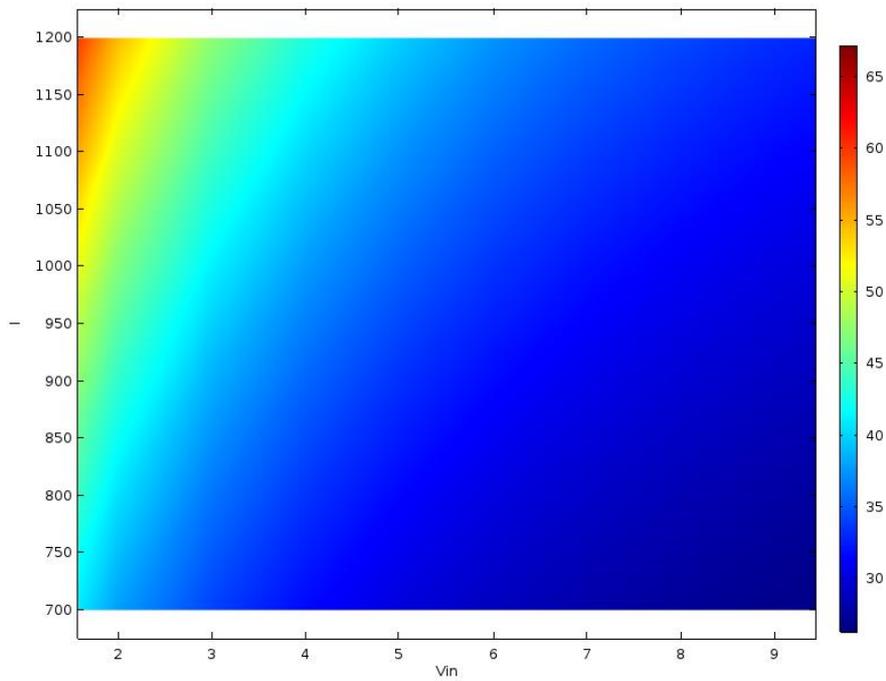


Figura 0-9. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=0^\circ$

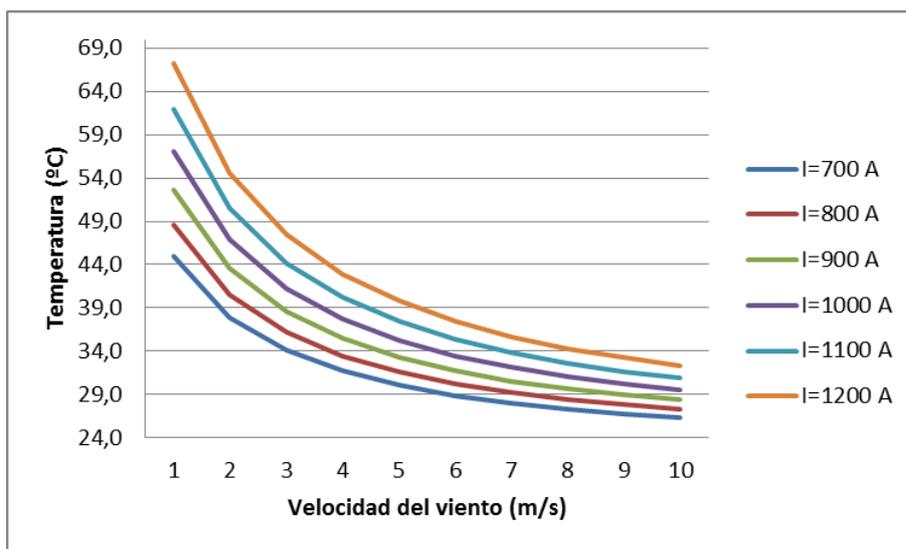


Figura 0-10. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=0^\circ$

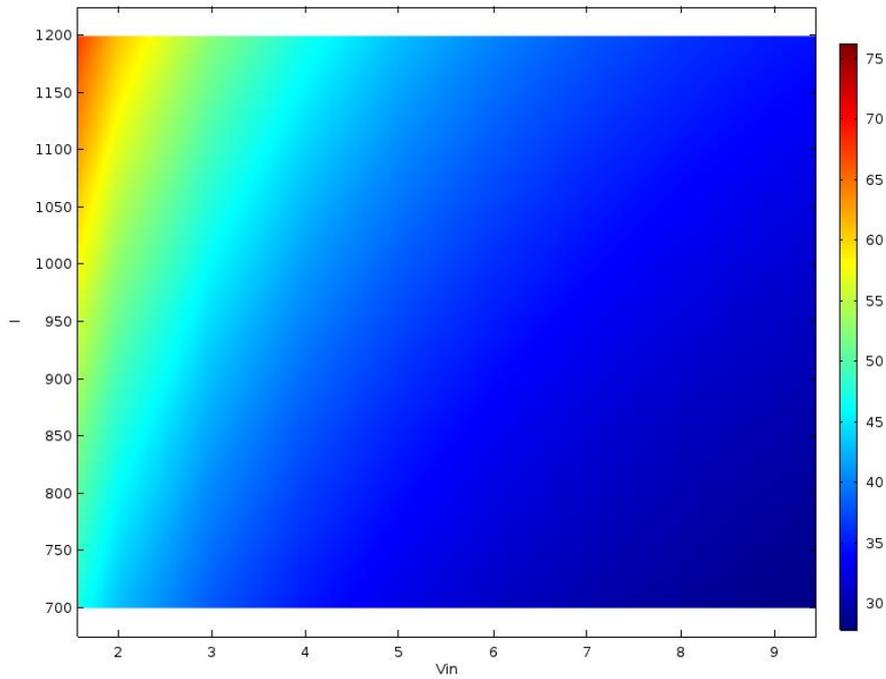


Figura 0-11. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$

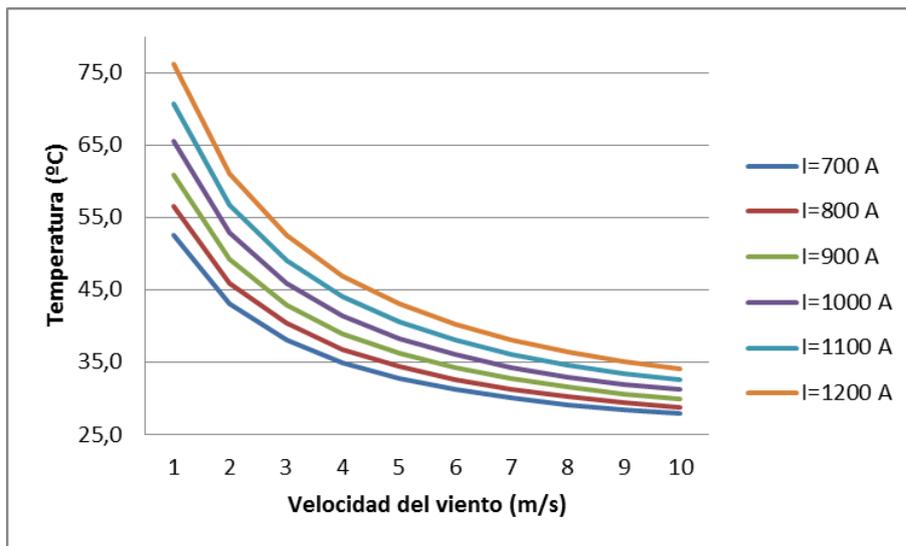


Figura 0-12. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 5 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$

Estudio paramétrico 6

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo cuadrado con $\text{Alpha}=0^\circ$ y con $\text{Alpha}=45^\circ$, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de irradiancia, entre 700 W/m² y 1100 W/m² con variaciones de 100 W/m².

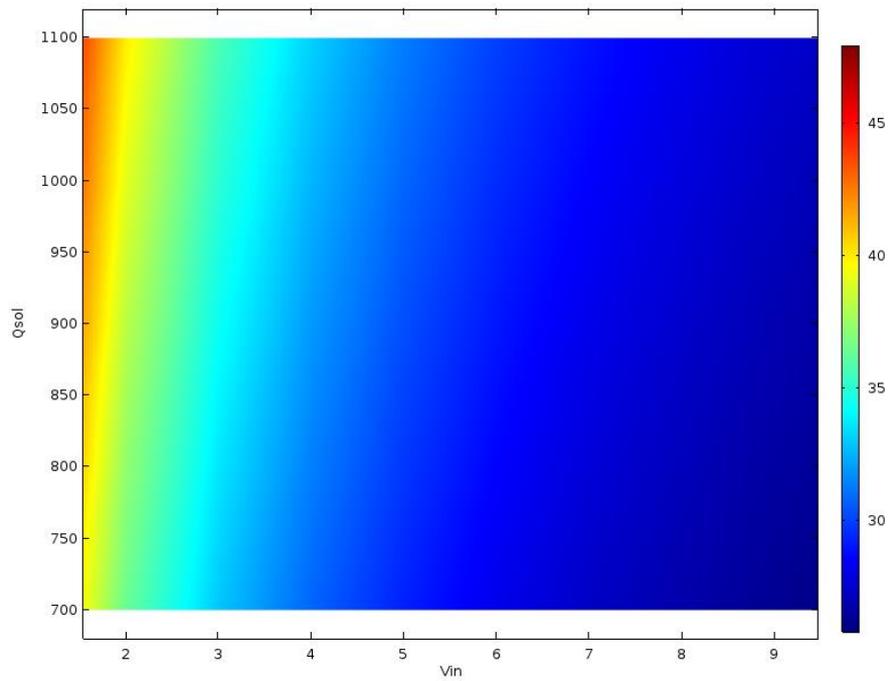


Figura 0-13. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para Alpha=0°

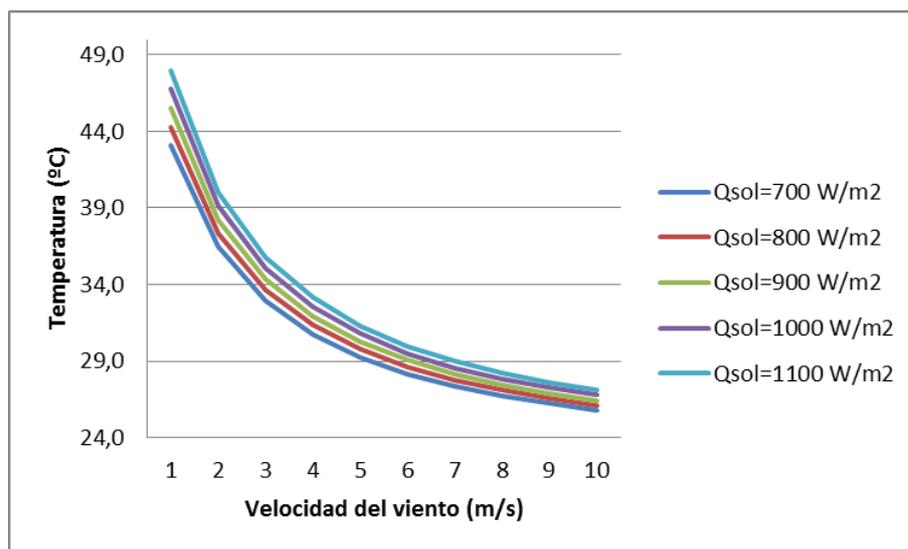


Figura 0-14. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para Alpha=0°

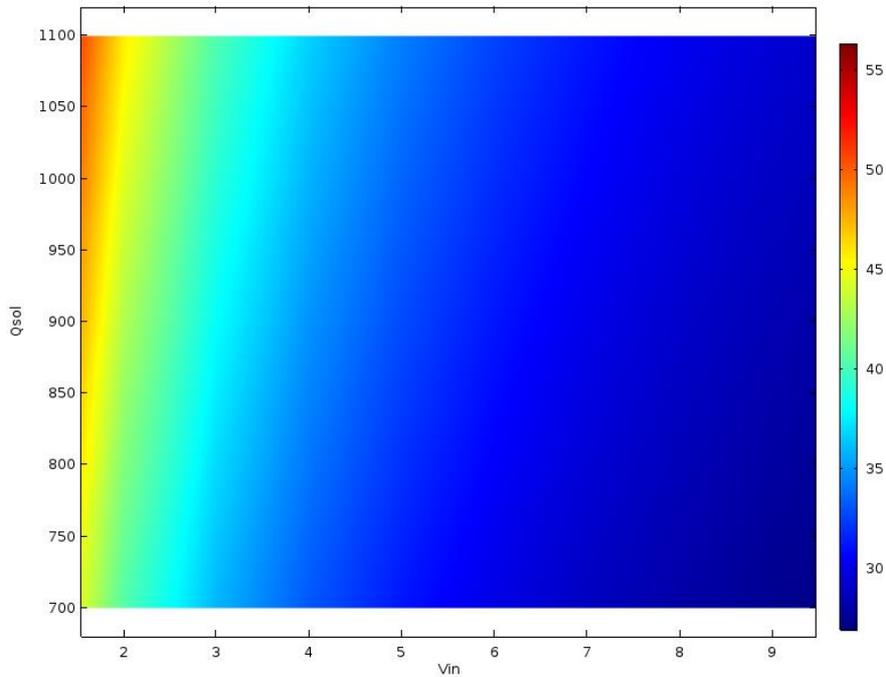


Figura 0-15. Modelo cuadrado: temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$

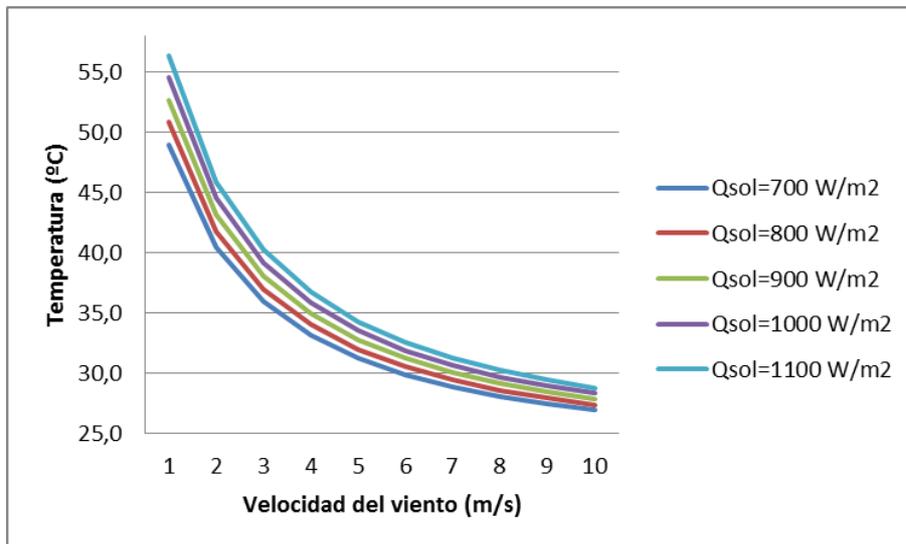


Figura 0-16. Modelo cuadrado: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 6 segunda casuística para $\text{Alpha}=45^\circ$

Modelo hueso

A continuación se van a presentar los resultados de los estudios paramétricos de la temperatura alcanzada con el modelo hueso. Se han realizado tres estudios; una parametrización de la velocidad del viento con el ángulo Alpha , una parametrización de la velocidad del viento frente a la intensidad de corriente y otra parametrización de la velocidad del viento frente a la intensidad de corriente para un modelo en el que se ha sustituido el núcleo de hierro del conductor por un núcleo de vidrio. Todas las parametrizaciones se han realizado para factor de anchura=3 y factor de anchura=4.

Estudio paramétrico 7

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo hueso, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de Alpha, entre 0° y 90° con variaciones de 45°.

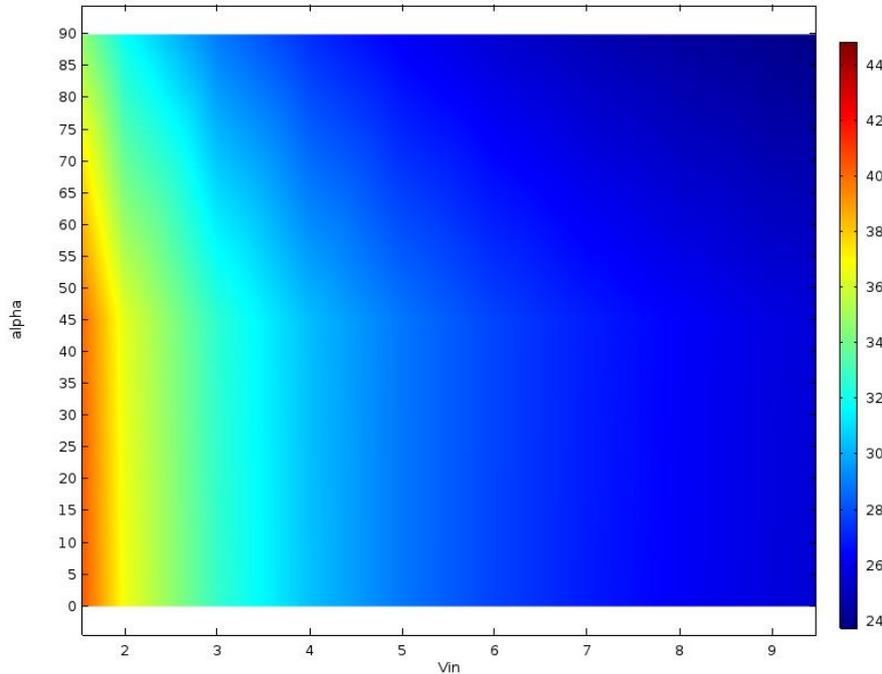


Figura 0-17. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=3

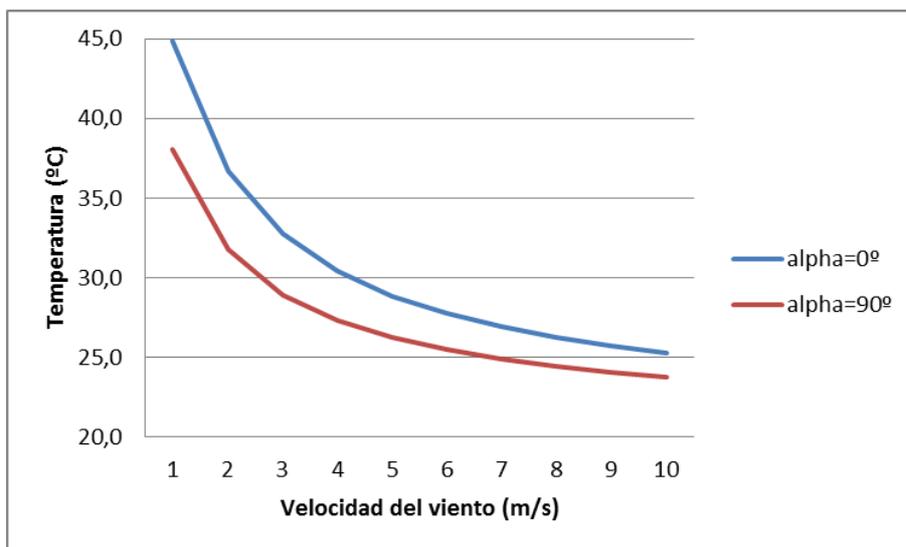


Figura 0-18. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=3

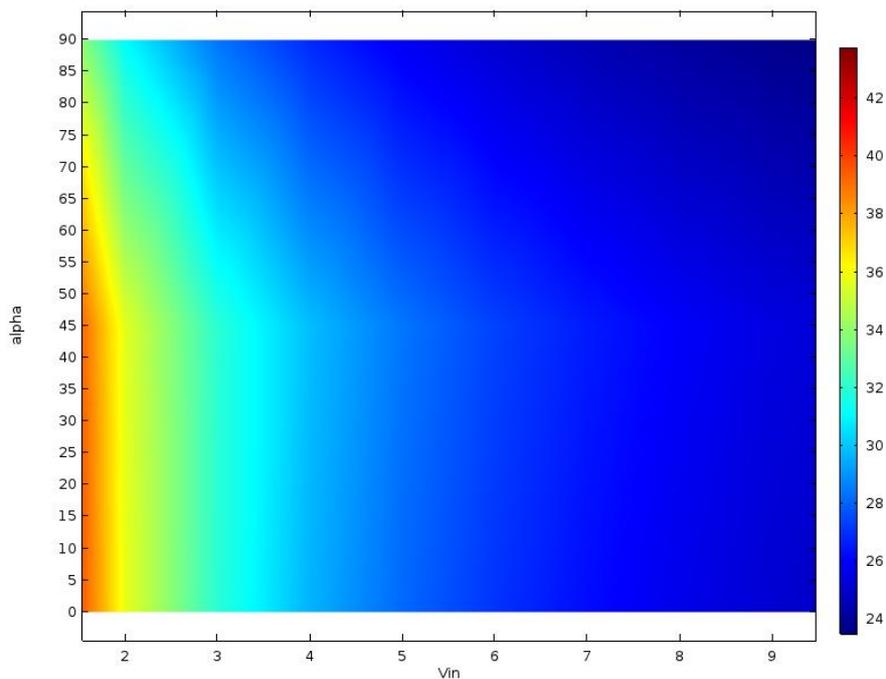


Figura 0-19. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=4

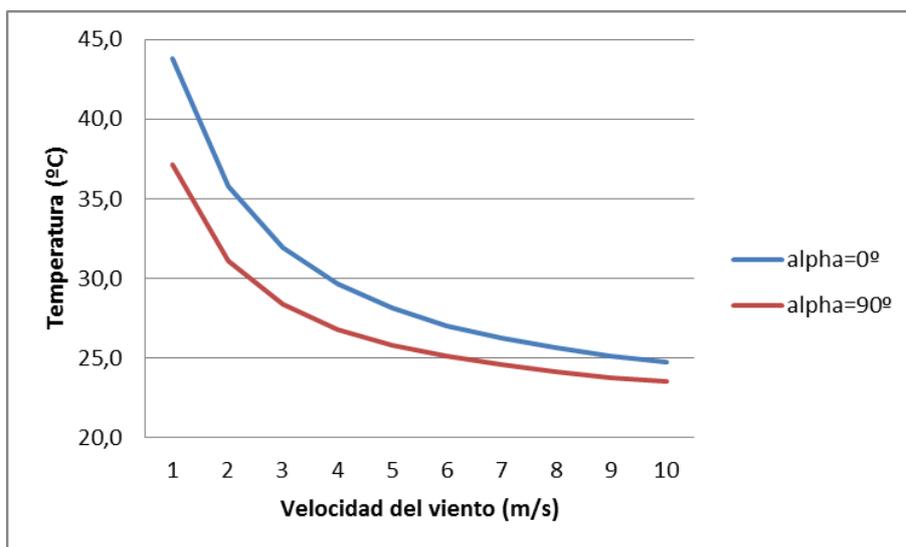


Figura 0-20. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 7 segunda casuística para un factor de anchura=4

Estudio paramétrico 8

En el siguiente estudio paramétrico se ha evaluado la temperatura máxima que se alcanza en el cable, con el modelo hueso, para cada combinación posible de los valores de velocidad del viento entre 1 m/s y 10 m/s con variaciones de 1 m/s y de los valores de intensidad de corriente, entre 700 A y 1200 A con variaciones de 100 A.

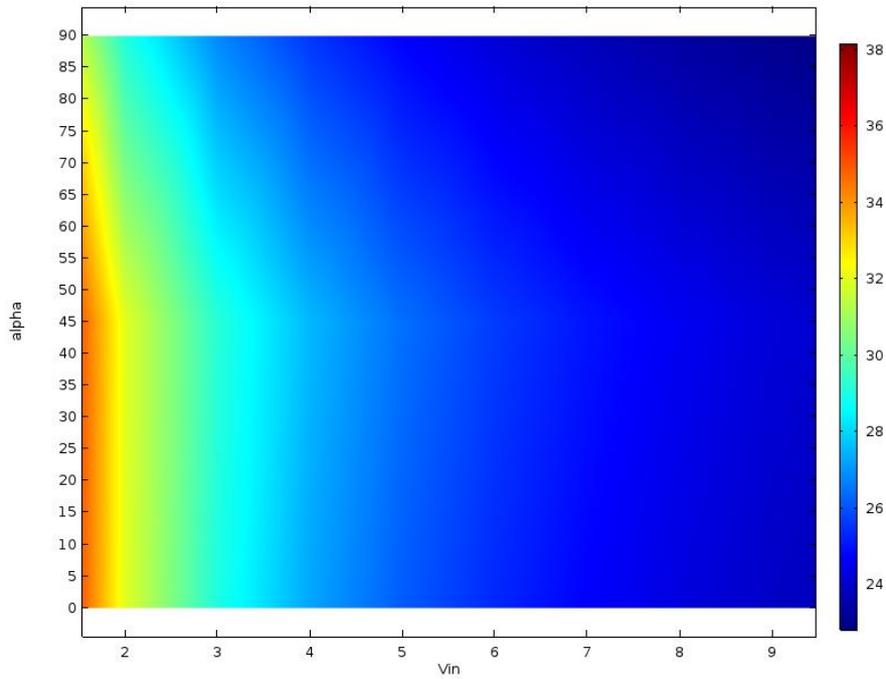


Figura 0-21. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=3

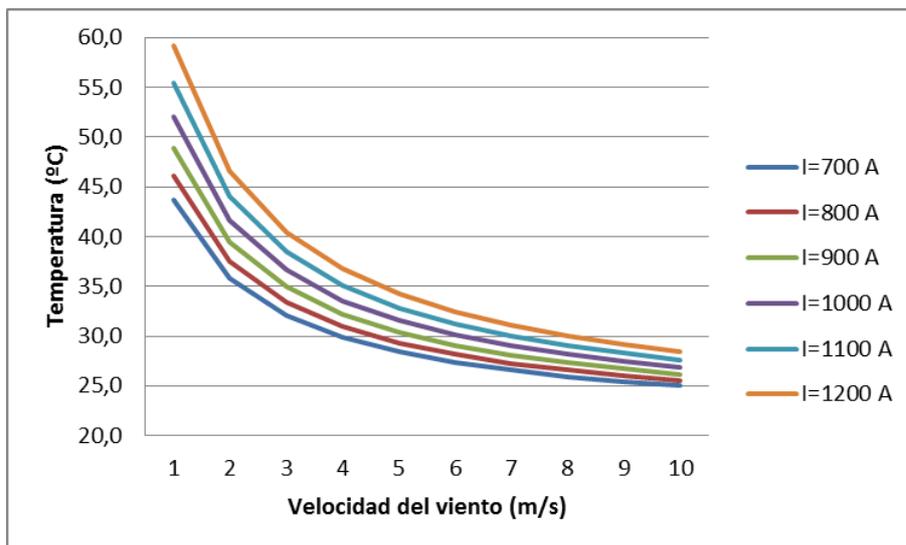


Figura 0-22. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=3

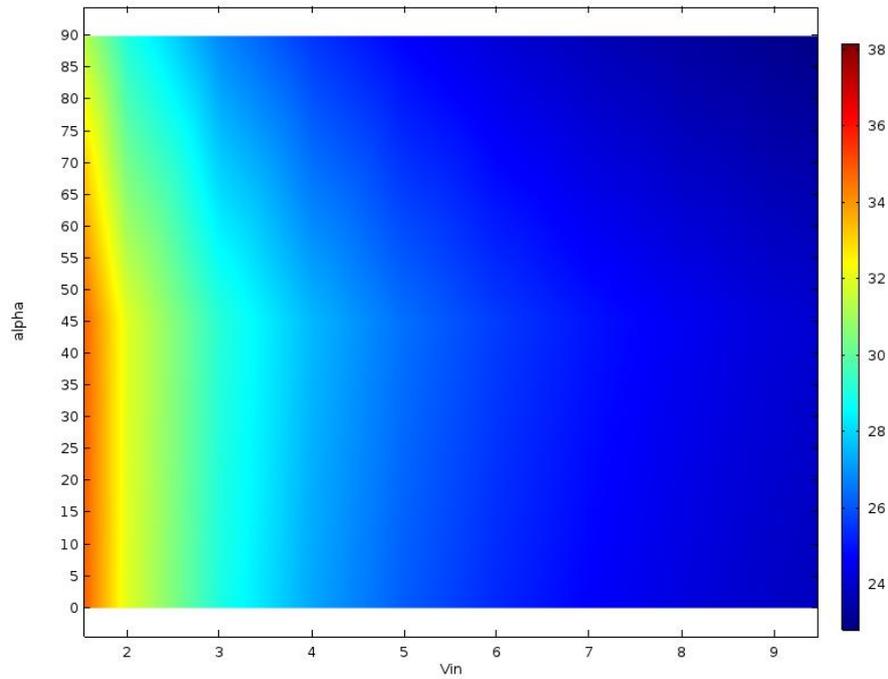


Figura 0-23. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=4

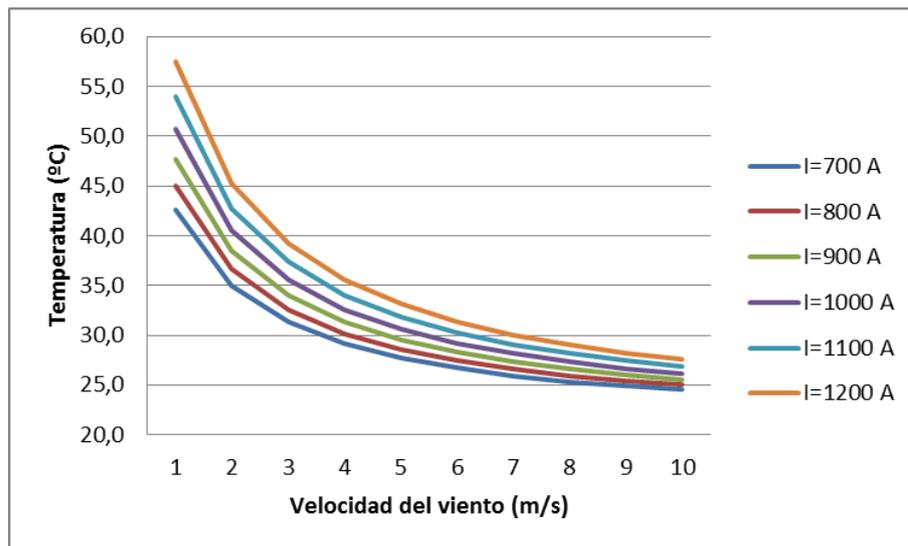


Figura 0-24. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 8 segunda casuística para un factor de anchura=4

Estudio paramétrico 9

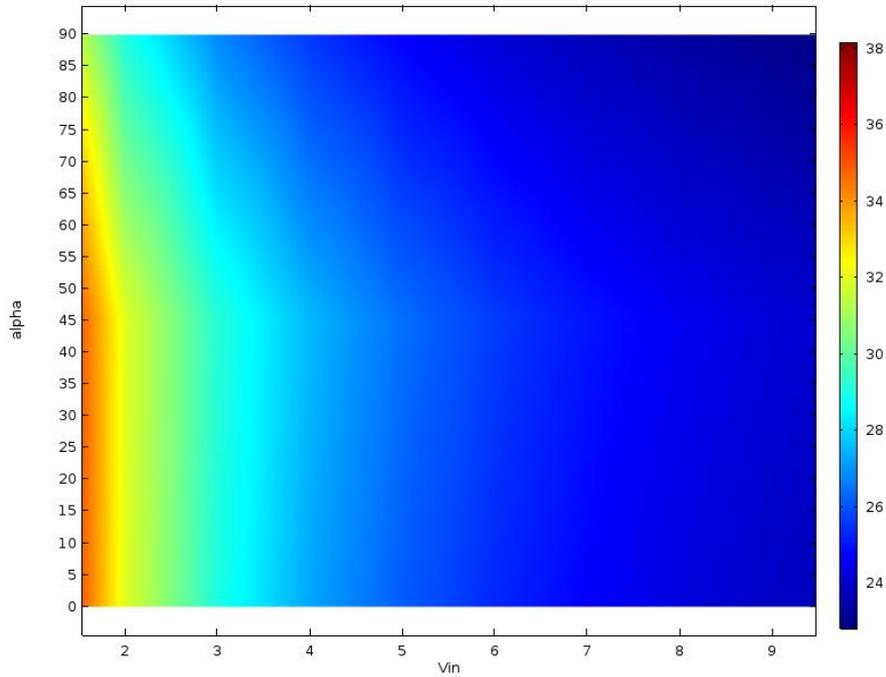


Figura 0-25. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=3

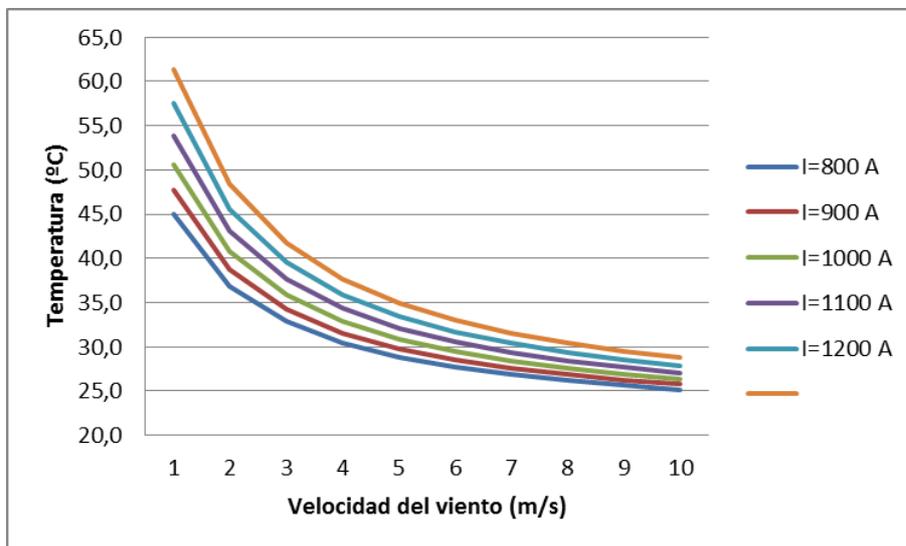


Figura 0-26. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=3

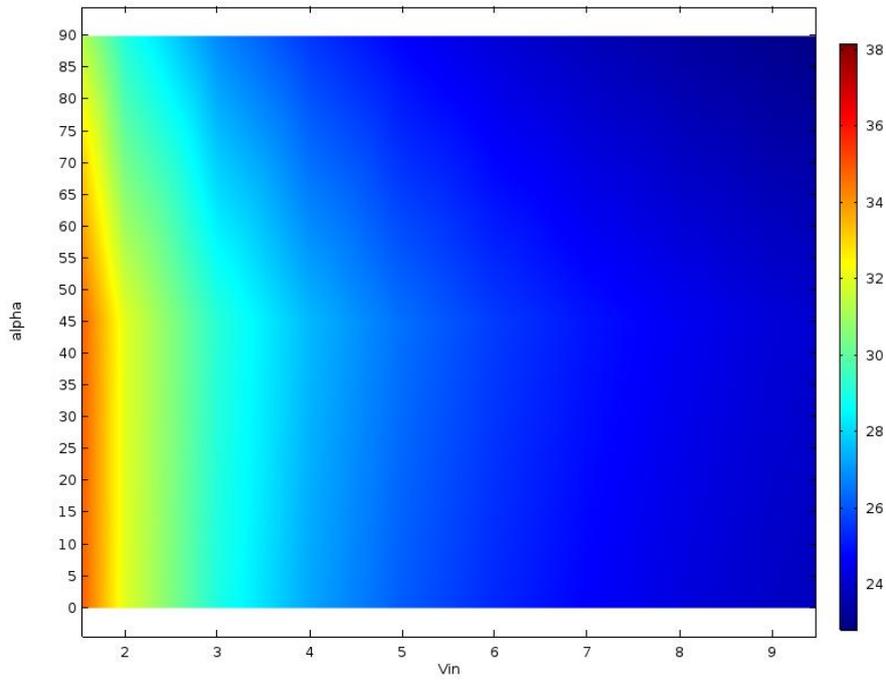


Figura 0-27. Modelo hueso: temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=4

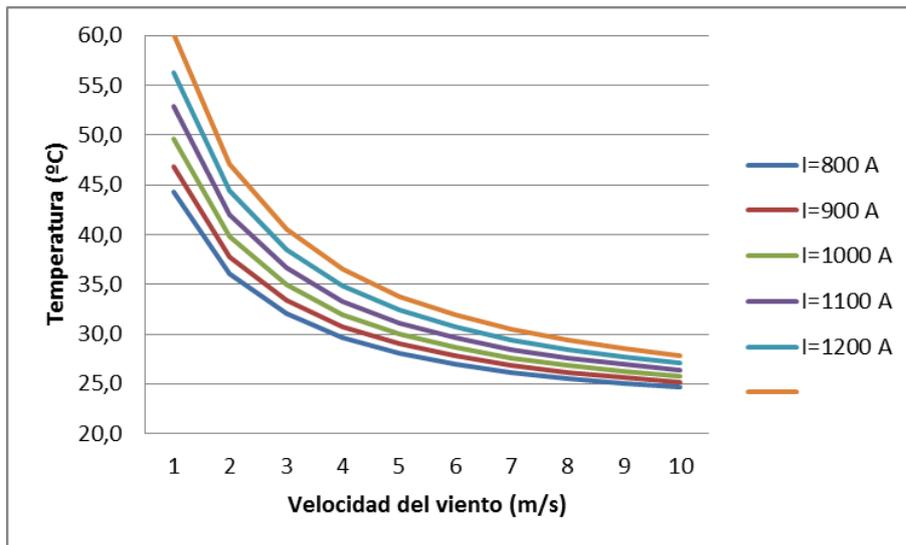


Figura 0-28. Modelo hueso: gráfico de temperaturas del estudio paramétrico 9 segunda casuística para un factor de anchura=4

ANEXO B

A continuación se van a exponer las tablas con los resultados obtenidos del programa COMSOL Multiphysics 5.2 para la primera casuística:

Modelo elíptico

Tabla 0–1. Modelo elíptico: estudio paramétrico 1 primera casuística

Vin	ff=0.7	ff=0.8	ff=0.9	ff=1	ff=1.1	ff=1.2	ff=1.3
1	41,427	41,503	41,491	41,220	41,178	41,128	40,944
2	34,635	34,618	34,546	34,283	34,336	34,174	34,084
3	31,463	31,399	31,292	31,033	31,042	30,895	30,814
4	29,568	29,490	29,381	29,092	29,126	28,998	28,904
5	28,314	28,224	28,093	27,821	27,865	27,729	27,636
6	27,375	27,277	27,156	26,910	26,919	26,813	26,714
7	26,647	26,551	26,438	26,205	26,213	26,101	26,009
8	26,068	25,972	25,872	25,638	25,650	25,539	25,451
9	25,591	25,503	25,409	25,183	25,189	25,079	24,999
10	25,193	25,113	25,015	24,806	24,804	24,693	24,625

Tabla 0–2. Modelo elíptico: estudio paramétrico 2 primera casuística

I	ff=0.7	ff=0.8	ff=0.9	ff=1	ff=1.1	ff=1.2	ff=1.3
700	39,864	39,889	39,839	39,555	39,488	39,412	39,221
800	43,091	43,222	43,250	42,994	42,978	42,955	42,778
900	46,721	46,967	47,082	46,858	46,898	46,933	46,773
1000	50,740	51,112	51,321	51,132	51,232	51,332	51,187
1100	55,138	55,644	55,952	55,805	55,967	56,134	56,006
1200	59,902	60,549	60,965	60,860	61,085	61,323	61,219

Tabla 0–3. Modelo elíptico: estudio paramétrico 3 primera casuística

AreaAl (mm ²)	ff=0.7	ff=0.8	ff=0.9	ff=1	ff=1.1	ff=1.2	ff=1.3
300	38,527	38,547	38,563	38,282	38,315	38,164	37,951
400	40,765	40,821	40,803	40,519	40,575	40,427	40,281
500	42,737	42,802	42,828	42,569	42,606	42,533	42,303
600	44,561	44,715	44,806	44,421	44,585	44,425	44,173
700	46,300	46,484	46,574	46,244	46,371	46,292	46,122

Modelo Cuadrado

Tabla 0-4. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 1 primera casuística

Vin	Alpha=0°	Alpha=11.25°	Alpha=22.5°	Alpha=33.75°	Alpha=45°
1	42,008	42,851	44,445	46,235	47,105
2	35,660	36,111	37,186	38,337	38,949
3	32,299	32,674	33,403	34,294	34,748
4	30,209	30,583	31,081	31,785	32,185
5	28,756	29,152	29,547	30,113	30,470
6	27,694	28,113	28,415	28,900	29,237
7	26,941	27,361	27,588	27,979	28,304
8	26,345	26,763	26,947	27,301	27,573
9	25,877	26,273	26,429	26,738	26,992
10	25,492	25,849	25,999	26,296	26,526

Tabla 0-5. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 primera casuística con Alpha=0°

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	40,143	43,816	47,928	52,461	57,395	62,712
2	34,310	36,990	40,019	43,390	47,097	51,122
3	31,247	33,361	35,757	38,435	41,391	44,625
4	29,359	31,121	33,121	35,358	37,834	40,549
5	28,047	29,567	31,292	33,226	35,374	37,731
6	27,074	28,413	29,934	31,639	33,528	35,606
7	26,381	27,584	28,951	30,482	32,181	34,049
8	25,839	26,938	28,186	29,583	31,131	32,828
9	25,406	26,425	27,580	28,872	30,303	31,871
10	25,046	25,996	27,074	28,279	29,612	31,075

Tabla 0-6. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 primera casuística con Alpha=45°

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	45,269	49,233	53,656	58,531	63,820	69,499
2	37,715	40,604	43,871	47,502	51,491	55,824
3	33,801	36,072	38,658	41,558	44,763	48,267
4	31,380	33,253	35,383	37,777	40,437	43,359
5	29,739	31,339	33,160	35,204	37,478	39,979
6	28,565	29,965	31,560	33,351	35,341	37,527
7	27,676	28,926	30,347	31,941	33,711	35,659
8	26,990	28,126	29,415	30,859	32,461	34,221
9	26,457	27,504	28,692	30,021	31,492	33,107
10	26,030	27,006	28,113	29,352	30,722	32,224

Tabla 0-7. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 primera casuística con Alpha=0°

Vin	Qsol=700 W/m2	Qsol=800 W/m2	Qsol=900 W/m2	Qsol=1000 W/m2	Qsol=1100 W/m2
1	40,984	41,923	42,860	43,794	44,725
2	34,922	35,607	36,291	36,975	37,658
3	31,729	32,269	32,810	33,350	33,890
4	29,759	30,210	30,661	31,112	31,563
5	28,392	28,781	29,170	29,559	29,949
6	27,378	27,720	28,063	28,407	28,750
7	26,654	26,962	27,271	27,579	27,888
8	26,088	26,370	26,652	26,934	27,216
9	25,637	25,898	26,160	26,421	26,682
10	25,262	25,505	25,749	25,993	26,237

Tabla 0-8. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 primera casuística con Alpha=45°

Vin	Qsol=700 W/m2	Qsol=800 W/m2	Qsol=900 W/m2	Qsol=1000 W/m2	Qsol=1100 W/m2
1	45,749	47,183	48,618	50,034	51,447
2	38,068	39,111	40,154	41,197	42,238
3	34,078	34,897	35,718	36,539	37,364
4	31,608	32,284	32,961	33,640	34,319
5	29,934	30,511	31,090	31,669	32,250
6	28,735	29,241	29,748	30,256	30,764
7	27,828	28,280	28,732	29,185	29,638
8	27,128	27,539	27,950	28,361	28,772
9	26,584	26,963	27,342	27,721	28,100
10	26,149	26,502	26,856	27,209	27,563

Modelo Hueso

Tabla 0-9. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 primera casuística con factor de anchura=3

Vin	Alpha=0°	Alpha=45°	Alpha=90°
1	39,036	38,789	34,830
2	32,677	32,623	29,633
3	29,668	29,676	27,309
4	27,890	27,946	25,966
5	26,709	26,811	25,088
6	25,875	25,993	24,458
7	25,246	25,364	23,980
8	24,752	24,868	23,603

Vin	Alpha=0°	Alpha=45°	Alpha=90°
9	24,352	24,462	23,297
10	24,020	24,126	23,046

Tabla 0–10. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 primera casuística con factor de anchura=4

Vin	Alpha=0°	Alpha=45°	Alpha=90°
1	38,166	38,001	34,043
2	31,964	32,005	29,039
3	29,015	29,178	26,820
4	27,265	27,538	25,557
5	26,131	26,430	24,734
6	25,333	25,633	24,147
7	24,727	25,036	23,699
8	24,265	24,567	23,348
9	23,896	24,190	23,062
10	23,592	23,879	22,828

Tabla 0–11. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 primera casuística con factor de anchura=3

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	37,818	40,335	43,169	46,312	49,759	53,501
2	31,847	33,564	35,508	37,676	40,066	42,673
3	29,031	30,349	31,844	33,519	35,369	37,394
4	27,371	28,446	29,669	31,039	32,557	34,223
5	26,269	27,181	28,217	29,379	30,667	32,081
6	25,491	26,286	27,189	28,201	29,323	30,555
7	24,904	25,612	26,416	27,317	28,315	29,410
8	24,443	25,083	25,810	26,624	27,526	28,515
9	24,069	24,655	25,319	26,063	26,887	27,790
10	23,758	24,299	24,912	25,598	26,358	27,191

Tabla 0–12. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 primera casuística con factor de anchura=4

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	36,999	39,411	42,130	45,148	48,459	52,056
2	31,177	32,806	34,651	36,708	38,978	41,457
3	28,414	29,658	31,071	32,654	34,404	36,321
4	26,782	27,782	28,923	30,205	31,626	33,187
5	25,726	26,566	27,522	28,596	29,789	31,102
6	24,983	25,709	26,536	27,464	28,494	29,629

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
7	24,418	25,059	25,789	26,607	27,516	28,517
8	23,987	24,563	25,218	25,952	26,765	27,659
9	23,642	24,168	24,765	25,433	26,173	26,985
10	23,358	23,842	24,391	25,006	25,687	26,434

Tabla 0–13. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 primera casuística con factor de anchura=3

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	38,864	41,529	44,529	47,855	51,498	55,453
2	32,590	34,420	36,492	38,804	41,353	44,133
3	29,570	30,972	32,561	34,343	36,313	38,470
4	27,772	28,909	30,202	31,653	33,260	35,026
5	26,582	27,540	28,631	29,854	31,210	32,700
6	25,742	26,574	27,520	28,579	29,755	31,048
7	25,108	25,846	26,684	27,623	28,665	29,808
8	24,612	25,277	26,032	26,878	27,815	28,843
9	24,212	24,819	25,507	26,278	27,131	28,068
10	23,882	24,440	25,074	25,783	26,568	27,428

Tabla 0–14. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 primera casuística con factor de anchura=4

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	38,210	40,793	43,703	46,932	50,473	54,316
2	31,967	33,718	35,699	37,910	40,348	43,011
3	28,958	30,287	31,798	33,492	35,366	37,419
4	27,169	28,229	29,439	30,799	32,309	33,969
5	26,016	26,899	27,906	29,038	30,296	31,681
6	25,214	25,974	26,839	27,811	28,890	30,079
7	24,609	25,278	26,038	26,892	27,841	28,886
8	24,148	24,748	25,429	26,193	27,038	27,968
9	23,783	24,329	24,948	25,641	26,409	27,253
10	23,483	23,985	24,554	25,191	25,897	26,671

A continuación se van a exponer las tablas con los resultados obtenidos del programa COMSOL Multiphysics 5.2 para la segunda casuística:

Modelo elipse

Tabla 0–15. Modelo elíptico: estudio paramétrico 1 segunda casuística

Vin	ff=0.7	ff=0.8	ff=0.9	ff=1	ff=1.1	ff=1.2	ff=1.3
1	47,122	46,997	46,795	46,297	46,093	45,905	45,562
2	38,615	38,450	38,232	37,798	37,759	37,477	37,279
3	34,612	34,415	34,177	33,778	33,706	33,447	33,284
4	32,194	32,001	31,778	31,354	31,318	31,102	30,938
5	30,597	30,399	30,159	29,765	29,755	29,534	29,376
6	29,402	29,201	28,980	28,619	28,578	28,403	28,243
7	28,472	28,281	28,078	27,738	27,702	27,524	27,377
8	27,734	27,549	27,367	27,031	27,004	26,830	26,691
9	27,127	26,956	26,787	26,462	26,432	26,264	26,137
10	26,619	26,462	26,293	25,992	25,956	25,789	25,679

Tabla 0–16. Modelo elíptico: estudio paramétrico 2 segunda casuística

I	ff=0.7	ff=0.8	ff=0.9	ff=1	ff=1.1	ff=1.2	ff=1.3
700	45,579	45,405	45,165	44,652	44,423	44,208	43,859
800	48,764	48,693	48,531	48,049	47,870	47,710	47,374
900	52,345	52,387	52,311	51,865	51,740	51,638	51,319
1000	56,310	56,476	56,494	56,087	56,021	55,983	55,680
1100	60,648	60,947	61,066	60,701	60,695	60,725	60,446
1200	65,347	65,786	66,011	65,688	65,748	65,848	65,590

Tabla 0–17. Modelo elíptico: estudio paramétrico 3 segunda casuística

AreaAl (mm ²)	ff=0.7	ff=0.8	ff=0.9	ff=1	ff=1.1	ff=1.2	ff=1.3
300	44,032	43,859	43,711	43,218	43,117	42,808	42,442
400	46,424	46,276	46,073	45,564	45,483	45,174	44,879
500	48,500	48,350	48,189	47,707	47,594	47,363	46,968
600	50,400	50,353	50,256	49,611	49,647	49,310	48,884
700	52,204	52,177	52,070	51,495	51,473	51,227	50,896

Modelo Cuadrado

Tabla 0–18. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 1 segunda casuística

Vin	Alpha=0°	Alpha=11.25°	Alpha=22.5°	Alpha=33.75°	Alpha=45°
1	46,855	48,406	50,742	53,222	54,407
2	39,222	40,171	41,820	43,472	44,300
3	35,108	35,894	37,067	38,344	38,974

Vin	Alpha=0°	Alpha=11.25°	Alpha=22.5°	Alpha=33.75°	Alpha=45°
4	32,549	33,270	34,098	35,134	35,678
5	30,768	31,482	32,137	32,976	33,469
6	29,463	30,179	30,702	31,408	31,874
7	28,536	29,231	29,643	30,218	30,664
8	27,803	28,478	28,827	29,344	29,718
9	27,227	27,865	28,165	28,620	28,968
10	26,752	27,333	27,618	28,052	28,368

Tabla 0-19. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 segunda casuística con Alpha=0°

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	44,994	48,611	52,661	57,127	61,988	67,223
2	37,857	40,528	43,544	46,896	50,573	54,568
3	34,048	36,163	38,559	41,233	44,186	47,415
4	31,696	33,461	35,463	37,703	40,181	42,894
5	30,064	31,587	33,318	35,262	37,413	39,774
6	28,852	30,195	31,721	33,430	35,326	37,418
7	27,980	29,186	30,557	32,094	33,799	35,672
8	27,300	28,402	29,652	31,052	32,602	34,305
9	26,760	27,780	28,936	30,230	31,662	33,233
10	26,310	27,261	28,339	29,545	30,880	32,344

Tabla 0-20. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 2 segunda casuística con Alpha=45°

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	52,634	56,501	60,823	65,570	70,726	76,264
2	43,116	45,987	49,227	52,823	56,769	61,055
3	38,060	40,348	42,942	45,838	49,035	52,525
4	34,893	36,778	38,926	41,334	44,002	46,930
5	32,742	34,352	36,186	38,246	40,532	43,045
6	31,195	32,606	34,212	36,013	38,009	40,204
7	30,023	31,279	32,707	34,311	36,090	38,044
8	29,122	30,260	31,553	33,002	34,610	36,377
9	28,422	29,470	30,659	31,990	33,465	35,084
10	27,864	28,840	29,947	31,186	32,557	34,062

Tabla 0-21. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 segunda casuística con Alpha=0°

Vin	Qsol=700 W/m2	Qsol=800 W/m2	Qsol=900 W/m2	Qsol=1000 W/m2	Qsol=1100 W/m2
1	43,073	44,303	45,527	46,748	47,963
2	36,447	37,348	38,249	39,149	40,048

Vin	Qsol=700 W/m2	Qsol=800 W/m2	Qsol=900 W/m2	Qsol=1000 W/m2	Qsol=1100 W/m2
3	32,933	33,645	34,357	35,070	35,783
4	30,764	31,359	31,954	32,549	33,144
5	29,259	29,772	30,286	30,800	31,314
6	28,142	28,594	29,047	29,501	29,954
7	27,341	27,748	28,155	28,563	28,970
8	26,716	27,088	27,460	27,832	28,205
9	26,219	26,564	26,908	27,253	27,598
10	25,805	26,126	26,448	26,769	27,091

Tabla 0–22. Modelo cuadrado: estudio paramétrico 3 segunda casuística con Alpha=45°

Vin	Qsol=700 W/m2	Qsol=800 W/m2	Qsol=900 W/m2	Qsol=1000 W/m2	Qsol=1100 W/m2
1	48,943	50,807	52,663	54,509	56,344
2	40,392	41,766	43,137	44,505	45,870
3	35,905	36,989	38,077	39,165	40,255
4	33,117	34,011	34,906	35,803	36,702
5	31,222	31,987	32,752	33,519	34,288
6	29,864	30,533	31,204	31,876	32,550
7	28,836	29,433	30,031	30,629	31,229
8	28,044	28,586	29,129	29,672	30,215
9	27,428	27,928	28,428	28,928	29,429
10	26,937	27,402	27,869	28,335	28,802

Modelo Hueso

Tabla 0–23. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 segunda casuística con factor de anchura=3

Vin	Alpha=0°	Alpha=45°	Alpha=90°
1	44,861	44,220	38,027
2	36,675	36,371	31,759
3	32,747	32,575	28,928
4	30,408	30,317	27,291
5	28,844	28,838	26,223
6	27,736	27,777	25,457
7	26,904	26,961	24,876
8	26,252	26,317	24,417
9	25,723	25,791	24,046
10	25,285	25,356	23,741

Tabla 0–24. Modelo hueso: estudio paramétrico 1 segunda casuística con factor de anchura=4

Vin	Alpha=0°	Alpha=45°	Alpha=90°
1	43,771	43,283	37,115
2	35,769	35,629	31,059
3	31,932	31,956	28,352
4	29,621	29,822	26,814
5	28,108	28,375	25,812
6	27,042	27,333	25,098
7	26,236	26,556	24,553
8	25,620	25,947	24,125
9	25,131	25,455	23,778
10	24,729	25,051	23,493

Tabla 0–25. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 segunda casuística con factor de anchura=3

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	43,661	46,141	48,935	52,035	55,433	59,121
2	35,848	37,559	39,493	41,650	44,027	46,621
3	32,108	33,429	34,926	36,599	38,446	40,468
4	29,886	30,967	32,196	33,570	35,092	36,760
5	28,401	29,318	30,360	31,527	32,819	34,238
6	27,350	28,149	29,057	30,073	31,200	32,438
7	26,560	27,271	28,078	28,982	29,984	31,084
8	25,941	26,584	27,313	28,129	29,033	30,025
9	25,439	26,026	26,692	27,438	28,264	29,169
10	25,023	25,565	26,179	26,866	27,627	28,461

Tabla 0–26. Modelo hueso: estudio paramétrico 2 segunda casuística con factor de anchura=4

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	42,618	45,000	47,683	50,662	53,930	57,479
2	34,984	36,608	38,445	40,494	42,752	45,217
3	31,328	32,577	33,994	35,577	37,327	39,241
4	29,132	30,144	31,294	32,581	34,008	35,574
5	27,698	28,546	29,511	30,594	31,795	33,114
6	26,688	27,421	28,254	29,190	30,228	31,369
7	25,924	26,570	27,305	28,130	29,046	30,054
8	25,340	25,919	26,577	27,314	28,132	29,031
9	24,876	25,403	26,002	26,672	27,415	28,231
10	24,495	24,980	25,530	26,147	26,829	27,579

Tabla 0–27. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 segunda casuística con factor de anchura=3

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	45,052	47,676	50,630	53,906	57,497	61,391
2	36,857	38,681	40,744	43,044	45,578	48,344
3	32,844	34,249	35,843	37,625	39,592	41,745
4	30,433	31,578	32,879	34,335	35,948	37,718
5	28,826	29,791	30,888	32,117	33,480	34,976
6	27,690	28,527	29,478	30,543	31,725	33,024
7	26,836	27,577	28,419	29,363	30,408	31,557
8	26,170	26,837	27,594	28,443	29,383	30,415
9	25,633	26,241	26,931	27,704	28,560	29,499
10	25,190	25,749	26,384	27,094	27,880	28,743

Tabla 0–28. Modelo hueso: estudio paramétrico 3 segunda casuística con factor de anchura=4

Vin	I=700 A	I=800 A	I=900 A	I=1000 A	I=1100 A	I=1200 A
1	44,232	46,780	49,649	52,832	56,321	60,109
2	36,062	37,806	39,780	41,981	44,405	47,052
3	32,077	33,413	34,930	36,625	38,499	40,548
4	29,663	30,737	31,958	33,327	34,844	36,511
5	28,095	28,988	30,005	31,147	32,415	33,809
6	27,001	27,768	28,641	29,620	30,709	31,906
7	26,182	26,856	27,623	28,484	29,440	30,493
8	25,558	26,160	26,844	27,612	28,462	29,397
9	25,066	25,613	26,234	26,930	27,701	28,548
10	24,663	25,166	25,736	26,375	27,083	27,859

ANEXO C

Influence of Overhead Power Conductor Shape on its Temperature

J.C. del-Pino-López*, D. Garrido-García, P. Cruz-Romero and A. Gómez-Expósito

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

*Camino de los descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, vaisat@us.es

Abstract: This work deals with the design of new and more efficient overhead power conductors. To this purpose, a multiphysics finite elements model is developed in COMSOL Multiphysics®, where electromagnetic, thermal and fluid dynamics physics are fully coupled. By means of this model, different designs for the power conductors have been analyzed with the main goal of reducing its temperature when solar heating, radiation and forced convection heat transfer mechanisms are present, so that its current-carrying capacity may be increased in comparison to standard conductors. In addition, a parametric analysis has been carried out in order to analyze the influence of the main geometrical and environmental parameters on the temperature achieved in the conductor.

Keywords: overhead conductor, ampacity, temperature, forced convection, radiation.

1. Introduction

Due to the increase on electricity demand, the deregulation that imposes regulated revenues to transmission and distribution utilities, and the difficulty to build new overhead lines, in the last decades more and more power suppliers try to use power transmission lines up to their limits. This extreme use of power lines may lead to failures, so it is of interest to study more efficient designs of power lines with the main goal of obtaining power conductor with higher current-carrying capacity (ampacity). In this sense, overhead power conductors are affected by different heat transfer mechanisms: solar heating, radiation, conductive and forced convection heat transfer. The latter is the main heat evacuation mechanism, so it has much influence in the maximum temperature achieved by the power conductor. Additionally, the amount of heat evacuated by means of forced convection depends not only on the environmental conditions (wind direction, velocity and temperature), but also on the surface and shape

of the conductor. Therefore, it is clear that a suitable shape for the conductor may increase the heat evacuated by forced convection, hence reducing its maximum temperature. As a consequence, its ampacity may be increased in comparison to standard designs. However, the problem to be solved is rather complex, since there are three physics involved: an electromagnetic problem coupled to thermal and fluid dynamics ones. In this situation, the best choice is the use of a multiphysics software like COMSOL Multiphysics® for a suitable modelling of the system to be studied, in order to compute the temperature of the power conductor with accuracy.

The use of conductors of shape different from circle has been proposed previously, but not for the purpose of increasing the ampacity, but to reduce the wind load on the conductor.

2. Problem definition

The mathematical models to be solved, as well as the main hypotheses considered, are described in the following subsections.

2.1 Electromagnetic problem

The electromagnetic problem needs to be solved in order to compute the heat dissipated on the power conductor for a given current, which is the heat input for the thermal problem. This is performed based on the following assumptions:

- 1) The power conductor is straight and infinitely long, thereby rendering the problem 2-D.
- 2) The phase current is sinusoidal with 50 Hz of frequency.
- 3) All materials have constant electrical properties, with the exception of conductive materials, whose electrical conductivity $\sigma(\theta)$ depends on temperature:

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(\theta - 20)}, \quad (1)$$

where θ is the unknown temperature and σ_0 and α are the conductivity and the

temperature coefficient of the material at 20 °C, respectively.

- 4) Ferromagnetic materials are supposed to have constant permeability (μ).
- 5) Magnetics losses in ferromagnetic materials are neglected.

In this situation, the equation to be solved can be described as

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J}_e, \quad (2)$$

where \vec{A} is the magnetic vector potential, ω is the angular frequency and \vec{J}_e the external current density. Once the problem is solved, the power losses generated in the conductor (Q_l) can be calculated from the total current density \vec{J} as follows:

$$Q_l = \int \frac{\vec{J} \cdot \vec{J}^*}{\sigma} dS \quad (3)$$

2.2 Thermal problem

The starting assumptions for the thermal problem are as follows:

- 1) Since the power cable is straight and infinitely long, the heat transfer problem can be formulated in 2D on the x - y plane.
- 2) All materials have constant thermal properties.
- 3) The air temperature is known (θ_{amb}).
- 4) Heat radiation (Q_{rad}) is present between the outer cable surface and the surrounding environment, with known surface emissivity (ε) of the materials.
- 5) Solar heating is present and it is considered as a known heat source input (Q_s).
- 6) Heat dissipation by forced convection is also considered (Q_{conv}).
- 7) Wind velocity is known and perpendicular to the power conductor, so that the system remains in 2D.

As a consequence, the temperature of the power conductor can be derived from the associated steady-state heat balance equation, expressed as

$$Q_l + Q_s = Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (4)$$

where steady-state heat conduction inside the conductor is given by

$$\nabla \cdot (k\nabla\theta) + Q_l = 0, \quad (5)$$

the radiation heat loss is derived by

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta^4 - \theta_{amb}^4), \quad (6)$$

and the heat dissipated by forced convection is obtained from

$$\rho C_p u \cdot \nabla\theta = \nabla \cdot (k\nabla\theta), \quad (7)$$

where ρ is the air density, C_p the heat capacity of air, u the air velocity vector, θ is the unknown temperature, σ the Stefan-Boltzmann constant, and k the thermal conductivity of each material.

The coupled electromagnetic-thermal problem is iteratively solved as there are temperature-sensitive elements, such as the electrical conductivity of the conductor, which must be continuously corrected for the newly calculated temperature.

2.3 Fluid dynamics problem

As mentioned before, the air velocity field u around the conductor is required for the computation of the heat transferred by forced convection for a given wind velocity. This requires the computation of the continuity and momentum equations (Navier-Stokes equations) which govern the fluid flow, in the form of

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (8)$$

$$\rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla u + (\nabla u)^T)), \quad (9)$$

where p and μ are the air pressure and viscosity, respectively. In this case, air properties are temperature dependent also, and hence the fully coupled problem must be solved employing iterative techniques. In this sense, since wind velocity ranges from 1 m/s to 10 m/s, a k - ε turbulence model was considered.

3. Use of COMSOL Multiphysics©

The model developed for this study has implemented many features included in COMSOL. For example, the geometry of the power conductor has been simplified in order to parameterize its shape. In this sense, a conductor

composed of aluminium (external layers) and steel (core) is modeled by means of two concentric circles, the external one made of aluminium and the internal one made of steel. Its shape is deformed in order to obtain different elliptical shapes. To this goal, a new parameter called Shape Factor (SF) is defined, which ranges from 0.5 to 1.5, being equal to 1 when a circular shape is desired. This is shown in Figure 1, where three different shapes are presented for three different values of this parameter. It will be employed later in the parametric analysis developed in next section. In order to keep the same cross section in the conductor for every SF value, the major (R_M) and minor radius (R_m) of the elliptic shapes are obtained as follows:

$$R_m = \frac{\sqrt{Area / \pi}}{SF}, \quad (10)$$

$$R_M = SF \sqrt{Area / \pi}, \quad (11)$$

where $Area$ is the cross section of either aluminium or steel.

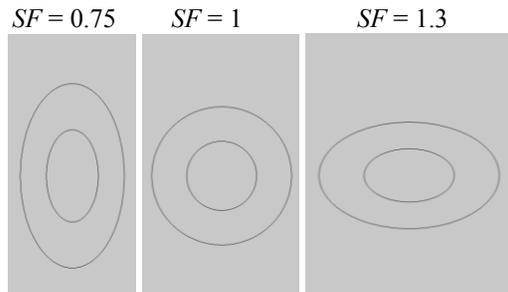


Figure 1. Example of power conductor shapes for different SF values.

On the other hand, four nodes are employed to define the multiphysics problem (Figure 2) with the following boundary conditions:

1) Magnetic fields (mf):

- Linearized resistivity for the material of the power conductor by means of a second “Ampère’s Law” node.
- “Single-turn Coil” to impose the current flowing through the power conductor.

2) Heat transfer (ht)

- “Heat transfer in solids” for the power conductor.

- “Heat transfer in fluids” for the surrounding air.
- “Temperature” and “Outflow” boundary conditions for the wind inlet and outlet boundaries.
- “Heat source” in the power conductor, derived from the electromagnetic heating, as the heat input source for the thermal problem.
- “Diffuse surface” in the external contour of the power cable to implement the heat losses due to radiation.
- “Boundary Heat Source” to set the solar radiation Q_s as an additional heat source on the upper side of the conductor.

3) Turbulent flow, $k-\varepsilon$ (spf)

- “Inlet” to set the wind velocity in the external domain.
- “Outlet” to set a pressure of 0 Pa in the outlet boundary.
- “Symmetry” on the remaining boundaries.

4) Multiphysics node

- “Non-isothermal Flow” node for coupling the thermal and fluid dynamic problems.
- “Temperature Coupling” for coupling the thermal and the magnetic problems.

In order to obtain accurate results, different operations have been applied to generate de mesh. In particular, 8 boundary layers are included in the external contour of the conductor, as shown in Figure 3, so that the velocity field can be accurately computed in the surrounding air.

Eventually, a “Stationary” step is set on the “Study” node in order to compute the steady-state temperature of the system. In order to develop a parametric analysis, in several simulation it is also included a “Parametric sweep” node with the parameters to be analyzed.

4. Case study

The case of a 300 mm² power conductor is now analyzed. As mentioned previously, the stranded power cable is considered to be composed by two concentric circles (Figure 1 for $SF = 1$), taking the cross section of aluminum as twice of that of the steel. The properties of the

materials are included in Table 1. Regarding boundary conditions, the temperature of air is taken as $\theta_{amb} = 20\text{ }^\circ\text{C}$, for a wind velocity (V_{in}) ranging from 1 m/s to 10 m/s (wind blowing in the horizontal direction). Also, the heat input caused by solar radiation is taken as $Q_s = 1200\text{ W/m}^2$. Finally, the current through the conductor (I_0) will vary from 400 A to 1200 A.

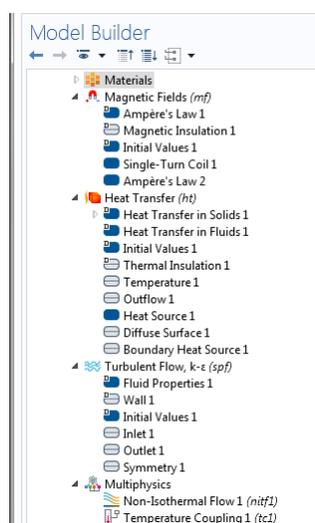


Figure 2. Model nodes for the implementation of the multiphysics problem.

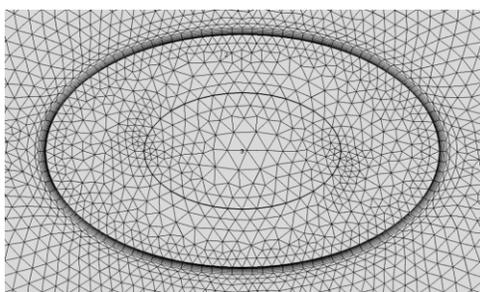


Figure 3. Example of mesh for an elliptic power conductor.

Figure 4 shows an example of the temperature and velocity fields obtained for two values of SF . As can be observed, for the current flowing through the conductor ($I_0 = 850\text{ A}$), the use of an elliptical shape with $SF = 1.4$ leads to a reduction on its maximum temperature of about $4\text{ }^\circ\text{C}$. As a consequence, it is of interest to study the effect of the geometrical shape of the power conductor on its temperature. In this sense, a parametric analysis is developed next in order to analyze how the current carrying capacity (ampacity) of the power line can be improved.

Table 1: Material properties

Material	Property
Aluminium	$\sigma = 3.77 \cdot 10^7\text{ S/m}$
	$\alpha = 0.00403\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	$\mu_r = 1$
	$k = 240\text{ W/mK}$
Steel	$\sigma = 4 \cdot 10^6\text{ S/m}$
	$\alpha = 0.005\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	$\mu_r = 300$
	$k = 56\text{ W/mK}$
Air	Properties from COMSOL library

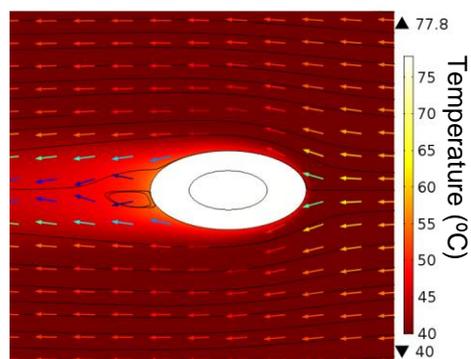
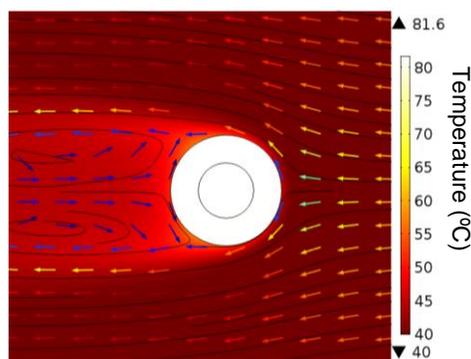


Figure 4. Temperature and wind velocity field for $SF = 1$ (up) and $SF = 1.4$ (down) ($V_{in} = 1\text{ m/s}$ and $I_0 = 750\text{ A}$).

4.1 Influence of SF and I_0

For a wind velocity of 1 m/s, Figure 5 shows the influence of SF and I_0 on the maximum temperature achieved in the power conductor. As can be observed, the temperature decreases with SF for a given current, being more interesting to use a power conductor with an elliptical shape with $SF > 1$. It is also observed that the

difference in the maximum temperature for $SF = 0.5$ and $SF = 1.5$ is of about $10\text{ }^\circ\text{C}$.

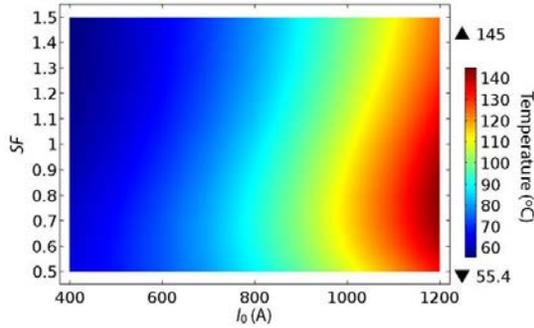


Figure 5. Evolution of the maximum temperature with SF and I_0 .

As a consequence, the current-carrying capacity may be improved if a suitable SF is employed. For example, if the maximum temperature allowed by the power conductor is $90\text{ }^\circ\text{C}$, then 825 A can flow through it for $SF = 1$, while for $SF = 1.4$ it can be increased up to 900 A , about 9% higher for the values of θ_{amb} and V_{in} considered.

4.2 Influence of power conductor cross section

Another aspect to take into account is the size of the power conductor. In this sense, the following analysis is developed for conductor cross sections (S_c) from 300 mm^2 to 600 mm^2 , considering a fixed current density flowing through the conductor of about 2.15 A/mm^2 . In addition, wind velocity is of 1 m/s at $20\text{ }^\circ\text{C}$. In this situation, Figure 6 shows the influence of the conductor cross section and its shape (SF) on its maximum temperature.

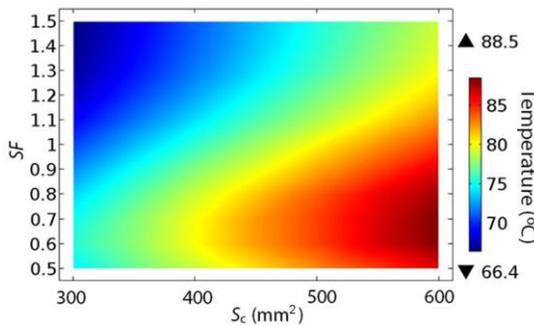


Figure 6. Evolution of the maximum temperature with conductor cross section (S_c) and SF .

From this figure it is derived that conductors with elliptical shape with $SF > 1$ are the best choice once again, since they achieve a lower temperature for a given cross section. In this sense, for a given cross section, the improvement achieved on the temperature when changing from $SF = 1$ to $SF = 1.5$ is of about $5\text{ }^\circ\text{C}$. However, for higher cross sections it is also observed a higher temperature due to the increase of the power losses.

4.3 Influence of wind velocity

In this case, for a current through the power conductor of about 1100 A , the evolution of the maximum temperature is shown in Figure 7. It is easily observed how a greater SF leads to lower temperatures, as concluded also in the previous sections, being more interesting the cases obtained with $SF > 1$ again.

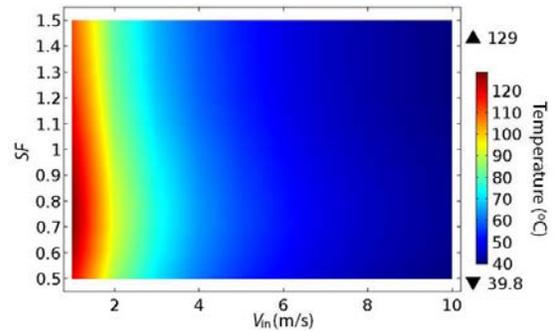


Figure 7. Evolution of the maximum temperature with wind velocity and SF ($I_0 = 1100\text{ A}$ and $\theta_{amb} = 20\text{ }^\circ\text{C}$).

Table 2: Influence of wind velocity for $\theta_{amb} = 20\text{ }^\circ\text{C}$

		V_{in}		
		1 m/s	2 m/s	3 m/s
SF	1	123 °C	88 °C	71 °C
	1.4	112 °C	81 °C	67 °C
$\Delta\theta$		11 °C	7 °C	4 °C

On the other hand, it is also concluded that, for any value of SF , the temperature decreases with wind velocity (as expected). However, it decreases more drastically in the range of 1 m/s

to 3 m/s, while for higher velocity values its effect is less important. This is also represented in Table 2, where it is shown the difference ($\Delta\theta$) in the maximum temperature achieved by the power conductor for different wind velocities and SF values (for $\theta_{amb} = 20^\circ\text{C}$).

4.4 Influence of wind temperature

Another aspect to take into account is the air temperature θ_{amb} . If the air temperature is increased up to 40°C , results are different, as shown in Figure 8, where it can be observed how the maximum temperature is increased as expected.

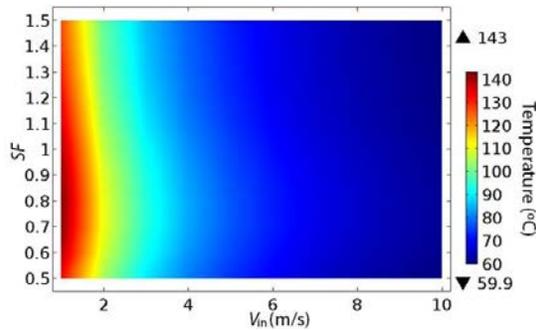


Figure 8. Evolution of the maximum temperature with wind velocity and SF ($I_0 = 1100\text{ A}$ and $\theta_{amb} = 40^\circ\text{C}$).

In this situation, the heat evacuated by convection decreases due to a higher air temperature. Nonetheless, Figure 8 provides similar conclusions as those obtained in the previous section, since it is again observed how the reduction on the conductor's temperature is higher for lower wind velocities, concluding that elliptical shapes are more efficient for low wind velocity conditions.

4.5 Influence of wind direction

In all the previous simulations, the direction in which the wind blows was considered parallel to the horizontal axis. But there may be situations where this is not true, since wind may have different angles of incidence in time. A situation like that is shown in Figure 9, where wind direction has an angle of incidence of about 30° .

It is clear that wind direction may influence on the maximum temperature achieved on the

power conductor, and this is analyzed in Figure 10 for different values of SF and $I_0 = 900\text{ A}$. From this figure it is easily concluded once again that elliptical conductors with $SF > 1$ achieve lower temperature values for any wind direction.

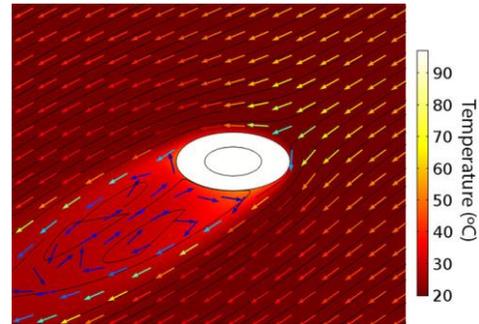


Figure 9. Temperature and wind velocity field for $SF = 1.4$ and angle of incidence of 30° ($V_{in} = 1\text{ m/s}$, $\theta_{amb} = 20^\circ\text{C}$ and $I_0 = 900\text{ A}$).

However, it is also observed that the angle of incidence may affect negatively to the temperature of the power conductor if it changes from the horizontal wind direction case (angle of incidence of 0°). In particular, Figure 10 shows that, for $SF > 1.2$, the temperature of the power conductor may be increased in about 2°C when the angle of incidence changes from 0° to $\pm 15^\circ$. Furthermore, if this angle reaches values in the order of 30° , the increase on the temperature is up to 7°C . Nonetheless, even in this unfavorable situation, the temperature in the elliptical conductor would be the same as the circular conductor at most.

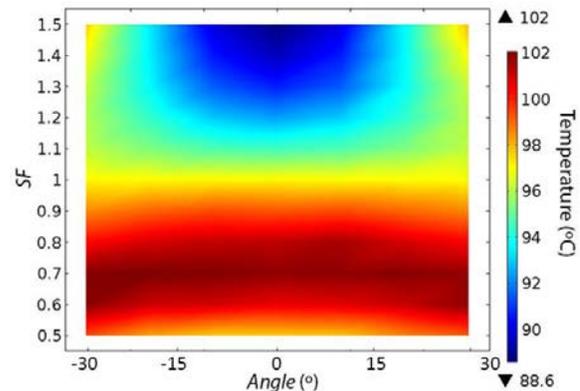


Figure 10. Evolution of the maximum temperature with the angle of incidence and SF ($\theta_{amb} = 20^\circ\text{C}$).

5. Conclusions

This work analyzes the influence of overhead power conductor's shape on its temperature when it is exposed to solar heating, radiation and forced convection. The complexity of the system requires the utilization of a powerful tool like COMSOL Multiphysics®. In this sense, a complete finite element model has been developed, where electromagnetic, thermal and fluid dynamics physics are fully coupled.

From this study it is concluded that overhead power conductors may increase their current carrying capacity if they have an elliptical shape instead of a circular one. This increase may be in the range of 9% depending on the environmental conditions. In this sense, a parametric analysis has been also performed in order to show the influence of different geometrical and environmental parameters on the conductor's temperature. From this parametric analysis it is derived that the temperature of power conductors with elliptical shape is less sensitive to changes on the environmental conditions than the circular conductor, with the exception of the wind direction. This parameter influences negatively the temperature of the elliptical conductor, but this is only when it ranges from 0° to 30°. In the worst of these cases the temperature would achieve that of the circular conductor at most.

As a consequence of this study, future studies will be developed in order to check these results on actual stranded conductors as a preliminary step before experimental experiences.

6. References

1. T. Saito, Spiral-elliptic conductor with low-drag coefficient, *PES winter meeting*, 2000, Seattle.
2. CIGRÉ WG B2.43, Guide for Thermal Rating Calculation of Overhead Lines with high temperatures and real-time weather & load data, *Technical Report*, Draft 3.0 (2012).
3. L. Conti, A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **Volume 24**, page 578-596 (2014).

4. I. Makhkamova, *Numerical Investigations of the Thermal State of Overhead Lines and Underground Cables in Distribution Network*, Durham theses, Durham University (2011). Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/866/>.

5. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*, Version: October 2014 COMSOL 5.0.

6. *COMSOL Heat Transfer Module User's Guide* Version: October 2014 COMSOL 5.0.

7. *COMSOL AC/DC Module User's Guide* Version: October 2014 COMSOL 5.0.

8. *COMSOL CFD Module User's Guide* Version: October 2014 COMSOL 5.0.

7. Acknowledgements

This work has been supported by the Spanish Ministry of Science & Innovation under grant ENE2013-48428-C2-1-R.



Novel conductor design to increase the thermal rating of overhead lines

J.C. del-Pino-López, D. Garrido-García, P. Cruz-Romero and A. Gómez-Expósito

Department of Electrical Engineering
Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla (Spain)
Phone/Fax number:+0034 954552847, e-mail: vaisat@us.es

Abstract. In this paper the performance of existing and novel designs of overhead bare conductors with regard to their capacity to evacuate the heat generated by ohmic losses is compared. The effect of the wire diameter of strands and the external shape of the conductor on the convective heat transfer capacity are evaluated, concluding that a horizontal-elliptical shape with a smooth surface can reduce the conductor highest temperature by several degrees, with an exact value depending on the wind speed and current through the conductor.

Key words

Overhead conductor, ampacity, temperature, forced convection, radiation.

1. Introduction

The thermal rating of overhead line bare conductors is limited by either the minimum clearance above ground, as required by specific technical regulation, or the creep process, which accelerates with temperature. The vast majority of HV overhead lines and the shortest EHV lines have their transmission capacity thermally limited, so different techniques have been developed to uprate them, like dynamic line rating (DLR) [1], re-conductoring with low-sag conductors [2], and re-tensioning.

One of the ambient parameters that critically affect the conductor temperature is the wind velocity through the forced convection process [3]. This circumstance is opening the possibility to develop DLR tailored to the evacuation lines of wind farms, where an increase of power is correlated with a higher wind velocity [4].

The forced convection is not only affected by the wind speed, but also by the surface and shape of the conductor, so that a favourable conductor design could increase the heat evacuated by forced convection.

In this paper, we continue the research started in [5] with the aim of designing new overhead conductors that have a better convective heat transfer performance. The problem involved includes three coupled physics phenomena: electromagnetic, thermal, and fluid dynamics. To solve this problem, a good choice is to resort to multi-physics

software like COMSOL [6], in order to compute the temperature inside the conductor with enough accuracy.

The use of conductor shapes other than circular has been proposed previously, not for the purpose of increasing the ampacity, but to reduce the wind load on the conductor [7].

The paper is structured as follows. In section 2 the multi-physics problem is formulated. Section 3 analyses the effect of the outermost layer design for a particular conductor. In section 4 the effect of the conductor shape is studied. Finally, in section 5 the conclusions are presented.

2. Problem definition

In the following, the main hypotheses considered, as well as the mathematical models to be solved, are described [8].

A. Electromagnetic problem

To compute the heat dissipated in the power conductor for a given current, the electromagnetic problem needs to be solved. Its value is the heat input for the thermal problem. To this aim the following assumptions are considered:

- 1) The power conductor is straight and infinitely long.
- 2) The phase current is sinusoidal with 50 Hz of frequency.
- 3) All materials have constant electrical properties, with the exception of conductive materials, whose electrical conductivity $\sigma(\theta)$ depends on temperature:

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(\theta - 20)}, \quad (1)$$

where θ is the unknown temperature and σ_0 and α are the conductivity and the temperature coefficient of the material at 20 °C, respectively.

- 4) Ferromagnetic materials are supposed to have constant permeability (μ).
- 5) Magnetics losses in ferromagnetic materials are neglected.

In this situation, the equation to be solved can be described as

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J}_e, \quad (2)$$

being \vec{A} the magnetic vector potential, ω the angular frequency and \vec{J}_e the external current density.

Once the problem is solved, the power losses generated in the conductor (Q_l) can be calculated from the total current density \vec{J} as

$$Q_l = \int \frac{\vec{J} \cdot \vec{J}^*}{\sigma} dS. \quad (3)$$

B. Thermal problem

The thermal problem is solved by considering the following assumptions:

- 1) Since the power cable is straight and infinitely long, the heat transfer problem can be formulated in 2D on the x - y plane.
- 2) All materials have constant thermal properties.
- 3) The air temperature is known (θ_{amb}).
- 4) Heat radiation (Q_{rad}) is present between the outer cable surface and the surrounding environment, with known surface emissivity (ε) of the materials.
- 5) Solar heating is present and it is considered as a known heat source input (Q_s).
- 6) Heat dissipation by forced convection is also considered (Q_{conv}).
- 7) Wind velocity is known and perpendicular to the power conductor, so that the system remains in 2D.

In consequence, the temperature of the power conductor can be derived from the associated steady-state heat balance equation, expressed as

$$Q_l + Q_s = Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (4)$$

where steady-state heat conduction inside the conductor is given by

$$\nabla \cdot (k\nabla\theta) + Q_l = 0, \quad (5)$$

the radiation heat loss is derived from

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta^4 - \theta_{amb}^4), \quad (6)$$

and the heat dissipated by forced convection is obtained from

$$\rho C_p u \cdot \nabla\theta = \nabla \cdot (k\nabla\theta), \quad (7)$$

being ρ the air density, C_p the heat capacity of air, u the air velocity vector, θ the unknown temperature, σ the Stefan-Boltzmann constant, and k the thermal conductivity of each material.

Since there are temperature-sensitive properties, such as the electrical conductivity of the conductor, the coupled electromagnetic-thermal problem is iteratively solved.

Hence, these parameters are continuously corrected for the newly calculated temperature.

C. Fluid dynamics problem

For the computation of the heat transferred by forced convection, the air velocity field u around the conductor is required. This involves the computation of the continuity and momentum equations (Navier-Stokes equations) that govern the fluid flow, in the form of

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (8)$$

$$\rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)), \quad (9)$$

where p and μ are the air pressure and viscosity, respectively. Since air properties are temperature dependent also, the fully coupled problem must be solved employing iterative techniques. As wind velocity ranges from 0.5 m/s to 10 m/s, a k - ε turbulence model was considered.

3. Effect of the outermost layer design

The case of the ACSR round conductor with 400 mm² Al and 25 mm² St is analyzed next, where the properties of the materials are included in Table I. Regarding the boundary conditions, the temperature of the air is taken as $\theta_{amb} = 20$ °C, for a wind velocity (V_{in}) ranging from 0.5 m/s to 10 m/s (wind blowing in the horizontal direction). The heat input caused by solar radiation is taken as $Q_s = 800$ W/m². Finally, the current through the conductor (I_0) will vary from 600 A to 1300 A.

Table I. – Material properties.

Material	Property
Aluminium (Al)	$\sigma_0 = 3.77 \cdot 10^7$ S/m $\alpha = 0.00403$ °C ⁻¹ $\mu_r = 1$ $k = 240$ W/mK $\varepsilon = 0.8$
Steel (St)	$\sigma_0 = 4 \cdot 10^6$ S/m $\alpha = 0.005$ °C ⁻¹ $\mu_r = 300$ $k = 56$ W/mK
Air	Properties from COMSOL library

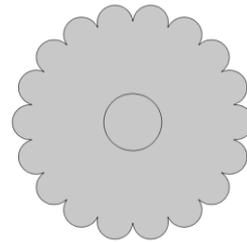


Fig 1. Geometry of the conductor.

For the sake of simplicity, the geometry of the power conductor has been simplified, as shown in Fig. 1 [9]. Since Al and St strands are all in contact, the temperature

inside the conductor is quite uniform. As a consequence, strands are taken into account to model the surface of the conductor only. Also, the steel reinforcement is assumed to have circular cross section.

In this situation, for a given current (750 A) and wind velocity (1 m/s), the temperature and velocity fields around the conductor are shown in Fig. 2.

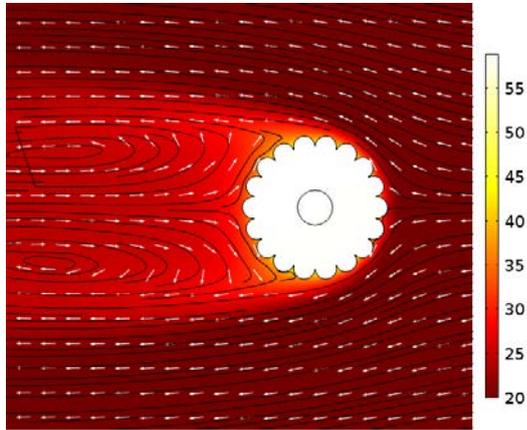


Fig. 2. Temperature (in °C) and velocity fields around the conductor (current of 750 A and wind velocity of 1 m/s).

Regarding the strands, their dimension may have a strong influence on the heat transfer mechanisms present in this model. In particular, depending on their diameter, the surface exposed to radiation, convection and solar heating is different, and so the heat evacuated from the conductor. In this sense, Fig. 3 shows the evolution of the maximum temperature obtained in the conductor as a function of strand diameter and wind velocity.

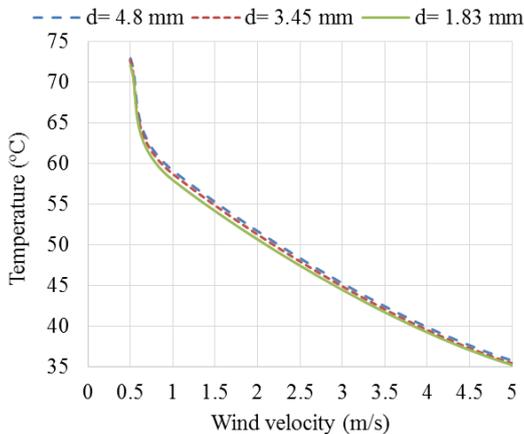


Fig. 3. Influence of Al strands diameter in the maximum temperature of the conductor for different wind velocities (current of 750 A).

As can be observed, for a given wind velocity, the temperature of the conductor may be more than 1 °C higher when using strands of 4.8 mm instead of 1.83 mm, although this behaviour is more important for wind velocities in the range of 1 – 2 m/s. This is more detailed in Fig. 4 for a wind velocity of 1 m/s. The figure shows that reducing the strand diameter leads to lower temperatures, where the limit is that obtained when considering a perfect circular conductor (Fig. 5).

Nonetheless, it may be of interest to analyze different shapes for the conductor in order to improve the heat evacuation. In this sense, the use of elliptical conductors [7] can provide interesting results as reported in [5].

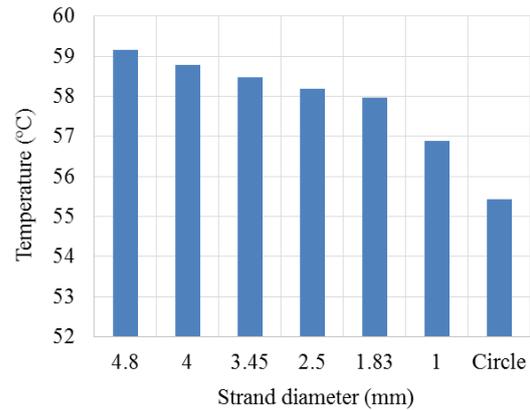


Fig. 4. Maximum temperature for different strands and the ideal case (current of 750 A and wind velocity of 1 m/s).

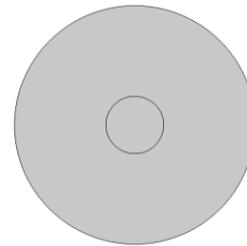


Fig. 5. Perfect circular conductor.

4. Effect of conductor shape

As it was considered in the circular conductor, the geometry of the elliptical conductor is also simplified, only considering the strands to model the surface of the conductor. This way, Fig. 6 shows the temperature and velocity fields around an elliptical conductor (major axis-to-minor axis ratio of 1.4) of the same Al and St sections and the same current and wind velocity than in Fig. 2.

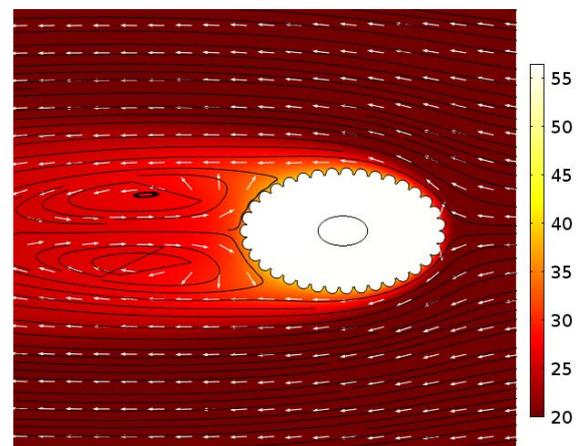


Fig. 6. Temperature (in °C) and velocity fields around the elliptical conductor (current of 750 A and wind velocity of 1 m/s).

In [5], two possibilities were presented in relation with the position of the elliptical conductor, horizontal and vertical, as shown in Fig. 7, where the horizontal conductor showed to have less temperature for the same current flowing through the conductor. This is shown in Fig. 8, where “Ideal” denotes smooth circular or elliptical shape.

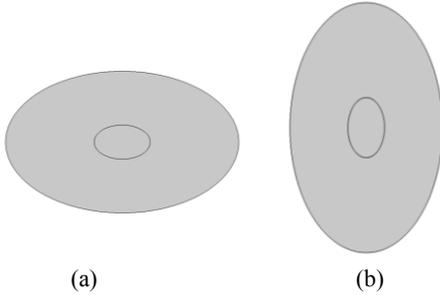


Fig. 7. Simplified geometry of horizontal (a) and vertical (b) elliptical conductor.

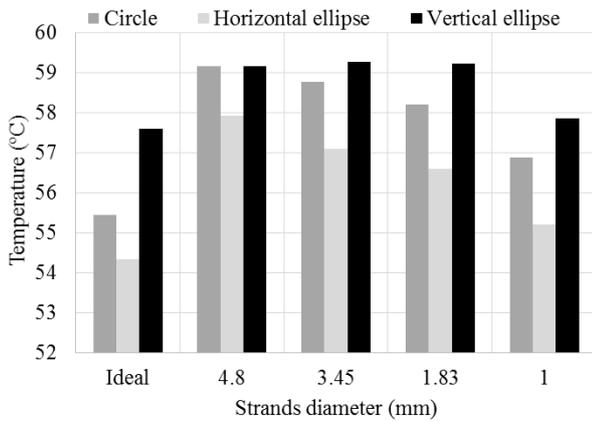


Fig. 8. Maximum temperature for different strands diameter in circular and elliptical conductors (current of 750 A and wind velocity of 1 m/s)

As can be observed, the horizontal-elliptical conductor can provide lower temperature than the circular conductor for the “Ideal” case, while the temperature in the vertical one is much higher. This behavior is also observed even for “non-perfect” surfaces composed by strands of different diameters. As commented previously, the use of thinner strands leads to lower temperatures, where the limit is that of the “Ideal” situation. For the particular case of the horizontal-elliptical conductor, this is also shown in Fig. 9, where it is depicted the evolution of the maximum temperature of the conductor as a function of strand diameter and wind velocity. Again, for a given wind velocity, the temperature of the conductor may be about 1.4 °C higher when using strands of 4.8 mm instead of 1.83 mm. However this effect is only interesting for wind velocities in the range of 1-2 m/s.

On the other hand, it is of importance to analyze the influence of strand diameter, hence the surface design, on the heat evacuation for different load levels in the conductor. This is shown in Fig. 10, where it is easily concluded that thinner strands leads to a lower temperature specially for important load levels. In particular, for a wind velocity of 1 m/s (Fig. 10a), the difference between using strands of 4.8 mm and 1.83 mm is in the range of 5.3 °C

for a current of 1300 A. However, this behaviour is less important when wind speed increases. In this sense, for a wind velocity of 5 m/s (Fig. 10b) the differences decreases up to 1.7 °C for the range of strands diameter considered. In addition, it has to be noticed that this effect starts to be insignificant for currents lower than 600 A for wind velocities in the range of 1 m/s, and 800 A in the case of wind velocities in the range of 5 m/s.

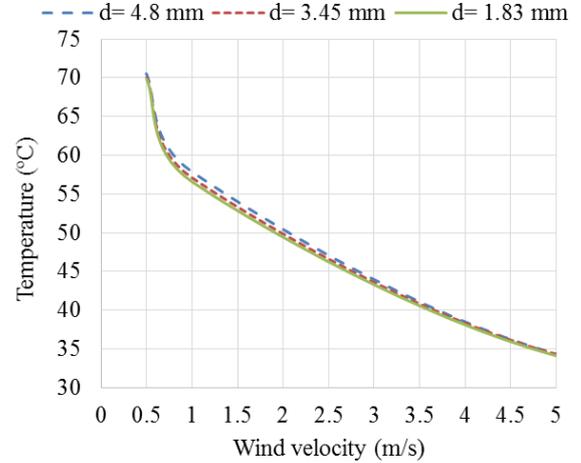
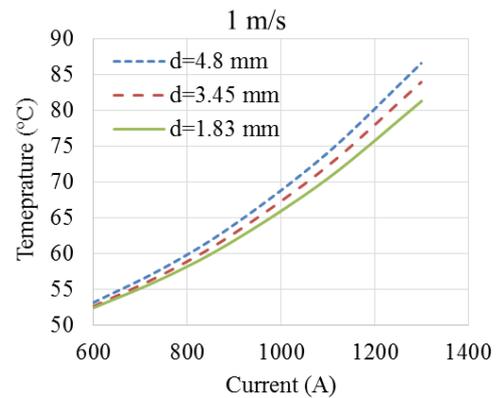
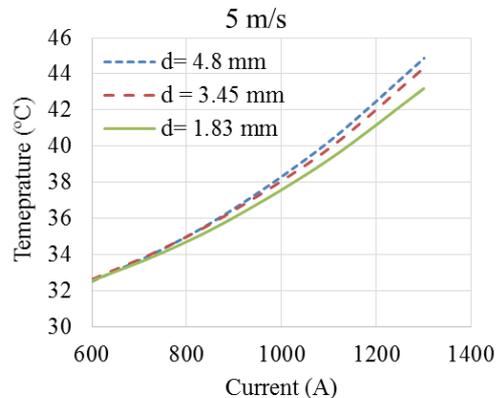


Fig. 9. Influence of Al strands diameter on the maximum temperature of the horizontal-elliptical conductor for different wind velocities (current of 750 A).



(a)



(b)

Fig. 10. Evolution of the temperature in the horizontal-elliptical conductor as a function of the strand diameter and flowing current for a wind velocity of 1 m/s (a) and 5 m/s (b).

Finally, the influence of the air temperature is also analyzed. The results are shown in Fig. 11 for a wind velocity of 1 m/s.

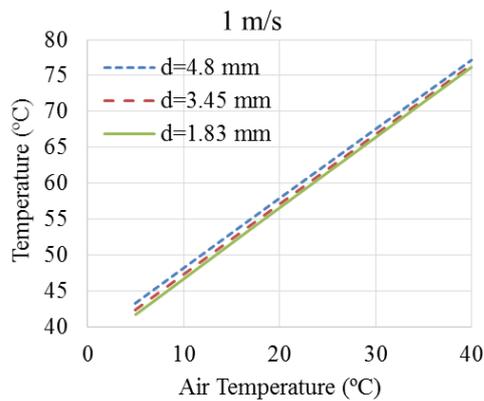


Fig. 11. Influence of the air temperature and the strand diameter on the temperature of the horizontal-elliptical conductor for a wind velocity of 1 m/s (current of 750 A).

From Fig. 11 it can be concluded that the air temperature has almost no influence in the variations of the heat evacuation derived from the use of thicker or thinner strands. In this sense, for the particular situation shown in Fig. 11, there is a difference of 1 °C when using strands of 4.8 mm instead of 1.93 mm for air temperature of 40 °C, and it increases up to 1.5 °C for air temperature of 20 °C. However, this is only noticeable for wind velocities in the order of 1 m/s, since the differences observed for higher values of wind velocities are lower than 0.3 °C.

5. Conclusions

Novel conductors have been proposed to improve the heat convection transfer with respect to the customary round-wire round-shape conductor. It is concluded that a smooth shape circular conductor reduces the highest temperature with respect to the round-wire round-shape one by around 3 °C (7 %) at a typical air velocity of 1 m/s, increasing accordingly the ampacity in around 2 %. However, this difference can be higher (reduction of 10 % in temperature and increase in around 6 % in ampacity) for smooth-surface horizontal-elliptical conductors. This type of conductor has also a better drag coefficient [7]. More research on other shapes will be carried out in the next future with the expectancy of increasing the convective performance.

Acknowledgement

This work has been supported by the Spanish Ministry of Science & Innovation under grant ENE2013-48428-C2-1-R.

References

- [1] A. Useros and S. Fernández, "More Capacity Allows More Renewables", *Transmission and Distribution World*, June 2015.
- [2] D. Johnson, "High-performance Conductor Means Much Greater Capacity", *Electricity Today*, September 2006.
- [3] WG. B2.12, "Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings", *Cigré TB 299*, 2006.
- [4] A. Bergstrom, U. Axelsson and V. Neimane, "Dynamic capacity rating for wind cooled overhead lines", in *Proc. CIRED*, pp. 1-5, Stockholm, June 2013.
- [5] J. C. del-Pino-López, D. Garrido-García, P. Cruz-Romero and A. Gómez-Expósito, "Influence of Overhead Power Conductor Shape on its Temperature", in *Proc. 2nd Iberian Comsol Conference*, Málaga, June 2015.
- [6] *COMSOL Multiphysics Reference Manual*, Version: October 2014 COMSOL 5.1.
- [7] T. Saito, Y. Hase, et. al., "Spiral-elliptic conductor with low-drag coefficient", in *Proc. Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 4, pp. 2397-2402, January 2000.
- [8] L. Konti, "A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Volume 24, pp. 578-596, 2014.
- [9] L. Chen, Z. Zheng, et. al., "Thermal grading around overhead transmission line under various environments and its influence to load capacity", in *Proc. International Symposium Electrical Insulation*, pp. 545-548, San Juan, June 2012.
- [10] IEC 62219:2002, "Overhead electrical conductors. Formed wire, concentric lay, stranded conductors".