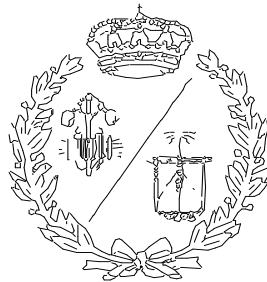


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**ANÁLISIS DINÁMICO DE LA AMPACIDAD
DE UNA LÍNEA AÉREA SOMETIDA A
MÚLTIPLES CONDICIONES AMBIENTALES**
(Dynamic analysis of the ampacity of a line
subjected to multiple environmental
conditions)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor: Juan José Arana Manuz

Julio - 2019

INDICE GENERAL

MOTIVACIONES	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	9
2. NORMATIVA	15
2.1 CIGRE TB601	15
2.1.1 Lista de símbolos	15
2.1.2 Equilibrio térmico en estado estacionario	17
2.1.3 Equilibrio térmico en estado no estacionario	17
2.1.4 Calentamiento debido al efecto Joule.....	18
2.1.5 Calentamiento debido al efecto magnético	18
2.1.6 Calentamiento debido a la radiación solar.....	19
2.1.7 Distribución de la temperatura en el conductor	19
2.1.8 Cálculo de la refrigeración por convección	21
2.1.9 Convección forzada	21
2.1.10 Turbulencia.....	22
2.1.13 Velocidades de viento bajas.....	23
2.1.14 Refrigeración debida a la radiación.....	23
2.2 IEEE 738	23
2.2.1 Lista de símbolos	23
2.2.2 Equilibrio térmico en estado estacionario	25
2.2.3 Equilibrio térmico en estado transitorio	25
2.2.4 Refrigeración por convección.....	25
2.2.5 Convección forzada	26
2.2.6 Convección natural.....	26
2.2.7 Refrigeración por radiación	26
2.2.8 Calentamiento por radiación solar.....	26
2.2.9 Resistencia eléctrica del conductor.....	27
2.2.10 Efecto pelicular.....	27
2.2.11 Calentamiento por intensidad.....	27
2.3 Otros procedimientos.....	28
2.3.1 CIGRE 299_ Guía para la selección de los parámetros ambientales en conductores aéreos desnudos.	28

2.3.2 CIGRE 498_Guía para la aplicación directa de sistemas de monitorización en tiempo real.....	30
2.4 Resumen.....	31
3. PROBLEMÁTICA DE LA NORMATIVA.....	32
3.1 CONDICIONES AMBIENTALES	32
3.2 MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL.....	32
3.3 LIMITACIONES DEL CONDUCTOR	34
3.4 CONCLUSIÓN	35
4. SISTEMAS DE ELEMENTOS FINITOS	36
4.1 ANSYS	37
4.2 ESCENARIO PRÁCTICO	38
4.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR.....	39
5. MODELO DE VALIDACIÓN.....	41
5.1 GEOMETRÍA	41
5.2 MALLADO	44
5.3 SIMULACIÓN.....	50
5.4 RESULTADOS.....	60
5.5 CONCLUSIÓN	68
6. SIMULACIÓN.....	69
6.1 DOS VOLÚMENES DE CONTROL	70
6.2 TRES VOLÚMENES DE CONTROL	76
7. RESULTADOS.....	79
7.1 SIMULACIÓN 1.....	79
7.2 SIMULACIÓN 2	85
7.3 SIMULACIÓN 3	90
7.4 SIMULACIÓN 4 (CASO EXTREMO).....	95
8. CONCLUSIONES	100
8.1 FUTURAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN.....	101
12. BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXO A_ Lista de figuras, gráficas y tablas	104

MOTIVACIONES

El equipo de investigación de la universidad en colaboración con empresas del sector, han observado que, con la implantación de la gestión dinámica de líneas aéreas, se va a producir un ahorro económico significativo en comparación a métodos utilizados para mejorar la capacidad de transporte de las líneas.

La normativa actual que recoge el método para calcular la ampacidad establece únicamente unas condiciones meteorológicas a lo largo de la longitud de la línea, esto ha supuesto un paso significativo con respecto a los métodos empleados anteriormente que tenían en cuenta límites estacionarios muy restrictivos, aun así, considerar unas únicas condiciones ambientales sobre el conductor es erróneo, ya que, en muchas ocasiones, a lo largo de la longitud del conductor se van a producir cambios en las condiciones a las que está sometido, y el comportamiento del conductor dependerá de estos cambios, esta situación hace que conocer el comportamiento que tendrá el conductor en las zonas donde se producen estos cambios sea muy importante ya que los límites de explotación de la línea estarán marcados por estos valores.

La importancia de estos cambios en las condiciones ambientales producidos en el conductor, es grande a la hora de determinar el número y ubicación de las estaciones meteorológicas que se establecerán a lo largo de la línea, ya que, estas serán las encargadas de proporcionar los datos y conocer los cambios que se producen es el punto clave a la hora de calcular la ampacidad de la línea.

Es por la importancia de conocer el comportamiento y la reacción del conductor ante estos cambios de las condiciones meteorológicas por lo que el objetivo final de este trabajo es la determinación de una metodología que permita llevar a cabo la explotación dinámica de una línea que se ve sometida a cambios en las condiciones meteorológicas a lo largo de la longitud total del conductor.

RESUMEN

El aumento de los parques de energía eólica que se ha producido en España en los últimos años ha introducido el problema de poder evacuar toda la generación producida en estos parques hacia los puntos de consumo. En muchas ocasiones, estos parques se sitúan en lugares alejados y su generación debe acoplarse a la infraestructura existente, ya que la construcción de líneas es un proceso muy costoso económicamente y que se puede demorar mucho en el tiempo debido a los estudios ambientales.

Una de las características principales de los lugares en los que se emplazan las centrales eólicas es el viento que se produce en esas zonas, este viento ayuda enfriar la temperatura del conductor producida por la corriente que éste transporta, es por esto, que realizando un análisis dinámico de ampacidad en líneas aéreas se puede conseguir que la capacidad de transporte de las líneas aumente en gran medida, ya que los límites establecidos para las líneas aéreas, están delimitados por los casos más desfavorables, poco realistas.

La gestión dinámica de la ampacidad consiste en monitorizar las condiciones ambientales a las que se ve sometido el conductor (principalmente temperatura y viento), en tiempo real, para calcular así la capacidad de transporte de la línea en cada momento.

En la primera parte de este trabajo se expone la normativa que recoge como debe realizarse un análisis dinámico de la ampacidad de una línea, los dos documentos explicados en mayor profundidad son CIGRE TB601 e IEEE 738, ambos están basados en la ecuación de equilibrio térmico, en cuál dice que el calor proporcionado por las pérdidas Joule y la radiación solar es igual al calor disipado por convección y radiación, en estos dos métodos existe algún procedimiento que cambia a la hora de calcular algún término de la ecuación de equilibrio térmico, pero su forma de proceder es igual. Con respecto a la normativa, de una forma menos extensa se nombrará el procedimiento CIGRE 299 en el que se describe como emplear los datos relacionados con las condiciones ambientales y CIGRE 498 en el que se describen los procesos de monitorización en tiempo real, muy importantes a la hora de realizar un análisis dinámico.

A continuación, se van a explicar los principales problemas que tiene la normativa actual, entre ellos destaca que en estos documentos se supone que las condiciones ambientales a las que se ve sometido el conductor son constantes a lo largo de toda la línea, cosa que no es así y que en los siguientes puntos del trabajo se analizará el comportamiento del conductor en los puntos en que estas condiciones cambian, también se presta atención a la monitorización en tiempo real, ya que no solo es necesario tener los datos actualizados en cada momento, si no que el operario de red debe tener predicciones meteorológicas con algo de antelación para poder operar la red y estas predicciones son un campo en el que se pueden realizar investigaciones, por último se habla de las limitaciones del conductor, ya que este no puede operar a la temperatura que se desee, el conductor empleado para la realización de las simulaciones posteriores tiene una temperatura máxima de servicio de 85°C en servicio continuo que no puede ser superada para que el conductor mantenga sus propiedades.

Una vez expuestos los problemas de la normativa se realiza un modelo de validación en un programa que utiliza el método de los elementos finitos, este modelo de validación se realiza para comprobar que el modelo creado proporciona unos resultados reales y lo suficiente cercanos a la realidad como para poder analizarlos y sacar conclusiones. Para realizar este modelo se va a simular las condiciones ambientales a las que se ve sometido un conductor, las

condiciones ambientales introducidas son datos reales de estaciones meteorológicas situadas a lo largo de la longitud de una línea aérea. Se han realizado tres simulaciones distintas en este modelo, una con una temperatura del conductor baja, una temperatura del conductor media y una temperatura del conductor alta, los resultados de estas simulaciones muestran que en la simulación con temperatura baja que corresponde a una velocidad baja de viento, la temperatura es algo mayor a la real, mientras que en las otras dos simulaciones es algo mayor, pero las tres simulaciones presentan valores cercanos a los valores reales obtenidos de las estaciones meteorológicas.

Por último, se procede a la simulación final, en la que se estudiará el comportamiento del conductor cuando es sometido a diferentes condiciones ambientales. Se van a realizar cuatro simulaciones distintas, en cada una de ellas habrá dos tipos, en la primera solo se representarán las dos condiciones ambientales, cuyos datos son conocidos, mientras que en la segunda se representarán tres condiciones ambientales, dos de ellas son conocidas y entre las dos se representarán las condiciones ambientales con valores intermedios de las otras dos para que las condiciones a las que se ve sometido el conductor no cambien bruscamente, si no de una forma más gradual, de manera que simule de manera más realista lo que ocurre en la realidad.

Los resultados obtenidos de estas simulaciones muestran que, cuando se produce un cambio en las condiciones a las que se ve sometido el conductor, la temperatura de éste muestra un gradiente, aunque se trate de un material conductor del calor vamos a encontrar diferencias de temperatura en las distintas zonas del conductor, y la temperatura no va a ser homogénea a lo largo de toda la longitud de la línea. Cuando solo se representan dos condiciones ambientales diferentes el cambio de temperatura en el conductor se presenta en una superficie más pequeña, mientras que cuando se representa con tres condiciones diferentes este de temperatura se lleva a cabo en una superficie mayor, aun así la diferencia de temperatura que presenta el conductor es prácticamente idéntica en las dos simulaciones.

Estos resultados muestran la importancia de elegir el emplazamiento de las estaciones meteorológicas situadas a lo largo de la longitud de la línea, ya que, si existiese algún punto en el que la temperatura cambie y los datos de esa zona no estén registrados en ninguna estación meteorológica, a la hora de calcular la ampacidad de la línea podrían existir casos en los que se superase la capacidad de transporte de la línea, pudiendo incluso, llegar a producir fallos en la línea.

ABSTRACT

The increase in the wind energy that has occurred in Spain in recent years has solved the problem of being able to evacuate all the generation produced in these places towards consumption points. In many occasions, these places are located in remote places and their generation must be coupled to the existing infrastructure, the construction of new lines is a very costly process and can be delayed a lot in time due to environmental studies.

One of the main characteristics of the places where the wind power plants are located, is the wind, this wind helps to cool the temperature of the conductor produced by the current it transports, that is why, performing a dynamic análisis of the capacity of airlines can lead to an

increase in the transport capacity of the lines, because the limits established for airlines are limited by the most unfavorable cases, that are unrealistic.

The dynamic management of the ampacity consists of monitoring the environmental conditions to which the line is subjected (mainly temperature and wind), in real time, in order to calculate the transport capacity of the line at all times.

In the first part of this paper will be exposed the regulations that include how to perform a dynamic analysis of the ampacity of a line, the two documents explained in, are CIGRE TB601 and IEEE 738, both are based on the equation of thermal equilibrium, in which it says that the heat provided by the Joule losses and the solar radiation is equal to the heat dissipated by convection and radiation, in these two methods there are some procedure that changes when you calculate some term of the thermal equilibrium equation, but, at least, is the same. Regarding the regulations, in a less extensive way, the CIGRE 299, which it is described how to use the data related to the environmental conditions and CIGRE 498, which the real-time monitoring processes are described, very important to when performing a dynamic analysis.

Next, they will explain the main problems that the current regulations have, including that in these documents it is assumed that the environmental conditions to which the line is subjected are constant along the entire line, something that is not real and that in the following points of the work will analyze the behavior of the line in the points where these conditions change. Attention is also paid to monitoring in real time, since not only is it necessary to have the data updated at all times, if not that the network operator must have weather forecasts with some advance to operate the network and these predictions are a field in which research can be conducted, finally speaking of the limitations of the line, as this can not operate at the desired temperature, the conductor used for the performance of the subsequent simulations has a maximum operating temperature of 85°C in continuous service that can not be surpassed for the driver to maintain his properties.

Later we do a validation model, this validation model is made in a program that uses the finite elements method, this validation model is carried out to verify that the created model provides real results and is close enough to reality to be able to analyze them and draw conclusions. The environmental conditions introduced are real data of meteorological stations located along the length of an airline. Three different simulations have been carried out in this model, one with a low conductor temperature, a medium conductor temperature and a high conductor temperature, the results of these simulations show that in the simulation with low temperature corresponding to a low magnitude of wind, the temperature is somewhat higher than the real one, while in the other two simulations it is somewhat higher, but the three simulations present values close to the real values obtained from the weather stations.

Finally, we proceed to the final simulation, which will study the behavior of the conductor when there are different environmental conditions. Four different simulations will be carried out, in each of them there will be two types, in the first one only the two environmental conditions will be represented, whose data are known, while in the second three environmental conditions will be represented, two of them are known and between the two environmental conditions will be represented another situation with intermediate values of the other two so that the conditions to which the conductor is subjected do not change abruptly, if not in a more gradual way, in a way that simulates more realistically what happens in the real life.

The results obtained from these simulations show that when there is a change in the conditions to which the conductor is subjected, the temperature of the conductor shows a gradient, even if it is a heat conducting material, we will find differences in temperature in the different areas of the conductor, and the temperature will not be homogeneous along the entire length of the line. When only two different environmental conditions are represented, the change in temperature in the conductor occurs in a smaller surface, whereas when it is represented with three different conditions this temperature is carried out in a larger area, even so the difference in temperature of the conductor is practically identical in the two types of simulations.

These results show the importance of choosing the location of the meteorological stations along the length of the line, since, if there is any point where the temperature changes and the data of that area are not recorded in any weather station, when calculating the ampacity of the line, there could be cases in which the transport capacity of the line is exceeded, and it can even lead to failures in the line.

1. INTRODUCCIÓN

El término ampacidad se define como la máxima corriente que es capaz de transportar un conductor en unas condiciones ambientales de operación determinadas.

La gestión dinámica de la ampacidad consiste en monitorizar las condiciones ambientales a las que se ve sometido el conductor (principalmente temperatura y viento), para calcular así la capacidad de transporte de la línea en cada momento (ampacidad).

El objetivo final de este trabajo es desarrollar una metodología que permita llevar a cabo una explotación dinámica de una línea que se ve sometida a distintas condiciones meteorológicas a lo largo de su trazado.

El fundamento teórico de la ampacidad se basa en la ecuación de equilibrio térmico, ya que el calor generado en cada momento en el conductor debe ser igual al disipado. Los cables que se utilizan en las redes aéreas suelen ser conductores desnudos con estructura concéntrica formada por un alma de acero que proporciona consistencia mecánica al cable y capas externas de aluminio que son los encargados de conducir la corriente eléctrica. En la Figura 1.1 se puede observar la composición de un conductor de este tipo:

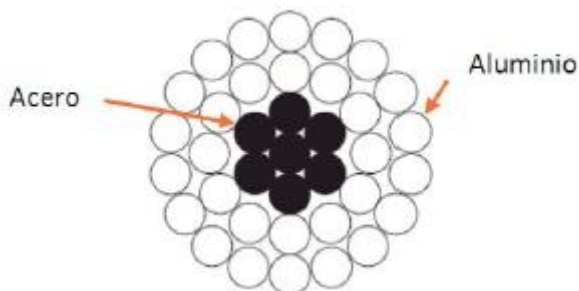


Figura 1.1 Estructura de un conductor

Según datos de REE, España, en 2018 contaba con una potencia instalada de 10 GW, en estos últimos años se han ido desarrollando e instalando energías renovables, en concreto, la eólica se coloca como principal fuente de energía renovable empleada en España con el 23.1% de la potencia instalada, seguida, en un porcentaje mucho menor de la solar fotovoltaica, 4.5%, solar térmica con un 2.3% y por último, otras renovables con un 0.9%. En total, forman un 30.9% de la potencia instalada, un porcentaje bastante significativo del total.

La tabla 1.1 muestra la potencia eléctrica instalada en España en MW desde el año 2016 hasta el año 2019, en este periodo de tiempo, el incremento de la potencia eólica instalada no ha sido muy grande, pero esta fuente se sitúa en segundo lugar, únicamente por detrás de las centrales de ciclo combinado.

Potencia Instalada Nacional (MW)	2016	2017	2018	2019
Hidráulica convencional y mixta	17033	17030	17049	17049
Bombeo puro	3329	3329	3329	3329
Hidráulica	20362	20359	20378	20378
Nuclear	7573	7117	7117	7117
Carbón	10004	10004	10030	9683

Fuel + Gas	2490	2490	2490	2503
Ciclo combinado	26670	26670	26284	26284
Hidroeólica	11	11	11	11
Resto hidráulica	-	-	-	-
Eólica	23050	23130	23507	23605
Solar fotovoltaica	4686	4688	4714	4869
Solar térmica	2304	2304	2304	2304
Térmica renovable/Otras renovables	858	860	865	876
Térmica no renovable/Cogeneración	5979	5814	5741	5705
Residuos no renovables	497	497	491	491
Residuos renovables	162	162	162	162
Total	104647	104108	104094	103988

Tabla 1.1 Potencia eléctrica instalada en España

En estos últimos años ha existido un crecimiento de la capacidad de generación gracias a la implantación de las energías renovables, pero no ha sido acompañado de un crecimiento de la capacidad de las infraestructuras de transporte y distribución. Uno de los principales problemas que surgen a causa de esto, es la evacuación de los parques eólicos, ya que, dentro de las energías renovables son los que han experimentado un mayor crecimiento.

Para lograr el incremento de la capacidad de transporte, existen tres vías distintas:

- Instalación de nuevas infraestructuras de transporte, esta vía es la más costosa de las tres, tanto económicamente como con relación al tiempo empleado para realizarla. Para llevarla a cabo requiere del desarrollo de estudios de impacto ambiental, lo que se resume en largos periodos de tiempo para su aprobación. Además, en muchos casos se trata de una opción inviable debido a restricciones medioambientales que imposibilitan la construcción de nuevas infraestructuras destinadas al transporte de energía eléctrica.
- Repotenciación de las infraestructuras existentes, se puede conseguir gracias al empleo de conductores de alta capacidad o al aumento de la tensión de evacuación. Este método es económicamente más viable que el anterior, y en la mayor parte de casos no hace falta volver a realizar nuevos estudios medioambientales. Su principal problema es que el aumento de capacidad de transporte obtenido es más limitado, además de la pérdida de disponibilidad de la infraestructura durante el periodo de ejecución.
- Empleo de técnicas dinámicas de explotación para aprovechar las condiciones ambientales existentes y poder optimizar la capacidad de transporte, de los tres métodos mencionados, se trata del más económico y es el que menos tiempo emplea en la instalación de la infraestructura existente, por lo que el tiempo que la línea estará sin uso se reduce notablemente.

La gestión dinámica está basada en la monitorización de la temperatura del conductor, mediante estaciones meteorológicas dispuestas a lo largo de toda su longitud, a tiempo real, que permiten maximizar su capacidad de evacuación, teniendo en cuenta tanto la capacidad de transporte que puede admitir el conductor y su temperatura máxima de funcionamiento, como la temperatura ambiente o la velocidad y dirección del viento. Este último es un parámetro muy importante en la gestión dinámica de las líneas de transporte conectadas a centrales eólicas, ya que para que estas centrales puedan producir electricidad, necesitan de la existencia de viento, lo que a su vez reduce la temperatura del conductor y permite transportar una mayor corriente.

Para poder llevar a cabo una explotación dinámica de una línea, no solo sirve con monitorizar la intensidad que transporta el conductor, también se deben controlar las condiciones atmosféricas en las que la línea está siendo explotada.

Una explotación dinámica de una línea se puede llevar a cabo de dos maneras distintas:

- Sistema directo, se debe monitorizar la temperatura del conductor de forma discreta o continua.
- Sistema indirecto, se debe monitorizar la intensidad que transporta el conductor y las variables atmosféricas (temperatura, radiación, magnitud del viento, etc.) y gracias a estas variables estimar la temperatura del conductor.

Antes de poder llevar a cabo este método, hay que realizar un estudio climático de la longitud de la línea en la que se desea implantar la gestión dinámica para conocer los puntos en los que se deberán colocar las estaciones meteorológicas que posteriormente, serán las encargadas de proporcionar los datos ambientales que afectan al conductor en tiempo real.

Estas estaciones meteorológicas deben alimentarse a través de un equipo de forma autónoma, ya sea gracias al uso de paneles solares como por pequeños aerogeneradores con baterías de ácido plomo.

A la hora de acondicionar una línea para su explotación dinámica, se debe realizar una fase de funcionamiento de la aparamenta para garantizar su correcto funcionamiento en condiciones en las que se supere la carga nominal estática de la línea. También es importante tener en cuenta el nivel de servidumbre de los vanos de la línea, ya que cuando aumente la temperatura a la que operan los conductores, aumenta la flecha del conductor, disminuyéndose a su vez la distancia entre el conductor y el terreno, en ningún momento se puede incumplir la distancia mínima reglamentaria entre el conductor y el terreno.

Por último, también se deben verificar los valores nominales de los transformadores y del resto de la aparamenta de protección para asegurar que todos estos pueden operar en la zona dinámica.

Uno de los puntos más importantes en el análisis dinámico de las líneas es la medida del conductor, para obtenerla, una sonda superficial se coloca en el conductor, por seguridad deberá estar aislada del apoyo.

Existen algunos casos en los que restricciones legales y medioambientales dificultan la creación de nuevas líneas eléctricas, esto implica que centrales nuevas, como pueden ser las eólicas, situadas en lugares remotos y emplazadas en grandes extensiones de terreno deban integrarse en la infraestructura existente. En algunas situaciones, esta infraestructura no va a poder asumir toda la capacidad de generación, por lo que estas plantas de generación estarán trabajando a una potencia inferior a la que fueron diseñadas, las principales causas por las que se producen estas limitaciones son la congestión en la evacuación de la generación, falta de estabilidad, potencia de cortocircuito, viabilidad de los balances de potencias o excedentes de generación no integrables en el sistema.

Una de las ventajas de la explotación dinámica de las líneas es que se realiza sobre todo para integrar las centrales eólicas, estas centrales generan electricidad cuando se dan unas condiciones meteorológicas determinadas, en concreto cuando existen velocidades de viento

altas, es una ventaja para las líneas en las que se quiere integrar esta técnica, ya que cuando el viento actúa sobre el conductor refrigera su temperatura, lo que va a permitir que la corriente que pueda circular por el conductor sea mayor a la que se calcula de forma tradicional teniendo en cuenta límites muy restrictivos.

Ante la imposibilidad de creación de nuevas líneas, se debe recurrir a la modificación de las líneas existentes. Una solución es volver a calcular el límite estático, tradicionalmente, se ha calculado de manera muy conservadora, situándose en los límites más desfavorables asegurando la seguridad, haciendo estas aproximaciones más realistas se puede aumentar en gran medida la capacidad de transporte de la línea.

La ampacidad está definida por las características del conductor, las condiciones meteorológicas y la situación de la línea. Cuando se supera la máxima temperatura admisible por el conductor, puede afectar a sus propiedades, y en algunos casos la elongación del conductor puede llegar a superar los límites de la distancia entre el conductor y el suelo establecidos en el reglamento. Para evitar este problema se pueden llevar a cabo distintas medidas correctoras:

- Retensionado de las líneas, utilizado principalmente en líneas antiguas, ya que es en este tipo de líneas dónde la flecha es el elemento limitante para realizar el aumento de capacidad.
- Cambio de conductores, actualmente existen multitud de conductores en el mercado, y conociendo las condiciones meteorológicas más desfavorables a las que van a estar sometidos y sus condiciones de operación se podrá elegir el conductor más adecuado que permita incrementar la capacidad de la línea.
- Métodos deterministas para el cálculo de los límites estáticos, se tienen en cuenta periodos de tiempo trimestrales, mensuales, día y noche, etc. Para realizar estos datos se deben conocer la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad y dirección del viento.
- Monitorización en tiempo real, se monitorizan las variables más importantes a la hora de calcular la ampacidad, temperatura del conductor, condiciones meteorológicas, etc. A continuación, se exponen las más importantes:
 1. Monitorización de condiciones meteorológicas, gracias a estaciones meteorológicas situadas a lo largo de la línea y a los datos de la intensidad que circula a través del conductor, se puede calcular la temperatura a la que va a estar sometido el conductor. Es en este punto dónde surge el primer problema, ya que hay que suponer que toda la línea está sometida a las mismas condiciones meteorológicas.
 2. Monitorización de la temperatura del conductor, se colocan sensores de medida en el conductor. Al igual que la monitorización de condiciones meteorológicas, supone que la temperatura medida en el punto del conductor se va a mantener constante a lo largo de toda la longitud de la línea.
 3. Monitorización de la tensión mecánica del conductor, otra forma de obtener la temperatura del conductor es gracias a las medidas de tensión del conductor (curvas de calibración de Temperatura-Tensión).
 4. Monitorización de la flecha del conductor, al igual que se puede monitorizar la tensión, se puede realizar el mismo cálculo con los datos de la flecha del conductor.

En el siguiente esquema se pueden ver los pasos que se deben seguir a la hora de realizar un análisis dinámico de una línea, como se van realizando mediciones de las condiciones meteorológicas durante un determinado periodo de tiempo t , y con esos datos además de guardarles en un histórico de datos de la línea se calcula la capacidad de transporte de la línea periódicamente.

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA AMPACID DE UNA LÍNEA SOMETIDA A MÚLTIPLES CONDICIONES AMBIENTALES

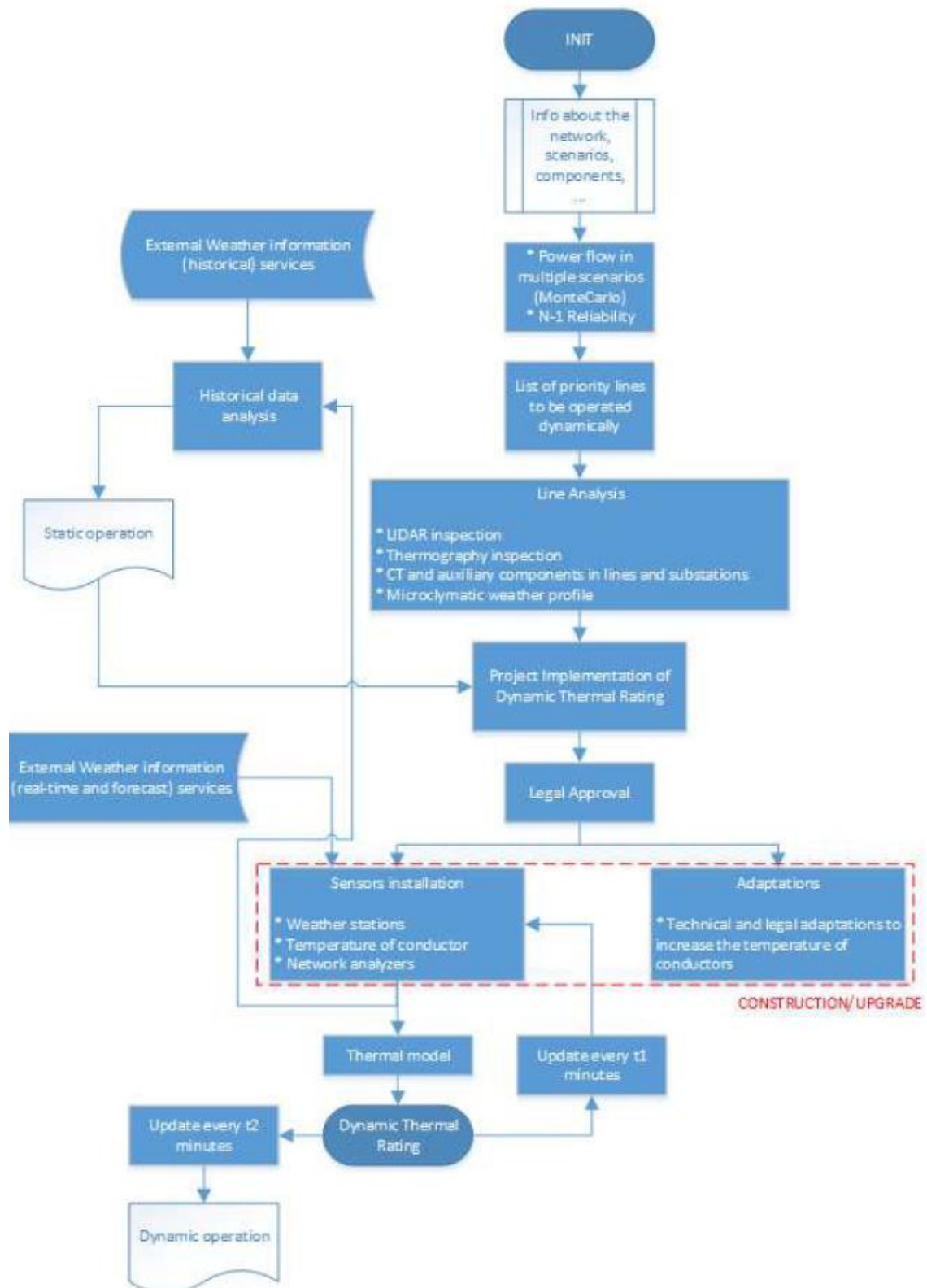


Figura 1.2 Esquema de un análisis dinámico de una línea

2. NORMATIVA

Los procedimientos utilizados para analizar el cálculo del comportamiento térmico de los conductores son IEE y CIGRE, ambos, utilizan una ecuación de equilibrio térmico en la que se integran los factores meteorológicos, la situación de la línea, la intensidad que circula por el conductor y las características del conductor.

2.1 CIGRE TB601

En concreto, es CIGRE TB601, el documento en el que mejor se explica cómo realizar los cálculos de la ampacidad de una línea. Esta guía surgió ya que en los últimos años se han empezado a tener en cuenta las variaciones de tiempo, corriente y temperatura y se han incorporado a los modelos térmicos de los conductores.

En el documento, se describen modelos numéricos y analíticos para el análisis en estado transitorio y estado estacionario de una línea. Concretamente, usa los datos ambientales en tiempo real y los datos de corriente con algoritmos para el cálculo de la temperatura del conductor, lo que permite maximizar los límites de la línea sin exceder su temperatura de diseño.

2.1.1 Lista de símbolos:

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Sección	m ²
B	Inducción magnética	T
C	Constante	-
c	Capacidad calorífica específica	J*kg ⁻¹ *K ⁻¹
D	Diámetro del círculo que rodea al conductor	m
D ₁	Diámetro del alma de acero	m
D _z	Diámetro medio de la capa del conductor	m
d	Diámetro de la capa exterior	m
d _a	Diámetro de la capa no ferrosa	m
d _s	Diámetro de la capa de acero	m
E	Campo eléctrico	V*m ⁻¹
F	Albedo	-
F	Factor de transferencia	-
f	Frecuencia	Hz
g	Aceleración de la gravedad (9.807)	m*s ⁻²
GMR	Radio medio geométrico	m
Gr	Número de Grashof	-
h _c	Coeficiente de transferencia de calor por convección	W*m ⁻² *K ⁻¹
H	Intensidad de campo magnético	A*m ⁻¹
H _s	Altitud solar	deg
I	Corriente efectiva	A
I _B	Intensidad de la radiación solar directa en la normal al haz solar	W*m ²
I _d	Intensidad de la radiación solar difusa en la superficie horizontal	W*m ²
I _T	Radiación solar	W*m ²
k _{sk}	Factor efecto pelicular	-
l _z	Longitud de los cables en la capa z	M
m	Masa por unidad de longitud	Kg*m ⁻¹

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA AMPACID DE UNA LÍNEA SOMETIDA A MÚLTIPLES CONDICIONES AMBIENTALES

n	constante	-
N*	Día del año	-
N _s	Relación de claridad	-
Nu	Número de Nusselt	-
P	Potencia intercambiada por unidad de volumen	W*m ⁻¹
Pr	Número de Prandtl	-
Q	Potencia transferida por unidad de volumen	W*m ⁻³
R	Resistencia por unidad de volumen	Ω*m ⁻¹
Re	Número de Reynolds	-
R _s	Rugosidad del conductor	-
r	Radio	m
t	Intervalo de tiempo	s
T	Temperatura	°C
T ₁	Temperatura inicial	°C
T ₂	Temperatura final	°C
V	Velocidad	m*s ⁻¹
y	Altitud sobre el nivel del mar	m
z	Longitud axial; número de conductores	m
Z	Ángulo de la hora del sol	deg
α	Coeficiente de la temperatura lineal con la resistencia	K ⁻¹
α _s	Absortividad solar de la superficie del conductor	-
β	Coeficiente térmico	K ⁻¹
δ	Ángulo de incidencia del viento	deg
δ _s	Declinación	deg
ε	Emisividad solar de una superficie	-
Υ	Densidad	Kg*m ⁻³
Υ _r	Densidad relativa	-
Υ ₀	Densidad del aire al nivel del mar a 20°C	Kg*m ⁻³
Υ _c	Azimut del conductor	deg
Υ _s	Azimut del sol	deg
ζ	Coeficiente cuadrático de la temperatura con la resistencia	K ⁻²
η	Ángulo de incidencia solar	deg
λ	Conductividad térmica del aire	W*m ⁻¹ *K ⁻¹
μ	Viscosidad dinámica	Kg* m ⁻¹ *s ⁻¹
μ _r	Permeabilidad relativa	-
μ ₀	Permeabilidad del vacío	H*m ⁻¹
ν	Viscosidad cinemática	M ² *s ⁻¹
ρ	resistividad	Ω*m ¹
ϑ _B	Constante de Stefan-Boltzmann (5.6697*10 ⁻⁸)	W*m ⁻² *K ⁻⁴
Θ	Temperatura ambiente	K
†	Constante de tiempo termal	s
φ	Latitud	deg

2.1.2 Equilibrio térmico en estado estacionario

El estado térmico de los conductores aéreos depende principalmente de parámetros ambientales como la dirección y velocidad del viento, la temperatura ambiental, la radiación solar y la corriente eléctrica que transporta el conductor. Considerando que todos estos parámetros permanecen lo suficientemente constantes en el tiempo, se puede considerar que el conductor se encuentra en estado estacionario. En esta situación, el calor proporcionado por las pérdidas Joule y la radiación solar es igual al calor disipado por convección y radiación. Conociendo esto, la ecuación de equilibrio térmico puede expresarse como:

$$\text{Calor obtenido} = \text{Calor perdido}$$

$$P_J + P_S + P_M + P_i = P_C + P_r + P_w \quad (2.1)$$

Donde P_J es el calentamiento debido al efecto Joule, P_S es el calentamiento solar, P_M es el calentamiento magnético, P_i el calentamiento producido por el efecto corona, P_C es la refrigeración por convección, P_r es la refrigeración por radiación y P_w es la refrigeración por evaporación.

El calentamiento por efecto corona es relevante cuando las condiciones de humedad y velocidad del viento son altas, por lo que se puede despreciar, al igual que ocurre con la refrigeración por evaporación.

El calentamiento magnético se suele incluir en el calentamiento debido al efecto Joule.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la ecuación (2.1) quedaría así:

$$P_J + P_S = P_C + P_r \quad (2.2)$$

2.1.3 Equilibrio térmico en estado no estacionario

En general, las condiciones ambientales y la carga de la línea varían con el tiempo. En este caso el conductor no se encuentra siempre en equilibrio térmico, sino en un estado de cambio continuo, por lo que la ecuación general puede expresarse como:

$$\text{Calor almacenado en el conductor} = \text{Calor obtenido} - \text{Calor perdido}$$

El calor almacenado en el conductor es resultado de la variación de temperatura en un determinado periodo de tiempo, entre otros factores depende de las propiedades del material. El calor obtenido y perdido es igual que en el estado estacionario, teniendo en cuenta sus posibles características relacionadas con el tiempo.

Un caso especial es el llamado estado adiabático. Este estado es usado para modelos de temperatura de un conductor bajo condiciones de cortocircuito. Como la duración de la falta es muy pequeña, se asume que no existe refrigeración, por lo que la ecuación quedaría expresada como:

$$\text{Calor almacenado en el conductor} = \text{Calor obtenido}$$

El calor obtenido debido a la gran corriente que circula a través del conductor da como resultado un rápido aumento de la temperatura que deberá controlarse para evitar daños en el conductor.

2.1.4 Calentamiento debido al efecto Joule

El calentamiento por efecto Joule se refiere a la energía generada por la circulación de corriente a través del conductor. Tiene en cuenta el efecto pelicular, el cual incrementa la densidad de corriente que circula por la superficie del conductor cuando se transporta corriente alterna.

- Corriente continua

$$P_J = I^2 * R_{dc} \quad (2.3)$$

Donde I es la corriente total que circula por el conductor (A), R_{dc} es la resistencia por unidad de longitud (Ω/m), la cual depende de la resistividad del material ρ ($\Omega \cdot m$) a una temperatura considerada, la sección A (m^2) y la temperatura medida del conductor T_{av} ($^{\circ}C$). La resistividad de un material a una temperatura T_{av} dada se puede expresar como:

$$\rho = \rho_{20} * [1 + \alpha_{20} * (T_{av} - 20) + \zeta_{20} * (T_{av} - 20)^2] \quad (2.4)$$

- Corriente alterna

La resistencia del conductor se incrementa en su interior, provocando que la mayor densidad de corriente se concentra en su exterior, este fenómeno es conocido como efecto piel.

Cuando se considera un cable, formado por varios conductores que conducen todos en el mismo sentido, al transportar una intensidad alterna, se generan unas líneas de flujo alrededor de cada conductor.

Cuando se producen variaciones de las líneas de flujo sobre los conductores, estas dan lugar a fuerzas electromotrices (según Faraday). La respuesta, según Lenz, es de signo contrario a la que la provoca, las fuerzas electromotrices creadas se opondrán al sentido natural de la corriente que causa esas líneas de flujo.

Los conductores que más se verán afectados por esas líneas de flujo existentes serán los conductores del centro del cable y los menos afectados los de la periferia, se produce una pérdida de la uniformidad de la densidad de corriente dentro del cable, la parte exterior del cable será la que transporta la mayor parte de la corriente.

$$P_J = K_{sk} * I^2 * R_{dc} \quad (2.5)$$

Donde K_{sk} es el efecto pelicular.

2.1.5 Calentamiento debido al efecto magnético

Se puede clasificar el calentamiento por efecto magnético en el producido en el alma de acero (P_{core}) y en el producido en el aluminio (P_{redis}). El flujo magnético axial producido por las capas conductoras en espiral provoca el calentamiento en el núcleo de acero. Estos efectos se pueden considerar para ciertos conductores, pero en la mayoría de los casos de líneas de transmisión se pueden considerar despreciables;

$$P_M = P_{core} + P_{redis} \quad (2.6)$$

2.1.6 Calentamiento debido a la radiación solar

El calentamiento por radiación solar P_s (W/m) por unidad de conductor es directamente proporcional al diámetro del conductor D (m), la absorción de la superficie del conductor α_s , y la intensidad de radiación solar I_T (W/m²):

$$P_s = \alpha_s * I_T * D \quad (2.7)$$

Los instrumentos para la medida de la intensidad de la radiación solar son relativamente económicos y seguros, y pueden ser fácilmente usados para la monitorización de sistemas. Hay que tener en cuenta algunas consideraciones, la radiación solar recibida por el conductor no es igual en todos los puntos, depende de la localización, orientación y reflectancia del suelo, etc. La variabilidad en el tiempo no será la misma en todos los puntos del conductor. Para su diseño se suele tener en cuenta la peor situación esperada de I_T para asegurar un margen de seguridad.

Para su cálculo, se realiza la combinación entre la radiación solar directa en un plano perpendicular a los rayos del sol I_b , la radiación solar difusa en un plano horizontal I_d , y la radiación reflejada procedente del suelo F .

$$P_s = \alpha_s * [I_b * \sin(\eta) + \frac{\pi}{2} * F * \sin(H_s) + I_d * (1 + \frac{\pi}{2} * F)] \quad (2.8)$$

El primer paso es calcular la radiación solar directa a nivel del mar:

$$I_{B(0)} = N_s * \frac{1280 * \sin(H_s)}{\sin(H_s) + 0.314} \quad (2.9)$$

Esta radiación se incrementa a medida que aumenta la altura con respecto al nivel del mar.

$$I_{B(Y)} = I_{B(0)} + [1 + 1.4 * 10^{-4} * y * (\frac{1367}{I_{B(0)}} - 1)] \quad (2.10)$$

$$H_s = \arcsin(\sin(\varphi) * \sin(\delta_s) + \cos(\varphi) * \cos(\delta_s) * \cos(z)) \quad (2.11)$$

$$\delta_s = \text{declination} = 23.2 * \sin[\frac{2\pi * (284 + N^*)}{365}] \quad (2.12)$$

Donde φ es la latitud, N^* es el día del año y z el ángulo según la hora del sol, I_b es la intensidad de la difusión de la radiación solar y η es el ángulo de la incidencia solar con respecto al eje del conductor.

La radiación solar difusa tiene una relación con la radiación solar directa dada a través de la siguiente expresión:

$$I_d = (430.5 - 0.3288 * I_b) * \sin(H_s) \quad (2.13)$$

La radiación reflejada procedente del suelo, F , es aproximadamente 0.05 para el agua, 0.1 para los bosques, 0.15 para áreas urbanas, 0.2 para suelos, pastos y cultivos, 0.3 para arena, 0.4/0.6 para hielo y hasta 0.8 para nieve. El albedo, F , tiende a ascender a medida que H_s aumenta.

2.1.7 Distribución de la temperatura en el conductor

Para algunos conductores, el calor generado en el núcleo del acero puede ser transferido a la superficie del conductor, produciendo una caída de la temperatura radial. Para cables trenzados, esta caída de la temperatura puede ser considerable, sobre todo durante temperaturas altas de funcionamiento.

Estudios experimentales y analíticos muestran que la temperatura del conductor durante una carga de 4 A/mm² puede variar entre 135°C y 230°C con la variación de la velocidad del viento entre 1 y 2 m/s y una dirección del viento de entre 20° y 90° en la línea.

- Radiación de la temperatura radial

El calor generado en las capas internas del conductor es transportado al resto de capas por conducción, convección y radiación. Este calor transferido depende de unas variables muy difíciles de cuantificar, como pueden ser la distancia de aire entre conductores, su grado de corrosión, etc.

Una ecuación simplificada para calcular la diferencia de calor radial en un conductor cilíndrico se puede escribir como:

$$T_C - T_S = \frac{P_T}{2\pi\lambda} * \left[\frac{1}{2} - \frac{D_1^2}{D_2 - D_1} * \ln\left(\frac{D}{D_1}\right) \right] \quad (2.14)$$

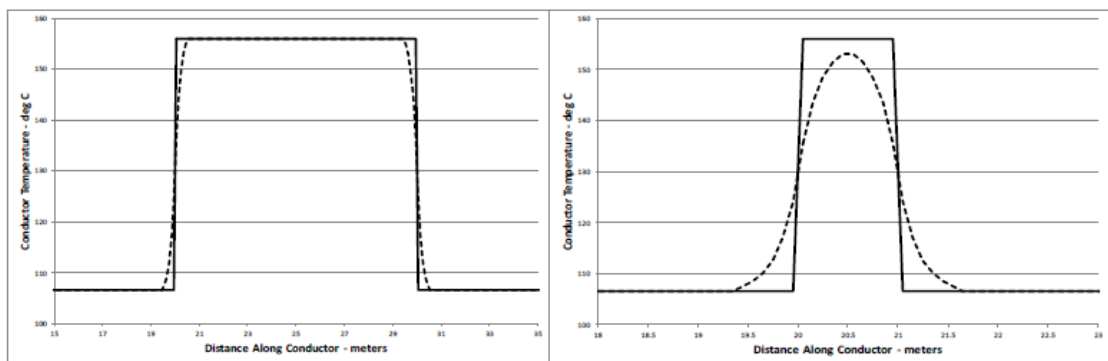
Donde λ es la conductividad termal radial efectiva (W/m*K), P_T es la ganancia total del calor por unidad de longitud (W/m), D es el diámetro del conductor (m) y D_1 es el diámetro interno de acero del conductor (m).

Cuando se trata de aleaciones de aluminio o conductores de aluminio, $D_1=0$:

$$T_C - T_S = \frac{P_T}{4\pi\lambda} \quad (2.15)$$

- Variación de la temperatura longitudinal

Una pequeña parte del calor generada en el conductor es transmitida axialmente. Como se muestra en la Gráfica 2.1, incluso cuando la temperatura varía mucho debido al enfriamiento que se produce por la acción del viento.



Gráfica 2.1 Variación de la temperatura longitudinal a lo largo del conductor

La equalización de la temperatura que se produce a lo largo del conductor es muy pobre. Por lo tanto, con altas densidades de corriente, puede existir una variación sustancial en las temperaturas del conductor a lo largo de una línea aérea debido a las variaciones en las condiciones climáticas locales.

El principal problema, es que la temperatura medida en una sola ubicación a lo largo de una sección de línea puede ser muy diferente de la temperatura promedio del conductor en esa

sección. Se han llegado a observar diferencias de 50°C en la temperatura del conductor dentro de un solo tramo sometido a intensidades de corriente muy altas.

2.1.8 Cálculo de la refrigeración por convección

La convección es casi siempre el factor más importante de la refrigeración en los conductores aéreos, incluso cuando la velocidad del aire es nula. La temperatura del conductor solo puede ser alta cuando la refrigeración por convección es pequeña.

Existen dos tipos de convección que van a ser consideradas:

- Convección natural, ocurre cuando la velocidad del viento es cero.
- Convección forzada, depende de la velocidad del viento y la velocidad relativa de la línea. Cuando existen velocidades de viento moderadas o significativas la convección natural puede ser ignorada.

Con velocidades de viento bajas, la convección natural va a tener un efecto significativo.

La variabilidad del viento hace muy complicado evaluar el comportamiento térmico de las líneas, especialmente con velocidades de viento bajas y densidades de corriente altas.

La refrigeración por convección se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$P_C = \pi \lambda_f (T_s - T_a) N_u \quad (2.16)$$

$$\lambda_f = 2.368 * 10^{-2} + 7.23 * 10^{-5} T_f - 2.763 * 10^{-8} * T_f^2 \quad (2.17)$$

$$T_f = 0.5(T_s + T_a) \quad (2.18)$$

Dependiendo de la situación en la que nos encontremos, convección forzada o natural, el comportamiento podrá ser diferente.

2.1.9 Convección forzada

Flujo perpendicular

$$R_e = \frac{V * D}{V_f} \quad (2.19)$$

$$V_f = \frac{\mu_f}{\gamma} \quad (2.20)$$

$$\mu_f = (17.239 + 4.635 * 10^{-2} * T_f - 2.03 * 10^{-5} * T_f^2) * 10^{-6} \quad (2.21)$$

Donde V es la velocidad del viento (m/s), D es el diámetro del conductor (m), V_f es la viscosidad cinemática del aire (m^2/s), T_f es la temperatura superficial del conductor (°C), μ_f es la viscosidad dinámica del aire y γ es la densidad del aire a una determinada altitud (kg/m^3).

Una fórmula para calcular la densidad del aire a una temperatura y elevación dada se puede expresar como:

$$\gamma = \frac{1.293 - 1.525 * 10^{-4} + 6.379 * 10^{-9} * y^2}{1 + 0.00367 * T_f} \quad (2.22)$$

El procedimiento CIGRE utiliza la ecuación de Morgan:

$$Nu_{90} = B * R_e^n \quad (2.23)$$

Conductores lisos			Conductores trenzados $R_s < 0.05$			Conductores trenzados $R_s > 0.05$		
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	N
35-5000	0.583	0.471	100-2650	0.641	0.471	100-2650	0.641	0.471
5000-50000	0.148	0.633	2650-50000	0.178	0.633	2650-50000	0.048	0.800
50000-200000	0.0208	0.814						

Tabla 2.1 Número de Nusselts

Dirección del viento

Las ecuaciones anteriores sólo son válidas para direcciones del viento perpendiculares al conductor. Sin embargo, la dirección del viento juega un papel importante en la refrigeración por convección.

Las siguientes ecuaciones propuestas por Morgan, donde δ es el ángulo entre la dirección del viento y la dirección del conductor:

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90}} = (\sin^2(\delta) + 0.0169 * \cos^2(\delta))^{0.225} \text{ para conductores lisos}$$

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90}} = 0.42 + 0.68 * (\sin(\delta))^{1.08} \text{ para conductores trenzados con } \delta \leq 24^{\circ}$$

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90}} = 0.42 + 0.58 * (\sin(\delta))^{0.90} \text{ para conductores trenzados con } \delta > 24^{\circ}$$

Estas ecuaciones sólo son válidas para un $Re < 4000$.

2.1.10 Turbulencia

Las turbulencias tienen un efecto considerable en la refrigeración por convección, especialmente para velocidades altas. Es muy difícil evaluarlas en una línea aérea real, debido a su variabilidad en el espacio y en el tiempo.

2.1.11 Convección natural

En el caso de la velocidad de viento nula, en diferentes investigaciones se ha encontrado que el número de Nusselt (Nu_{nat}), depende del producto de los números de Grashof y Prandtl:

$$Nu_{90} = A * (Gr * Pr)^m \quad (2.24)$$

Los valores de los coeficientes A y m propuestos por Morgan para varios rangos de $Gr*Pr$ están indicados en la siguiente tabla:

Rango de $Gr*Pr$		A	m
De	A		
10^{-1}	10^2	1.02	0.148
10^2	10^4	0.850	0.188
10^4	10^7	0.480	0.250
10^7	10^{12}	0.125	0.333

Tabla 2.2 Valores para distintos $Gr*Pr$

La inclinación del conductor con respecto a la horizontal (β), reduce la convección natural:

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_0} = 1 - 1.58 * 10^{-4} * \beta^{1.5} \text{ para conductores lisos, } \beta < 60^{\circ}.$$

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_0} = 1 - 1.76 * 10^{-6} * \beta^{2.5} \text{ para conductores trenzados, } \beta < 80^{\circ}.$$

2.1.13 Velocidades de viento bajas

Cuando la velocidad del viento es baja, la física de la transferencia de calor hace más complicado de calcular los efectos a los que se ve sometido el aire que se encuentra alrededor del conductor. Diferentes modelos han sido propuestos por algunos autores para considerar estos efectos, lo que se asume actualmente es una suave transición entre convección forzada y convección natural.

En el procedimiento TB601, se recomienda calcular ambos números de Nusselt sin tener en cuenta que clase de convección es y utilizar el valor más elevado obtenido.

2.1.14 Refrigeración debida a la radiación

La pérdida neta de calor por radiación de un conductor es la energía radiactiva total transmitida desde su superficie, se puede dividir en dos componentes, el calor radiado desde el suelo y sus alrededores y el calor radiado directamente desde el suelo. Aplicando la ley de Stefan-Boltzmann:

$$P_r = \pi * D * \sigma_B * F_{c-g} * \varepsilon_s * \left[(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] + \pi * D * \sigma_B * F_{c-sky} * \varepsilon_s * \left[(T_s + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right] \quad (2.25)$$

Donde D es el diámetro del conductor, 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 cercano al conductor, F_{c-g} es la fracción de la energía radiada desde el suelo y F_{c-sky} es la fracción de energía radiada desde el cielo.

Es muy común igualar T_g y T_{sky} a la temperatura ambiente T_a , ya que ésta es mucho más fácil de estimar. Por lo que la expresión 2.25 quedaría así:

$$P_r = \pi * D * \sigma_B * \varepsilon_s * (F_{c-g} + F_{c-sky}) * \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (2.26)$$

Las emisiones de conductores aumentan rápidamente con la edad de 0.2/0.3 cuando son nuevas a 0.8/0.9 con dos años de funcionamiento en ambientes industriales.

2.2 IEEE 738

IEEE es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la normalización y el desarrollo en áreas técnicas. Al igual que CIGRE TB601 utiliza la ecuación de equilibrio térmico para calcular la ampacidad de las líneas. A continuación, se expone el método descrito en esta guía.

2.2.1 Lista de símbolos:

Símbolo	Descripción	Unidades
A'	Área proyectada del conductor	m ²
C	Azimet solar	deg
C _{pi}	Calor específico del primer material conductor	J/kg°C
D ₀	Diámetro externo del conductor	m
D _{core}	Diámetro del alma del conductor	m

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA AMPACID DE UNA LÍNEA SOMETIDA A MÚLTIPLES CONDICIONES AMBIENTALES

H_c	Altitud del sol	deg
H_e	Elavación del conductor sobre el nivel del mar	m
I	Corriente	A
I_i	Corriente inicial tras un cambio	A
I_f	Corriente final tras un cambio	A
k_{angle}	Factor de la dirección del viento	-
k_{solar}	Factor de corrección de la altitud solar	-
k_f	Conductividad termal del aire a la temperatura T_{film}	W/m°C
k_{th}	Conductividad térmica radial efectiva del conductor	W/m°C
Lat	Latitud	deg
mC_p	Capacidad calorífica del conductor	J/m°C
m_i	Masa por unidad de longitud	Kg/m
N	Día del año	-
N_{Re}	Número de Reynolds	-
$q_{cn}, q_{c1}, q_{c2}, q_c$	Pérdidas por convección por unidad de longitud	W/m
q_r	Pérdidas por radiación por unidad de longitud	W/m
q_s	Ganancia por el sol	W/m
Q_s	Intensidad térmica total por radiación	W/m ²
Q_{se}	Intensidad térmica total corregida por la elevación	W/m ²
$R(T_{avg})$	Resistencia del conductor a una temperatura T_{avg}	Ω/m
T_a	Temperatura ambiente	°C
T_{avg}	Temperatura media de los conductores de aluminio	°C
T_s	Temperatura de la superficie del conductor	°C
T_{core}	Temperatura del núcleo del conductor	°C
T_f	Temperatura del conductor tras periodos incrementando	°C
T_i	Temperatura del conductor antes del aumento	°C
T_{film}	Temperatura media de la capa límite	°C
T_{low}	Temperatura media baja para la cual se especifica la resistencia	°C
T_{high}	Temperatura media alta para la cual se especifica la resistencia	°C
V_w	Velocidad del viento	m/s
Y	Año	-
Z_c	Azimut del sol	deg
Z_1	Azimut de la línea	deg
Δt	Transitorio	s
ΔT_c	Incremento de la temperatura durante varios periodos	°C
α	Absortividad solar	-
δ	Declinación solar	deg
ϵ	Emisividad	-
τ	Constante térmica temporal del conductor	min
ϕ	Ángulo entre el viento y el eje del conductor	deg
β	Ángulo entre el viento y la perpendicular del conductor	deg
ρ_f	Densidad del aire	Kg/m ³
θ	Ángulo efectivo de incidencia de los rayos del sol	deg
μ	Viscosidad dinámica del aire	Kg/m-s
w	Ángulo de la hora en relación con el mediodía	deg
χ	Azimut solar variable	-

El modelo térmico numérico presentado en el documento es muy general. Puede ser aplicado a las siguientes situaciones:

- Estado estacionario, donde la corriente eléctrica, la temperatura del conductor y las condiciones ambientales permanecen constantes a lo largo del tiempo.
- Estado transitorio, donde las condiciones ambientales permanecen constantes pero la corriente eléctrica varía de un valor inicial a un valor final incrementando o disminuyendo la temperatura del conductor.
- Caso dinámico, donde la temperatura del conductor es calculada para una corriente eléctrica y unas condiciones ambientales variables a lo largo del tiempo.

2.2.2 Equilibrio térmico en estado estacionario

Para un conductor trenzado, donde T_s es la temperatura en la superficie del conductor, los parámetros ambientales son V_w , T_a , etc., las pérdidas de calor por convección y radiación q_c y q_r , el calentamiento debido a la radiación solar q_s y la resistencia del conductor $R(T_{avg})$, aplicando la siguiente expresión obtendremos la intensidad:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 * R(T_{avg}) \quad (2.27)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{avg})}} \quad (2.28)$$

2.2.3 Equilibrio térmico en estado transitorio

La temperatura del conductor se encuentra sometida a cambios debido a los cambios producidos en la corriente eléctrica y en las condiciones ambientales (T_a , Q_s , V_w , ϕ):

$$q_c + q_r + m * C_p * \frac{dT_{avg}}{dt} = q_s + I^2 * R(T_{avg}) \quad (2.29)$$

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{1}{m * C_p} * [R(T_{avg}) * I^2 + q_s - q_c - q_r] \quad (2.30)$$

2.2.4 Refrigeración por convección

Las pérdidas de calor por convección se pueden clasificar en dos tipos, naturales y forzadas. La convección natural se produce en condiciones de viento en calma, es un proceso continuo en el que el aire que rodea al conductor se calienta, se eleva y es reemplazado por aire fresco que lo rodea. La convección forzada se produce cuando el aire pasa con cierta velocidad por el conductor y retira el aire caliente. La convección forzada tiene mayor poder de refrigeración que la natural.

La magnitud de la refrigeración por convección es una función del número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{D_0 * \rho_f * V_w}{\mu_f} \quad (2.31)$$

Donde D_0 es el diámetro del conductor, V_w es la velocidad del viento, ρ_f es la densidad del aire y μ_f es la viscosidad dinámica del aire.

2.2.5 Convección forzada

Dependiendo de la velocidad del viento se deberá usar la ecuación adecuada. Cuando se trata de vientos con velocidades bajas:

$$q_{c1} = k_{angle} * [1.01 + 1.35 * N_{Re}^{0.52}] * k_f * (T_s - T_a) \quad (2.32)$$

Mientras que si se trata de vientos a velocidades altas:

$$q_{c2} = k_{angle} * 0.754 * N_{Re}^{0.6} * k_f * (T_s - T_a) \quad (2.33)$$

En estas expresiones aparece multiplicando k_{angle} (la dirección del viento), donde ϕ es el ángulo entre la dirección del viento y el eje del conductor:

$$k_{angle} = 1.194 - \cos(\theta) + 0.194 * \cos(2\theta) + 0.368 * \sin(2\theta) \quad (2.34)$$

Si se quiere expresar en función de β (ángulo entre la dirección del viento y la dirección perpendicular al eje del conductor), la expresión anterior quedaría así:

$$k_{angle} = 1.194 - \sin(\theta) + 0.194 * \cos(2\theta) + 0.368 * \sin(2\theta) \quad (2.35)$$

2.2.6 Convección natural

$$q_{cn} = 3.645 * \rho_f^{0.5} * D_0^{0.75} * (T_s - T_a)^{1.25} \quad (2.36)$$

Al igual que en CIGRE, aconseja para valores bajos de viento, calcular ambos valores y elegir el más alto.

Para calcular las variables aplicadas en la fórmula (2.36):

$$T_{film} = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (2.37)$$

$$\mu_f = \frac{0.00353 * (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383.4} \quad (2.38)$$

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 * 10^{-4} * He + 6.379 * 10^{-9} * He^2}{1 + 0.00367 * T_{film}} \quad (2.39)$$

$$k_f = 2.424 * 10^{-2} + 7.477 * 10^{-5} * T_{film} - 4.407 * 10^{-9} * T_{film}^2 \quad (2.40)$$

Donde T_{film} es la temperatura de la capa límite del conductor.

2.2.7 Refrigeración por radiación

Cuando un conductor se calienta por encima de la temperatura de su entorno, la energía se transmite por radiación al entorno. La velocidad a la que esta energía se transmite al entorno depende principalmente de la diferencia de temperatura del conductor y la del entorno (temperatura ambiente):

$$q_r = 17.8 * D_0 * \varepsilon * \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (2.41)$$

Donde ε es la emisividad del conductor.

2.2.8 Calentamiento por radiación solar

El sol proporciona energía en forma de calor al conductor. La cantidad de energía solar que le llega al conductor depende de la posición del sol en el cielo, la constante solar, la cantidad de

energía que es transmitida desde la atmósfera de la tierra al conductor, la orientación del conductor y la absorptividad del conductor. Los conductores limpios y brillantes reflejan más la energía mientras que los conductores negros y erosionados absorben mejor la energía que reciben.

$$q_s = \alpha * Q_{se} * \sin(\theta) * A' \quad (2.42)$$

$$\theta = \arccos[\cos(H_c) * \cos(Z_c - Z_1)] \quad (2.43)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia de la luz solar.

$$H_c = \arcsin[\cos(Lat) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(Lat) * \sin(\delta)] \quad (2.44)$$

$$\delta = 23.46 * \sin\left[\frac{284+N}{365} * 360\right] \quad (2.45)$$

$$Z_c = c + \arctan(x) \quad (2.46)$$

$$x = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) * \cos(\omega) - \cos(Lat) * \tan(\delta)} \quad (2.47)$$

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \quad (2.48)$$

	Atmósfera limpia	Atmósfera industrial
A	-42.2391	-3.9241
B	63.8044	5.9276
C	-1.9220	-1.7856X10 ⁻¹
D	3.4621X10 ⁻²	3.223X10 ⁻³
E	-3.61118X10 ⁻⁴	-3.3549X10 ⁻⁵
F	1.94318X10 ⁻⁶	1.8053X10 ⁻⁷
G	-4.07608X10 ⁻⁹	-3.7868X10 ⁻¹⁰

Tabla 2.3 Valores de las constantes para una atmósfera limpia o para una atmósfera industrial

Donde $\omega = 15(hora - 12)$, δ es la declinación solar, Z_c es el azimut solar, c es la constante del azimut solar, Q_s es la densidad total del flujo caliente, H_c es la altitud solar, Q_{se} es la intensidad solar y k_{solar} su constante.

2.2.9 Resistencia eléctrica del conductor

La resistencia eléctrica de un conductor varía con la sección del conductor, la frecuencia, la corriente y la temperatura. La resistencia del conductor a alta temperatura T_{high} y a baja temperatura T_{low} , son proporcionadas por el fabricante. La resistencia del conductor a otra temperatura T_{avg} se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$R(T_{avg}) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] * (T_{high} - T_{low}) + R(T_{low}) \quad (2.49)$$

2.2.10 Efecto pelicular

La corriente alterna que fluye a través de un conductor trenzado tiende a situarse en la zona superficial del conductor debido al flujo interno que se produce en el interior de las capas trenzadas.

2.2.11 Calentamiento por intensidad

El parámetro relativo al calentamiento por efecto Joule es:

$$q_j = I^2 R(T_{avg}) \quad (2.50)$$

2.3 Otros procedimientos

IEEE 738 y CIGRE TB-601 son las normas más completas sobre la gestión dinámica de la ampacidad de una línea eléctrica, ya que todo el documento está centrado en este tema, aun así en CIGRE 498 y en CIGRE 299 también se puede encontrar información sobre la ampacidad, a continuación, se desarrollan los puntos más importantes de estos documentos:

2.3.1 CIGRE 299_ Guía para la selección de los parámetros ambientales en conductores aéreos desnudos.

2.3.1.1 Condiciones ambientales ajustadas continuamente

Las variables relacionadas con las condiciones ambientales se ven sometidas a cambios continuos en el tiempo, las condiciones deben irse actualizando constantemente con los cambios que se van produciendo. En algunos casos en los que no se utilizan sistemas de monitorización en tiempo real, la velocidad del viento deberá estar basada en la velocidad del viento más restrictiva que aparezca en los datos históricos. En numerosos artículos se indica claramente que la temperatura y la velocidad del viento no son parámetros independientes, cuando existen velocidades de viento altas suelen estar asociadas a temperaturas ambientales altas y viceversa.

Cuando la clasificación se ajusta para condiciones de funcionamiento durante el día, se recomienda seguir las siguientes especificaciones:

- Cuando la diferencia entre la temperatura real y la estimada sea menor a 8°C, la selección de la velocidad del viento no deberá ser superior a 0.5 m/s.
- Cuando la diferencia entre la temperatura real y la estimada sea mayor a 8°C, la selección de la velocidad del viento no deberá ser superior a 0.4 m/s.

Cuando la clasificación se ajusta para condiciones de funcionamiento durante la noche, se recomienda seguir las siguientes especificaciones:

- La velocidad del viento se considerará cero (solo existirá convección natural).
- La radiación solar tendrá un valor de cero.

Estas clasificaciones ajustadas continuamente a las condiciones ambientales pueden proporcionar aumentos de la ampacidad técnicamente justificados para líneas diseñadas para bajas temperaturas máximas de funcionamiento de los conductores, por ejemplo, de 60-70°C, en el caso de que las líneas estén diseñadas para 100°C o temperaturas superiores, su uso no está recomendado.

2.3.1.2 Monitorización en tiempo real

En lugar de usar suposiciones del caso más desfavorable, el operador de red puede elegir usar equipamiento de monitorización en tiempo real para determinar los valores de la línea, siempre que se cumplan las siguientes afirmaciones:

- El equipo de monitorización debe tener la sensibilidad, exactitud y calibración establecidas por la normativa.

- Las líneas que vayan a ser monitorizadas deben estar verificadas que cumplen los requisitos de acreditación.
- Se instale la suficiente cantidad de estaciones meteorológicas para que la información que permite monitorizar la flecha del circuito en relación con la temperatura correspondiente no supere nunca el máximo.
- El operador de red tenga la capacidad de ajustar la corriente al nivel deseado o cambiarla cuando se produzcan situaciones de emergencia.

Principios generales de las clasificaciones

- Los objetivos de la transmisión de calor en líneas son garantizar la operación segura de forma anticipada a las condiciones a las que va a ser expuesta y que la integridad del conductor no se vea en peligro debido al recocido o a otra degradación del conductor.
- Las líneas de transmisión raramente operan en los límites de diseño, pero ocasionalmente deben ser capaces de admitir estas cargas.
- Los límites de temperatura considerados se deben tener en cuenta tanto en el propio conductor como en las conexiones y los elementos de las subestaciones.
- Los métodos usados en el diseño de las líneas viejas puede que no sean apropiados para cálculos de temperaturas elevadas

2.3.1.3 Temperatura ambiente

La temperatura ambiente afecta a la temperatura del conductor en una relación uno a uno. Si en unas condiciones dadas, la temperatura ambiente aumente 10°C, la temperatura del conductor aumentará aproximadamente en la misma cantidad. La selección de la temperatura que rodea al conductor tiene un efecto relativamente pequeño cuando el conductor ha sido diseñado para operar con una temperatura, pero puede tener un efecto significativo para líneas que operan con temperaturas bajas.

La variación de la temperatura a lo largo de la longitud del conductor suele ser bastante pequeña, a no ser que la línea discorra en un terreno montañoso.

2.3.1.4 Radiación solar

La mayor parte de las metodologías de cálculo asumen mediodía, cielo despejado y una dirección de la radiación perpendicular al conductor, además de algunos cálculos relacionados con la reflexión y la difusión solar.

En el caso de que por el conductor no circule ninguna intensidad, la temperatura del conductor será igual a la temperatura del aire y a la adquirida por la radiación solar. Los efectos combinados de la temperatura ambiente y la radiación solar se conocen como temperatura de radiación de la red.

2.3.1.5 Emisividad y absorptividad

La emisividad y la absorptividad de los conductores están altamente relacionadas, aumentando rápidamente desde valores iniciales de 0.2/0.3 a valores superiores a 0.8 en condiciones de operación de alta tensión en ambientes industriales durante dos años. Este incremento tiene un efecto beneficioso cuando las líneas operan a una temperatura de 70/80°C. A veces se utilizan valores bajos de temperatura para las líneas durante su primer año de funcionamiento por sus reducidas pérdidas por radiación debido a su bajo nivel de emisividad.

2.3.1.6 Dirección y velocidad del viento

La dirección y velocidad del viento son las variables más importantes a la hora de determinar los valores de la línea, también son los datos más difíciles de obtener. La siguiente tabla muestra los impactos sobre la temperatura del conductor en cambios producidos en la dirección y/o velocidad del viento:

Velocidad viento (m/s)	Dirección viento (grados)	100°C máxima temperatura (A)	Temperatura sin viento	Temperatura con 0.6 m/s
0	0	803	100°C	79°C
0.3	90	861	106°C	98°C
0.6	90	1047	127°C	100°C
0.6	45	977	119°C	93°C
0.6	20	874	107°C	84°C
0.9	90	1135	139°C	109°C
1.2	90	1203	148°C	117°C

Tabla 2.4 Variación de la temperatura del conductor sometido a distintas condiciones ambientales

2.3.2 CIGRE 498_Guía para la aplicación directa de sistemas de monitorización en tiempo real.

Los objetivos de la monitorización en tiempo real consisten en:

- Determinar la flecha del conductor en condiciones excepcionales de temperatura en el propio conductor.
- Comparar la flecha en tiempo real con la máxima flecha permitida para no superarla cuando la temperatura de operación del conductor sea alta.
- Basándose en la carga de la línea en tiempo real, convertir los valores seguros de operación de la línea en cargas eléctricas (MVA).
- Obtener información adicional que pueda ser importante a la hora de determinar la ampacidad y el histórico de datos de la línea para tener presentes sus máximos y mínimos.

2.3.2.1 Limitaciones de la monitorización en tiempo real

Usando la monitorización en tiempo real en conductores, un valor teórico muy alto de ampacidad puede ser obtenido para condiciones de temperaturas muy bajas y altas velocidades de viento.

Tradicionalmente, cuando ocurría un fallo en una línea, el operador debía cambiar la distribución del sistema hasta llegar a uno estable, esto acarrea un coste económico y puede llegar a tener un coste en la línea, con la monitorización en tiempo real se permite que el operario determine los valores de la línea y realice los cambios oportunos para que no se llegue a situaciones límites que puedan producir fallos en las líneas.

2.3.2.2 Temperatura del conductor y flecha máxima

Los límites de funcionamiento de la línea están relacionados con la temperatura del conductor y la flecha máxima (caso más desfavorable). Los sistemas de monitorización en tiempo real están orientados a detectar una de estas dos variables, aunque, actualmente, la mayoría de los sistemas comparan ambas variables para detectar el caso más desfavorable.

2.4 Resumen

Tanto CIGRE TB-601 como IEEE 738 desarrollan a lo largo de todo el documento como se debe llevar a cabo la gestión dinámica de la ampacidad de una línea, ambas metodologías son muy parecidas a la hora de explicar cómo realizar la ecuación de equilibrio térmico. En relación con CIGRE 299 está orientada a definir los parámetros que son variables a lo largo del tiempo y a definir los límites en los que pueden operar sin centrarse tanto como los dos anteriores en la gestión dinámica. Por último, CIGRE 498 está centrado en la monitorización en tiempo real, empezando por su definición y continuando por casos en los que es útil y cómo debe llevarse a cabo, siendo este un punto muy importante a la hora de llevar a cabo la gestión dinámica de la ampacidad en una línea eléctrica.

3. PROBLEMÁTICA DE LA NORMATIVA

La normativa actual que regula el análisis dinámico de una línea, actualmente, se rige por las normas IEE738 y CIGRE TB601, estas normas tienen algunos puntos en los que no son totalmente realistas.

3.1 CONDICIONES AMBIENTALES

Un claro ejemplo de esto se observa en la medida de las condiciones ambientales, con respecto a la temperatura del conductor, en un análisis dinámico, se toman diferentes medidas a lo largo de la línea, como ya se sabe una línea puede tener longitudes y diferencias de altitud muy grandes por lo que una medida en una ubicación determinada puede ser lo suficientemente distinta para afectar a los cálculos en otro punto de la línea. Al igual que con la temperatura del conductor, sucede algo parecido con el viento, se debe tener en cuenta tanto la magnitud como la dirección, sucede lo mismo que con la temperatura del conductor, estas variables pueden cambiar a lo largo de la longitud de la línea. Otro aspecto a tener en cuenta relacionado con el viento es la magnitud, cuando se trata de velocidades de viento bajas, es muy difícil de calcular los efectos de este sobre el conductor, por lo que no hay una regla para distinguir entre convección natural y forzada y se calcula con la más restrictiva. Por último, la radiación, además de que la radiación solar recibida por el conductor no es igual en todos los puntos y depende de la localización, orientación, etc. de la línea, otra crítica recibida en este aspecto es que el cálculo de la radiación recibida se aproxima de forma muy académica, lo que, desde el punto de vista práctico no resulta muy conveniente.

3.2 MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL

Como se ha tratado en el párrafo anterior, uno de los principales problemas con el análisis dinámico de las líneas está relacionado con la monitorización de las condiciones ambientales.

Además de conocer el estado de las líneas en tiempo real, se debe conocer el estado de las variables ambientales en un corto espacio de tiempo, esto es debido a que las maniobras realizadas en la red necesitan un periodo de tiempo que no se puede conseguir únicamente con la gestión dinámica en tiempo real. Es muy importante conocer las condiciones ambientales en un corto periodo de tiempo.

Existen varios procedimientos para realizar predicciones meteorológicas. Éstos, se basan en aplicar características de la atmósfera en un momento dado y empleando ecuaciones de dinámica de fluidos y termodinámica para obtener en estado de la atmósfera en un futuro. Otro modo de realizar predicciones meteorológicas son los históricos de datos, en los que se forman series de datos ordenados cronológicamente utilizados como entradas de algoritmos para generar predicciones.

Para poder realizar predicciones meteorológicas se utilizan modelos matemáticos que simulan la dinámica de la atmósfera en un instante dado gracias a ecuaciones diferenciales.

Para obtener estas predicciones se deben conocer las condiciones iniciales gracias a las estaciones meteorológicas situadas a lo largo de la línea, gracias a estos valores se podrán resolver las ecuaciones que den lugar a las predicciones atmosféricas.

Existen varios modelos, entre los más utilizados están:

- HIRLAM (High Resolution Limited Area Model)

- GFS (Global Forecast System)
- Met UM (Met Office Unified Model)
- GME
- Modelo Global del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio
- GEM (The Global Environmental Multiscale Model)
- MM5 (Mesoscale Model 5)

También existen los modelos de predicción basados en series temporales, para poder realizar una predicción basada en una serie temporal se debe tener un conjunto ordenado de observaciones obtenidas en intervalos regulares de tiempo, una característica de esta metodología es que para conocer una variable en un determinado momento se debe conocer el valor de esa variable en los instantes anteriores. Estas series se utilizan principalmente para predecir valores futuros de una determinada variable gracias a la evolución de la tendencia de dicha variable, y de analizar la serie de datos de una variable para conocer mejor el fenómeno que describe.

Estos modelos de predicción se subdividen en tres grupos diferenciados:

- Métodos en los que los valores dependen de los valores y pasados de la variable.
- Métodos en los que la predicción depende de la variable a predecir y de otras variables.
- Predicciones basadas en juicios subjetivos.

Estos métodos se pueden combinar entre sí para lograr una mejor predicción.

A la hora de realizar los modelos de una serie temporal, es importante conocer sus propiedades y una herramienta que se puede utilizar para este cometido es la representación gráfica en el tiempo.

En una serie temporal existen dos características principales (tendencia y estacionalidad). En su análisis, la serie temporal, se descompone en variables estacionales, tendencias, variaciones cíclicas y fluctuaciones irregulares.

Un modelo muy utilizado a la hora de hacer predicciones es el modelo ARIMA, este tipo de modelos realiza un análisis exhaustivo de las variables que quiere predecir, por lo que se necesita estudiar cada una de las variables para utilizar el método de predicción más adecuado en cada caso.

Otro sistema utilizado son los modelos basados en redes neuronales, las redes neuronales son sistemas de inteligencia artificial basados en el comportamiento de las neuronas del ser humano.

La arquitectura de las redes neuronales es muy importante ya que deben adecuarse a la serie temporal correspondiente. En una red neuronal se pueden diferenciar las entradas, pudiendo ser solo la variable que predecir o también, otras variables complementarias, las capas, estas redes necesitan neuronas que actúen en paralelo, las agrupaciones de estas capas se conocen como capas, las salidas y las interconexiones, pudiendo ser totalmente conectadas cuando la salida es la entrada a la capa siguiente o parcialmente conectadas cuando la salida de una neurona es la entrada de la otra.

Dentro de una red neuronal la información puede seguir varias direcciones, cuando la información va desde la entrada hasta la salida se denominan redes de alimentación adelantada, cuando las salidas de una capa son entradas de una capa anterior se denominan redes de retroalimentación, si las salidas de una capa son entradas de la misma capa se denominan redes de alimentación lateral y, por último, cuando dentro de la red existen lazos cerrados de información se denominan redes recurrentes.

A una red neuronal hay que entrenarla, es decir, mediante un algoritmo en el que se van dando diferentes pesos de la red, esto provoca que se produzcan las conexiones necesarias entre las neuronas que permite obtener una salida cuando se le introduce una o varias entradas.

Finalmente se realiza una prueba en red, en la que se somete a valores reales diferentes a los valores utilizados en el entrenamiento y se comparan los resultados obtenidos con valores reales para encontrar posibles errores, siempre y cuando les hubiese.

Debido a la simplicidad en su creación y proceso de integración es el método empleado para la predicción de la capacidad en los conductores.

3.3 LIMITACIONES DEL CONDUCTOR

Otro punto conflictivo a la hora de implantar el análisis dinámico de la ampacidad de una línea es el aumento de la temperatura del conductor, según la ITC-07-LAT en el apartado 2.1.2.3, se estipula que, para los conductores de aluminio, la temperatura máxima de servicio continuo no podrá sobrepasar los 85°C y en situaciones exceptuales durante un periodo de tiempo corto, debido por ejemplo a un fallo en el sistema, la temperatura no podrá superar en ningún caso los 100°C.

Teniendo en cuenta la norma, hay que asegurar que cuando se realice una gestión dinámica de la línea no se superen los 85°C de temperatura en continuo.

En los conductores de aluminio, a medida que aumenta la temperatura, se produce una pérdida de capacidad dinámica, y en muchos casos aumentará la flecha del conductor, pudiendo provocar problemas con la distancia de servidumbre de paso del tendido eléctrico.

Según el Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, Decreto 3151/1968, Artículo 27, apartado 3, para determinar la flecha máxima de los conductores en las zonas A, B y C (se distinguen tres zonas en función de la altitud a la que se encuentran, la zona A comprende altitudes entre el nivel del mar hasta los 500 m, la zona B comprende altitudes entre los 500 m y los 1000 m y por último la zona C incluye altitudes superiores a los 1000 m).

Para calcular el valor de la flecha máxima se deberán calcular tres hipótesis, la primera es la hipótesis de viento, en ella los conductores están sometidos a su peso propio y a una sobrecarga de viento a una temperatura de 15°C, la segunda hipótesis es la hipótesis de temperatura, en ella los conductores estarán sometidos a su peso propio y a una temperatura ambiente de 50°C ya que se trata de una temperatura lo suficientemente elevada como para ser considerada la temperatura máxima previsible, si se trata de lugares muy calurosos esta temperatura podrá ser incrementada, pero nunca tener un valor inferior, la última hipótesis es la de hielo (no se aplica en la zona A), en ella los conductores están sometidos a su peso propio y una sobrecarga provocada por el hielo a una temperatura de 0°C.

Con esta normativa se establecen las distancias mínimas de seguridad entre el conductor y el suelo o los obstáculos que se sitúen entre el conductor y el suelo, como pueden ser carreteras, ríos, otras líneas situadas por encima o por debajo de la línea analizada, etc. En las tres hipótesis comentadas anteriormente la máxima temperatura ambiente que se tiene en cuenta es de 50°C mientras que la máxima temperatura de servicio continuo para un conductor de aluminio es de 85°C.

Todos los cálculos mecánicos, incluida la flecha máxima, están calculados para una temperatura de 50°C, con una gestión dinámica de la ampacidad de la línea se podría aprovechar la diferencia entre los 85°C que permiten los conductores de aluminio y los 50°C de las hipótesis, esta situación provocaría que la flecha aumente, si esto sucede, la línea no puede ser explotada cuando no se cumplan las distancias mínimas verticales de seguridad, por lo que en las líneas en las que se sobrepase la temperatura de 50°C deberá realizarse un estudio de la servidumbre de paso de la línea para garantizar el cumplimiento de las distancias mínimas reglamentarias.

3.4 CONCLUSIÓN

En conclusión, los principales problemas a los que se debe hacer frente en la gestión dinámica de las líneas son que la normativa actual tiene un método para calcular la ampacidad que contempla que la línea es sometida a las mismas condiciones ambientales a lo largo de toda la longitud, esto no es real ya que la longitud de las líneas puede llegar a ser muy grande existiendo diferencias entre las condiciones a las que se ve expuesto el conductor en la parte inicial de la línea frente a las condiciones a las que se verá expuesto el conductor en la parte final de la línea. Otro punto que se debe tener en cuenta para la gestión dinámica de las líneas es que para llevarla a cabo deben conocerse las condiciones ambientales con antelación, esto provoca que sea importante crear algoritmos de predicción atmosférica cada vez más precisos como pueden ser los modelos de redes neuronales. Por último, se debe prestar atención a las nuevas flechas que existirán cuando se eleva la temperatura de funcionamiento del conductor ya que deben respetar las distancias de seguridad, pudiendo requerir el retensionado de la línea o elevar los apoyos.

4. SISTEMAS DE ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos, nombrado en este trabajo MEF, es un análisis matemático basado en la discretización de un medio continuo en elementos pequeños que cuentan con las mismas propiedades que el medio original. Este método puede ser utilizado en diversas áreas, tanto en ciencias exactas como en ciencias biológicas.

El objetivo principal del MEF es determinar el estado de tensión y deformación de un sólido con una geometría definida que está sujeto a acciones exteriores. Cuando se va a realizar un proyecto se suele realizar una sucesión de análisis y cambios en las características hasta llegar a la solución deseada, lo que permite verificar el correcto funcionamiento del modelo y, además, proporciona un ahorro económico.

Se trata de un método numérico de resolución de problemas que cuenta con una herramienta de cálculo muy potente que permite resolver numerosos problemas. Este método no proporciona la solución exacta, sino que obtiene una solución aproximada con un grado de error tan pequeño que, para la solución de problemas prácticos, es perfectamente válida.

El MEF ha sido un avance con respecto a los métodos utilizados en el pasado, pero solo tiene utilidad si se dispone de un ordenador digital, este es debido a que, para resolver los problemas necesita realizar la resolución de grandes sistemas de ecuaciones no lineales. Es por esto, que el desarrollo de este método ha coincidido con la implantación de ordenadores digitales en los centros de investigación.

Previamente al desarrollo del MEF, este tipo de problemas se resolvían mediante resolución directa de los sistemas de ecuaciones de derivadas parciales, para lograr resolver estos problemas era muy común emplear series de Fourier debido a su complejidad, aun así, los problemas continuaban siendo muy complicados, por lo que el MEF solo se aplicaba a medios continuos homogéneos y que presentaban una geometría simple. Inicialmente, se trató de superar este problema de complejidad de los cálculos sustituyendo las derivadas exactas por derivadas aproximadas, es en este punto en el cuál surge el método de las diferencias finitas, su problema principal en este momento era que, como se ha mencionado anteriormente, hasta la aparición de ordenadores digitales no empezó a utilizarse, debido a que se debía llevar a cabo la resolución de grandes sistemas de ecuaciones lineales. Este problema se afrontó mediante el empleo de métodos de relajación basados en la disminución de residuos, pero aumentaba el error de la solución de los problemas, es por esto por lo que, inicialmente era muy común sustituir los problemas reales por otro similar que se hubiese resuelto previamente y sus resultados estuviesen publicados. Fue en la época de 1960 cuando se produjo el punto de inflexión en el uso del MEF debido a que se extendió el uso de computadoras y este método empezó a emplearse en el análisis de estructuras de diferentes geometrías, construidas con diversos materiales y expuestos a la acción de fuerzas exteriores sobre ellos. El resto de los métodos empleados anteriormente, con la aparición del MEF, dejaron de usarse. Hoy en día, este método se utiliza principalmente para proporcionar soluciones teóricas a problemas simples que sirven para validar métodos aproximados.

El MEF se basa en la existencia de una ecuación integral, que permita sustituir el integral sobre un dominio de volumen V por la suma de integrales de geometría simple con volumen V_i . Esto se puede resumir en la siguiente ecuación.

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (4.1)$$

Donde V:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (24.2)$$

Para calcular todo el integral (V), únicamente se debe realizar la suma de los integrales (V_i). Cada integral V_i corresponde a un elemento finito de geometría simple.

A la hora de realizar la simulación el programa elegido para llevarla a cabo es ANSYS Workbench, debido a la cantidad de opciones que permite a la hora de simular y todas las variables que se pueden cambiar. A continuación, se explica en más profundidad en que consiste este programa.

4.1 ANSYS

ANSYS es un software de simulación ingenieril, utilizado para predecir cómo se comportará una determinada estructura en un entorno real. Este programa trabaja bajo la teoría de los elementos finitos para estructuras y volúmenes explicado en el apartado anterior.

ANSYS es un programa que permite realizar multitud de cálculos relacionados con varias disciplinas, como pueden ser los análisis estructurales, térmicos, fluidos, acústicos, eléctricos, etc. También permite elegir el tipo de simulación que se desea realizar, pudiendo elegir entre estado permanente y estado transitorio, en concreto en este trabajo la simulación se va a realizar sobre el estado permanente. Otro de los puntos clave de este programa es la capacidad de realizar simulaciones combinando distintos de los análisis mencionados anteriormente e importando datos de una simulación a otra.

La finalidad de este trabajo es el estudio del comportamiento de los conductores de una línea eléctrica que están sometidos a distintas condiciones ambientales a lo largo de su longitud, como se ha comentado en apartados anteriores, uno de los parámetros más importantes a estudiar es la magnitud y dirección del viento, ya que para calcular la temperatura de operación del conductor es el parámetro, que, junto con la temperatura ambiente, más cambios va a provocar. Es por eso, por lo que para realizar la simulación he escogido la sección Fluent dentro del programa ANSYS.

Las capacidades que proporciona ANSYS Fluent de modelado físico son modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales. Estas capacidades engloban multitud de casos para simular que pueden ir desde el flujo de aire que actúa sobre la pala de un aerogenerador, pasando por el flujo de sangre a través de las venas o el diseño de semiconductores y acabando por la transferencia de calor que se produce en el proceso de combustión de un horno. En la simulación que se va a realizar en este trabajo el punto clave es el flujo de aire (viento) al que se ve sometido el conductor por lo que se trata de la herramienta ideal para realizar la simulación.

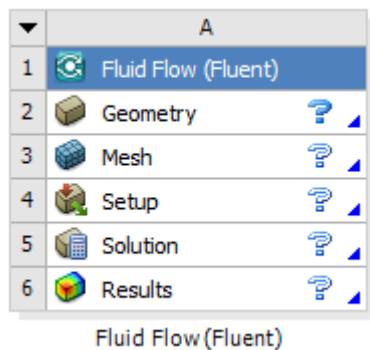


Figura 4.1 ANSYS Fluent

En la figura superior podemos ver el menú de ANSYS Fluent, este programa permite al usuario importar la geometría de otros programas de CAD o generar y/o modificar la geometría en el propio programa en la sección de 'Geometry'. También cuenta con una sección de mallado 'Mesh', en esta sección es en la cual se van a poder modificar propiedades en el mallado pudiendo seleccionar un mallado más fino en zonas donde se necesita que la simulación sea más precisa o mallado más gordo en aquellas zonas de la geometría en las cuales no se necesite conocer con tanta precisión lo que ocurre en ellas. En la sección de 'Setup' es en la cual se definen las condiciones a las que está sometida la geometría, por ejemplo, temperatura ambiente, magnitud y dirección del viento, tipo de flujo, etc. y en esta sección se definen las condiciones necesarias para realizar la simulación, como por ejemplo el número de iteraciones. Por último, en las secciones de 'Solution' y 'Results' es en las que podremos visualizar los resultados, ya sea en forma de gráficas o de visualizaciones sobre la geometría, en estas últimas también se podrá visualizar las partes que resulten más interesantes, sin necesidad de ver los resultados en toda la geometría.

4.2 ESCENARIO PRÁCTICO

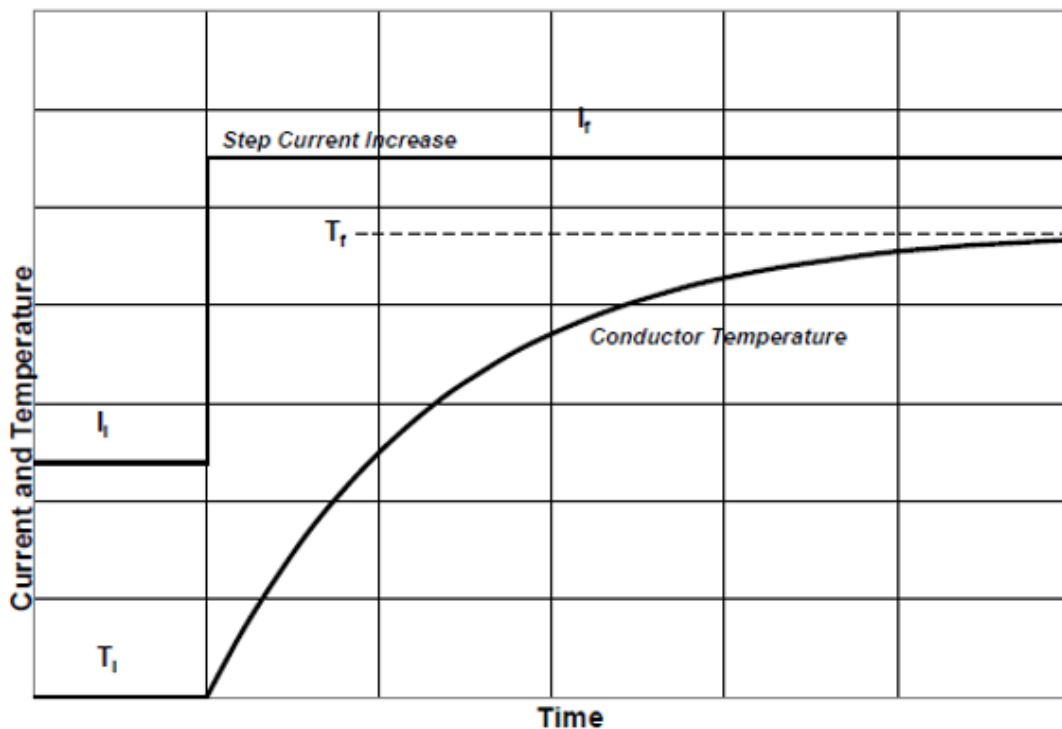
Para poder realizar las simulaciones necesarias, es imprescindible tener datos reales, tanto para poder introducir datos en el programa de simulación como variables de entrada, como para comparar los resultados obtenidos tras realizar la simulación con los datos reales.

En este trabajo, se cuenta con datos reales de una línea aérea que transporta 220 kV y a la que se la han instalado siete estaciones meteorológicas a lo largo de toda su longitud para avanzar en el conocimiento de la explotación dinámica de las líneas. El objetivo de conocer los datos de estas estaciones es que, al encontrarse ubicadas a lo largo de toda la línea, los valores obtenidos a través de ellas van a ser más exactos que si se consideran los datos obtenidos de rates estáticos. Otro punto a favor del uso de estaciones meteorológicas en las líneas es su capacidad de ofrecer valores efectivos sobre la línea, un claro ejemplo de esto se observa en el caso del viento, no es lo mismo una determinada magnitud de viento actuando perpendicularmente sobre el conductor que la misma magnitud de viento actuando en una dirección casi paralela al eje del conductor.

A la hora de calcular la capacidad de transporte estacionaria de la línea, no se tienen en cuenta las condiciones iniciales que presenta el conductor, esto quiere decir que se despreciará su inercia térmica, este problema es significativo a la hora de realizar la simulación ya que el conductor no se va a comportar de la misma manera si lleva una hora sometido a la misma

temperatura ambiente y dirección de viento que si diez minutos antes a la medida, se ha producido un cambio en alguna de estas variables. Este problema se soluciona más en profundidad en el próximo apartado.

En la siguiente gráfica obtenida de IEEE 738 se observa cómo evoluciona la temperatura del conductor cuando se produce un cambio en la corriente que circula a través del conductor, como se puede ver el cambio no es instantáneo, si no que necesita de un periodo de tiempo hasta establecerse en un valor definitivo.



Gráfica 4.1 Inercia térmica del conductor ante un cambio en el corriente

Los datos que se van a tener en cuenta a la hora de realizar este trabajo proporcionados por las estaciones meteorológicas son el número de estas mismas, para diferenciar cuales son las que están cercanas unas a otras y las que se encuentran en extremos distintos de la línea, la velocidad y dirección del viento, la dirección viene expresada en grados con respecto a la dirección del eje del conductor, la radiación solar y la temperatura ambiente. Además de estas variables, todas ellas relacionadas con las condiciones ambientales que rodean a la línea, se han monitorizado los valores de la temperatura a la que opera el conductor y la corriente que transporta.

Los datos que se tienen en cuenta se han obtenido a través de las siete estaciones meteorológicas con un margen de diez minutos entre medida y medida durante el tres de marzo de 2013 y el uno de abril de 2013.

4.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR

El conductor al que se le han realizado las medidas es el OPPC 395-AL 1/53-A20SA, 8G 652.D(LL)+26.655, conocido comercialmente como 'condor', se trata de un conductor trenzado

compuesto por 61 cables, siete de ellos son de acero y son conocidos como el alma del conductor, es la parte central del cable alrededor de la cual se depositan el resto y es la encargada de soportar los esfuerzos mecánicos a los que va a estar sometido el conductor, un cable está recubierto de aluminio y el resto de los cables que forman el conductor (53), son de aluminio, estos cables son los encargados de conducir la corriente eléctrica, ya que esta se reparte en su mayor parte sobre los cables exteriores.

A continuación, se adjuntan los valores característicos del conductor:

- Diámetro del cable de acero: 3.10 mm
- Diámetro del cable recubierto de aluminio: 3.00 mm
- Diámetro del cable de aluminio: 3.08 mm
- Diámetro total: 27.8 mm
- Sección del conductor: 447.2 mm²
- Resistencia nominal a la tracción: 128.6 kN
- Módulo de elasticidad: 67.6 kN/mm²
- Coeficiente de expansión linear: $20.2 * 10^{-6} K^{-1}$
- Resistencia: 0.069 Ω /km
- Límite estático establecido: 944 A
- Temperatura de operación normal: 85 °C
- Temperatura de operación de emergencia: 100°C durante 20 minutos

5. MODELO DE VALIDACIÓN

El paso previo a la simulación es crear un modelo de simulación, el objetivo de realizar este paso es asegurarse de que el modelo que utilizaremos posteriormente funciona, es decir, con los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas realizamos una pequeña simulación en ANSYS, en ésta, únicamente comprobaremos la temperatura del conductor cuando actúen sobre él unas determinadas condiciones ambientales, la temperatura a la que deberá estar el conductor es un dato que ya se conoce, por lo que, cuando se realice la simulación, se podrán comparar y decidir si los resultados obtenidos son aceptables o si se deben realizar cambios hasta lograr el resultado deseado, esto es muy útil, ya que, en nuestro caso, a la hora de realizar la simulación final, en la que se quiere observar el comportamiento del conductor sometido a distintas condiciones ambientales, no conocemos los resultados, y a no ser que estos fuesen muy exagerados sería imposible saber si los resultados son correctos o no.

A la hora de realizar el modelo final, este debe estar basado en el modelo de validación para que se comporten de manera igual.

A continuación se explicará paso a paso como se ha realizado el modelo de validación, que se ha realizado para tres condiciones de funcionamiento distintas, con una temperatura ambiente baja, una temperatura ambiente media y una temperatura ambiente alta, para verificar que la simulación responde bien ante todas las condiciones a las que va a estar sometido el conductor, como la metodología para realizarlas es la misma, solo se explicará un caso de los tres y finalmente se expondrán los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

5.1 GEOMETRÍA

El primer paso para realizar la simulación es definir la geometría, en este caso la geometría se realizará con la herramienta de ANSYS 'DesignModeler', al tratarse de una geometría sencilla no hará falta realizarla en programas de CAD más especializados e importarla posteriormente.

Una vez hemos entrado en el 'DesignModeler', nos situaremos en el plano XY para que sea más sencillo dibujar la geometría, esta se dividirá en tres partes, un cilindro de acero de 9.3 mm de diámetro, un cilindro de aluminio de 27.7 mm de diámetro, y un volumen de aire que en su interior contendrá a los dos cilindros, sus dimensiones son de 1 m por 1 m y 0.3 m de profundidad. El conductor real está formado por cables, en la simulación consideraremos al acero y al aluminio como un conjunto macizo y no se tendrán en cuenta el aire que podría estar en el interior, ya que los resultados variarían en una cantidad muy pequeña.

Inicialmente dibujaremos cada uno de los elementos (cilindros y volumen) creando un sketch para cada uno de ellos, para realizar este paso deberemos seleccionar la opción que se muestra en la figura 5.1 rodeado con un círculo rojo.

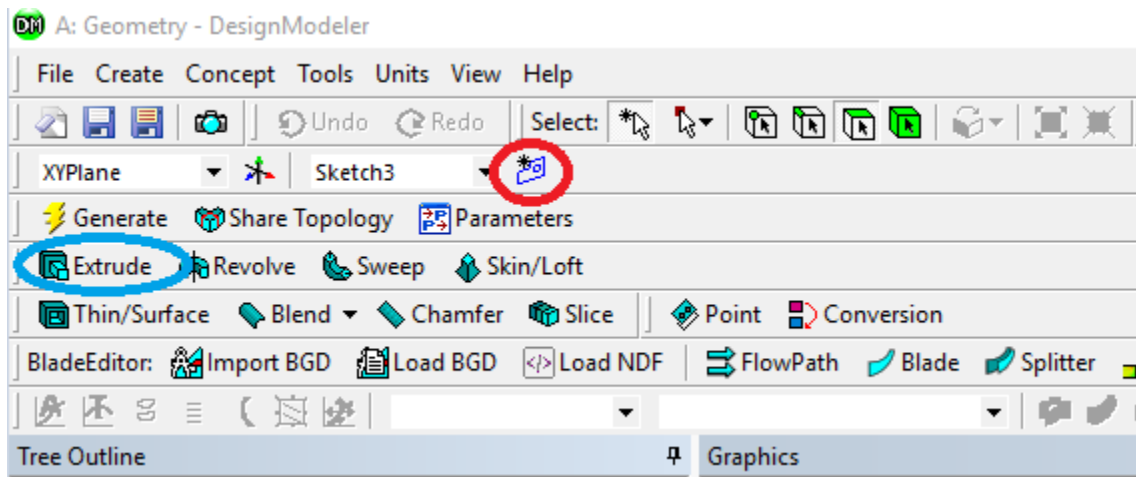


Figura 5.1 DesignModeler de ANSYS, crear un nuevo sketch y extruir una geometría creada

Dentro de cada sketch podremos definir la geometría que deseamos, el siguiente paso consiste en darle profundidad a la geometría realizada, para ello seleccionaremos la opción 'extrude', rodeada con un círculo azul en la figura 5.1. En la figura se muestra la extrusión del cilindro de acero, sería igual en los dos casos restantes.

La siguiente figura muestra la pantalla que se debe modificar para extruir un objeto, en el apartado 'Operation' se debe elegir 'Add Frozen', en el de 'Direction' está elegido 'Normal' ya que, en este caso es el más indicado pero en el modelo final se usará otro, lo que hace éste es extruir la geometría seleccionada en la dirección del eje z en el sentido positivo, existen otras posibilidades que en distintos casos puede ser interesante su utilización que son 'Reversed', en esta opción realizaría lo mismo que en la anterior pero en el sentido opuesto, 'Both-Symmetric', en la que te genera la extrusión en las dos direcciones del eje seleccionado y 'Both-Asymmetric', funciona igual que la anterior pero se pueden definir distintas longitudes a lo largo del sentido positivo del eje y del sentido negativo y por último, 'Depth' es la profundidad, que puede parecer poco 0.3 m pero en pasos posteriores se crearán condiciones de periodicidad, y con estas condiciones se conseguirá que las condiciones representadas en este volumen sean las mismas que existirán en sus extremos aunque no se visualicen.

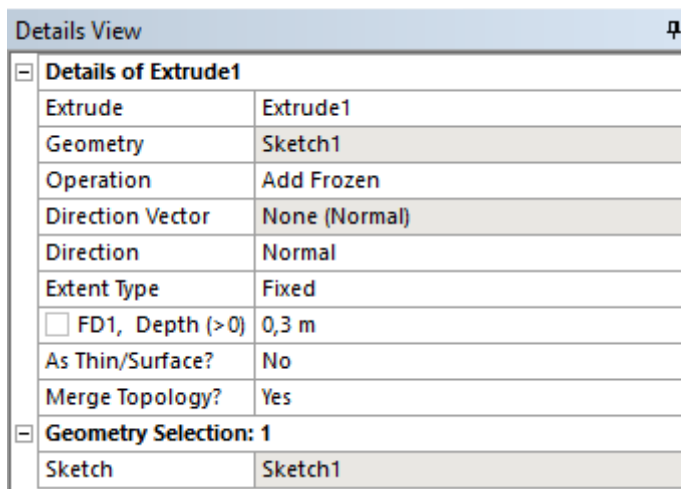


Figura 5.2 Configuración para definir una extrusión

A continuación, debemos separar cada volumen del resto, ya que, hasta este momento, se trata de un único volumen. Seleccionando la opción 'Boolean' como se muestra en la imagen, y posteriormente dentro de esta opción, seleccionamos 'Subtract' (substraer), nos permite separar los volúmenes seleccionados y finalmente, en '¿Preserve Tool Bodies?' seleccionamos la opción 'Yes', ya que, si no, nos eliminaría uno de los cuerpos.

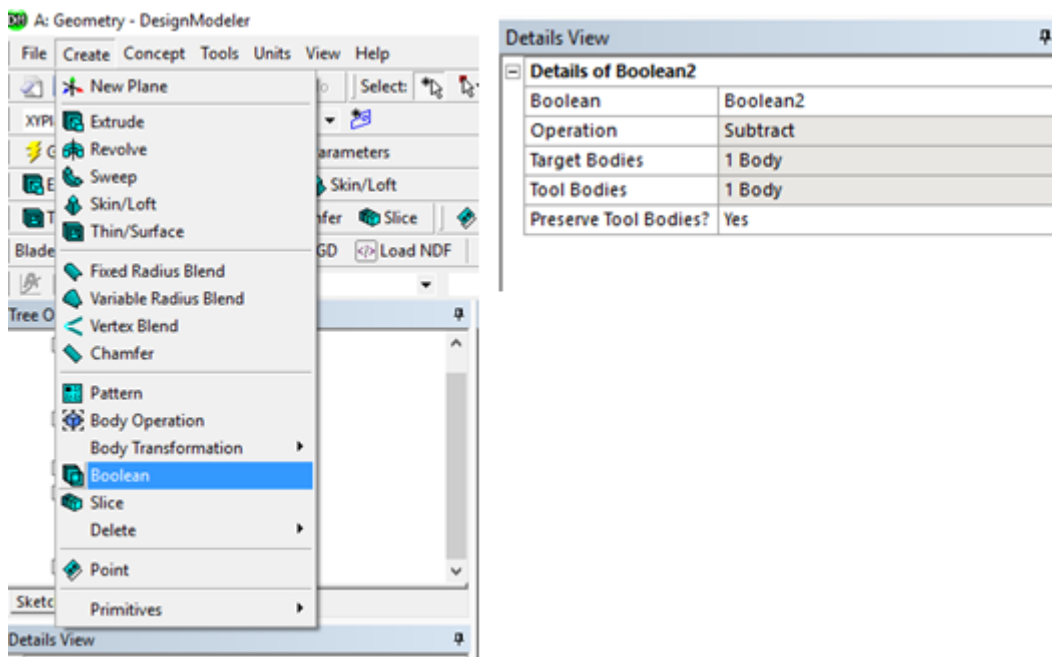


Figura 5.3 Realización de la operación 'Boolean'

Una vez definidos los diferentes cuerpos que forman el modelo, definimos que los dos cilindros son sólidos y el volumen de aire un fluido, para ello en el árbol principal del programa, los seleccionamos y definimos esta opción en el apartado 'Fluid/Solid', también podemos cambiar el nombre de cada elemento para identificarlo de forma más cómoda en el apartado 'Body', en este caso al volumen de control se le ha asignado el nombre de aire, al alma de acero del conductor se le denomina acero y al cilindro que simula las capas de aluminio por el que circulará la corriente se denomina aluminio.

Details View		Details View		Details View	
Details of Body		Details of Body		Details of Body	
Body	aire	Body	aluminio	Body	acero
Volume	1,1998 m³	Volume	0,00016067 m³	Volume	2,0379e-05 m³
Surface Area	10,425 m²	Surface Area	0,035962 m²	Surface Area	0,0089009 m²
Faces	7	Faces	4	Faces	3
Edges	14	Edges	4	Edges	2
Vertices	8	Vertices	0	Vertices	0
Fluid/Solid	Fluid	Fluid/Solid	Solid	Fluid/Solid	Solid
Shared Topology Method	Default	Shared Topology Method	Default	Shared Topology Method	Default
Geometry Type	DesignModeler	Geometry Type	DesignModeler	Geometry Type	DesignModeler

Figura 5.4 Definir cada uno de los cuerpos como sólido o fluido

EL último paso dentro de la geometría es crear una nueva parte constituida por los tres elementos, para ello con el botón derecho del ratón seleccionamos sobre el dibujo la opción 'Form new part' e incluimos todos los elementos que forman la geometría (aire, acero y aluminio), este paso, a la hora de realizar el mallado, nos va a permitir que sea continuo cuando

pase de un elemento a otro sin que existan grandes diferencias entre el mallado generado en el acero, aluminio o aire.

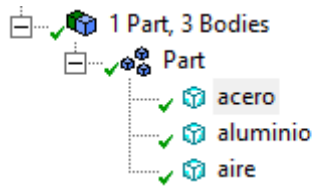


Figura 5.5 Formar nueva parte

En la figura 5.6 podemos observar el resultado final de la geometría después de realizar todos los pasos anteriores:

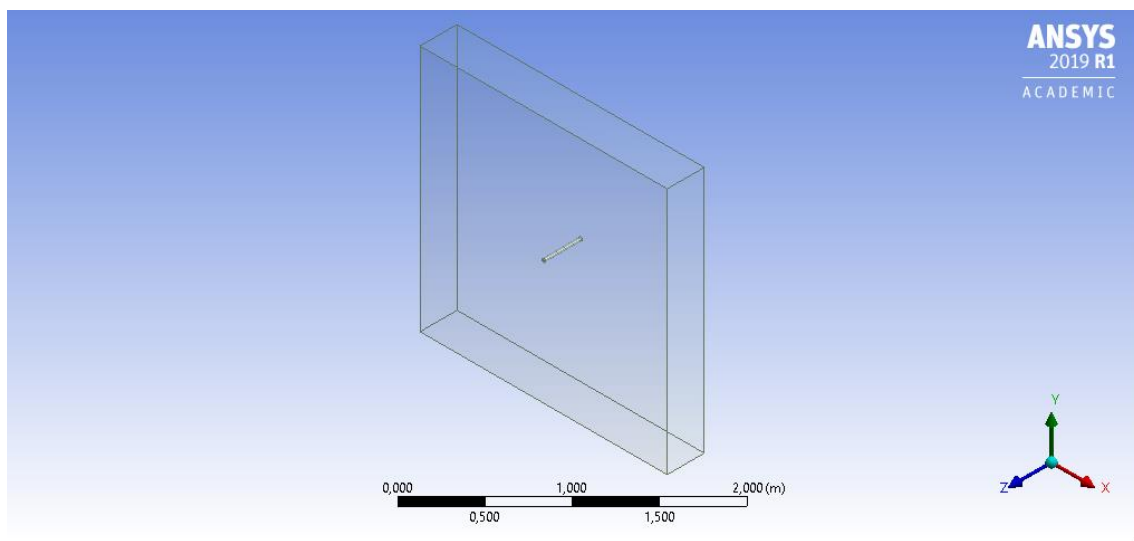


Figura 5.6 Geometría de un conductor rodeado de un volumen de control

5.2 MALLADO

Una vez definida la geometría volvemos a la página principal de ANSYS, y nos saldrá un tic en verde sobre la geometría indicando que este apartado está listo, sobre el apartado de 'Mesh' (mallado), aparecen dos flechas de color verde, esto significa que debe actualizarse para que se actualice con la geometría generada. Seleccionado la opción 'Mesh' se abrirá la interfaz de ANSYS Icem CFD desde la cual podremos realizar cambios en el mallado.

El primer paso en el mallado es dan nombre a las distintas caras que forman la geometría. Debemos indicar que deseamos seleccionar las caras como se muestra en la imagen, una vez realizado este paso pinchamos sobre cada cara de la geometría y seleccionamos la opción 'Create Named Selection'.

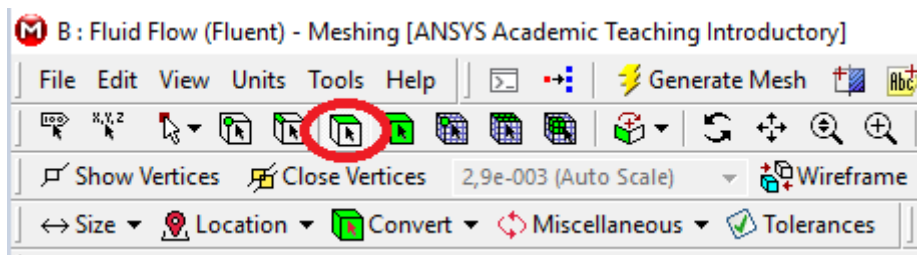


Figura 5.7 Fluent Flow, seleccionar caras

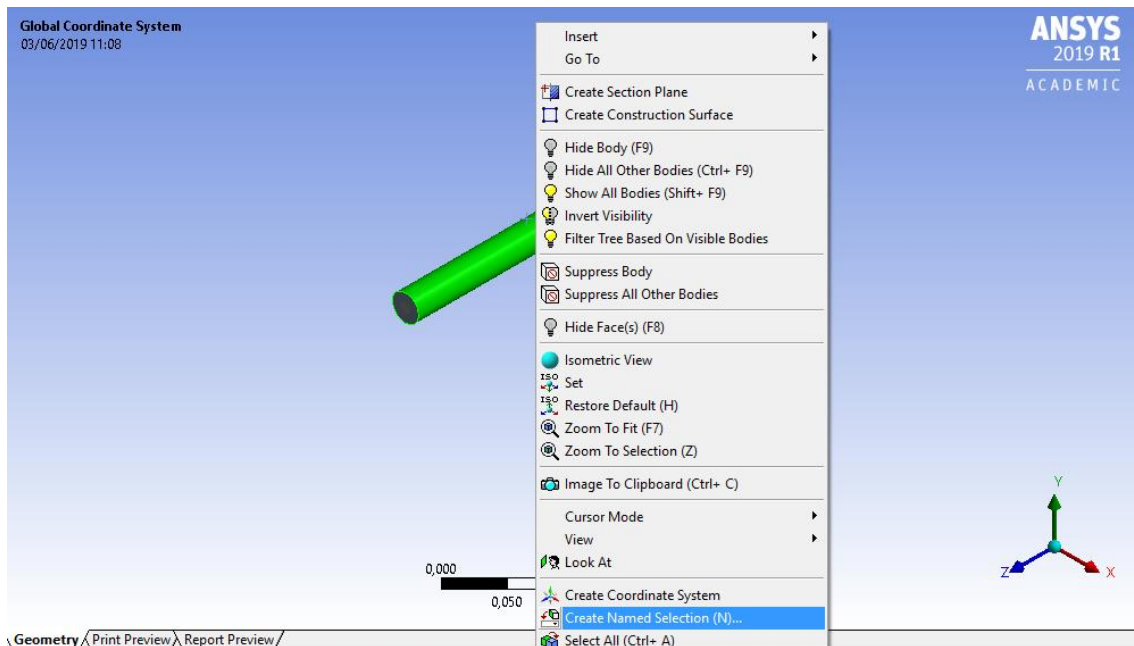


Figura 5.8 Definir nombre de la geometría seleccionada

Las diferentes zonas que se han definido en la geometría son:

- Simetría: son las zonas que nos permitirán crear una zona periódica.
- Entrada viento: en esta zona se definirán las condiciones de entrada del viento.
- Salida viento: en esta zona se definirán las condiciones de salida del viento.
- Contacto aire aluminio.
- Contacto aluminio acero.

Las zonas de simetría son aquellas que se encuentran en los extremos perteneciendo a ellas las caras tanto del aluminio, del acero y del aire. Son aquellas caras en las que el conductor se corta, pero en realidad ese conductor continúa por ambas partes, definiendo las tres caras pertenecientes a simetría 1 o a simetría 2 podremos simular su periodicidad.

También se han definido los nombres de los sólidos que aparecen indicados con un cubo de color verde, como se puede observar en la figura 5.9:

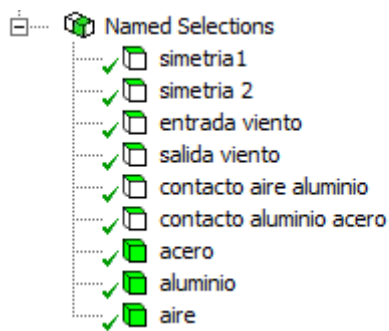


Figura 5.9 Nombres de la geometría creada

A continuación, realizaremos un nuevo sistema de coordenadas que nos permita realizar la periodicidad posteriormente. Para ello, lo situaremos en la zona llamada simetría 1, ya que el sistema de coordenadas global se encuentra en la zona simetría 2.

Seleccionando en el árbol sobre 'Coordinate Systems', 'Insert' y 'Coordinate system' crearemos un nuevo sistema de coordenadas, para elegir el lugar en el cual queremos que se encuentre le seleccionamos y cambiamos las coordenadas como se muestra en la figura 5.10.

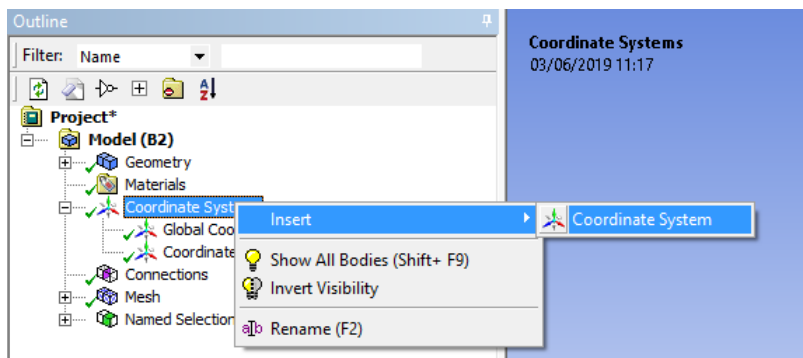


Figura 5.10 Insertar sistema de coordenadas

Details of "Coordinate System"	
[-] Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System	Program Controlled
APDL Name	
Suppressed	No
[-] Origin	
Define By	Global Coordinates
Origin X	0, m
Origin Y	0, m
Origin Z	0,3 m
Location	Click to Change
[-] Principal Axis	
Axis	X
Define By	Global X Axis
[-] Orientation About Principal Axis	
Axis	Y
Define By	Default
[+] Directional Vectors	
[-] Transformations	
Base Configuration	Absolute
Transformed Configuration	[0, 0, 0,3]

Figura 5.11 Definir situación de un nuevo sistema de coordenadas

Este sistema de coordenadas está definido a partir del sistema global, por lo que su origen en los ejes X e Y es cero y en el eje Z será 0.3 m ya que es la profundidad que le hemos dado a la geometría.

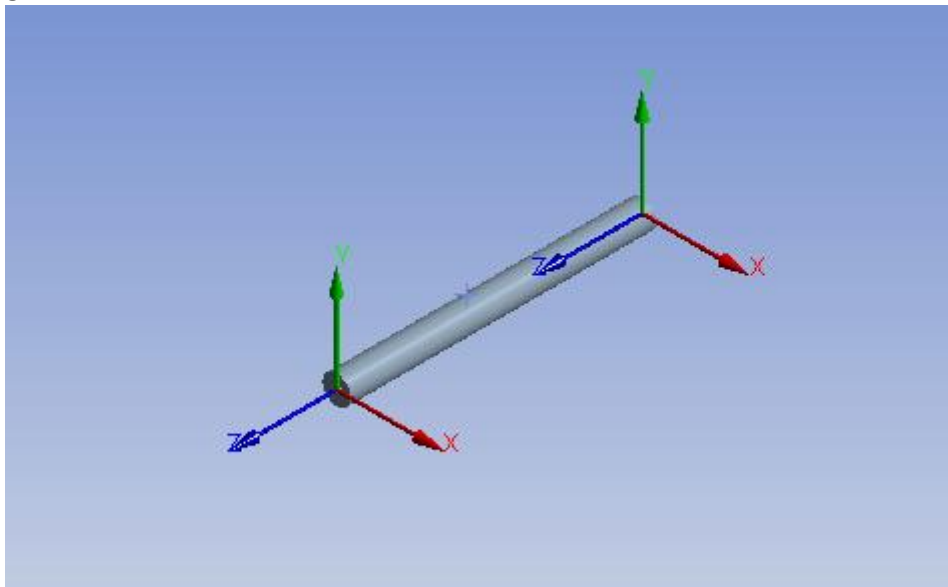


Figura 5.12 Nuevo sistema de coordenadas dentro de la geometría creada

Los dos sistemas de coordenadas quedarán dispuestos tal y como se muestra en la figura 5.12.

Otro punto importante en el mallado es que las dos partes definidas como simetría tengan el mismo mallado, para que cuando se defina la periodicidad encajen perfectamente. Para ello deberemos crear un 'Match Control' entre ambas partes.

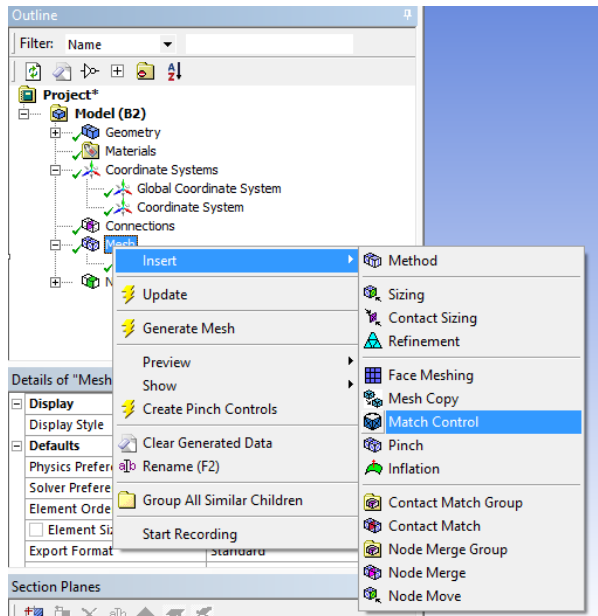


Figura 5.13 Creación de un nuevo 'Match Control'

En las figuras 5.13 y 5.14 se muestran los pasos que debemos seguir, en el apartado 'High Geometry Selection' las tres caras seleccionadas son las pertenecientes a la simetría 1 y en 'Low Coordinate Selection' las tres caras seleccionadas son las pertenecientes a la simetría 2.

Una vez realizados todos estos pasos , el programa está listo para generar el mallado. En las siguientes figuras se muestra el resultado. En la figura 5.15 se puede observar la geometría completa y se ve claramente que el mallado es mucho más fino en la zona del conductor y en la

Details of "Match Control" - Match Control	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
High Geometry Selection	3 Faces
Low Geometry Selection	3 Faces
Definition	
Suppressed	No
Transformation	Arbitrary
High Coordinate System	Coordinate System
Low Coordinate System	Global Coordinate System
Control Messages	No

Figura 5.14 Definir características de un nuevo 'Match Control'

figura 5.16 se ha hecho un zoom a la zona del conductor para poder observarle con más claridad.

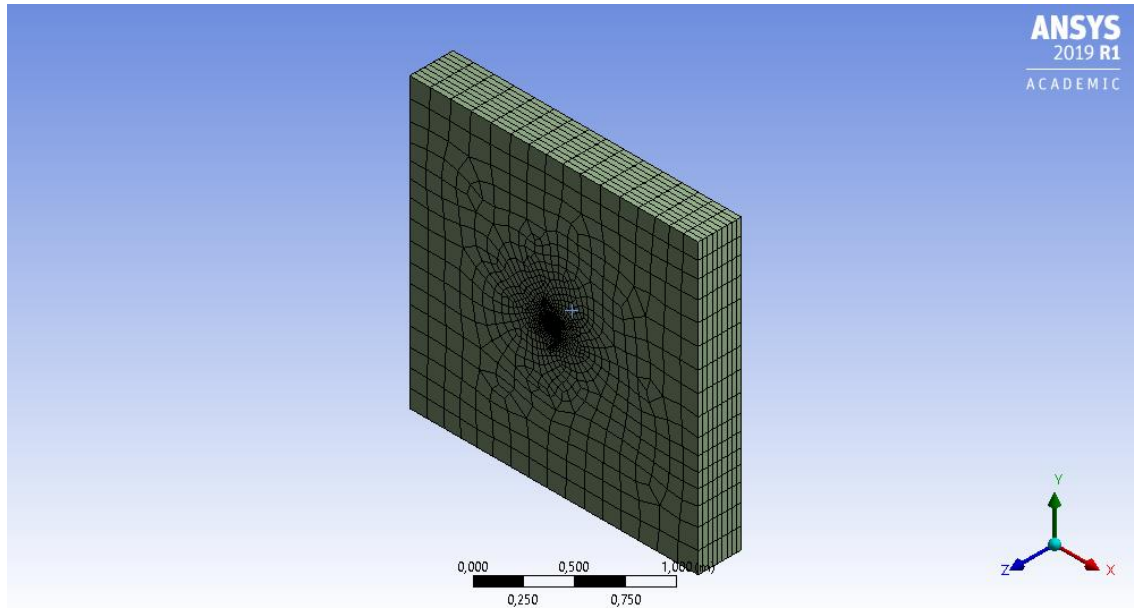


Figura 5.15 Mallado de la geometría creada

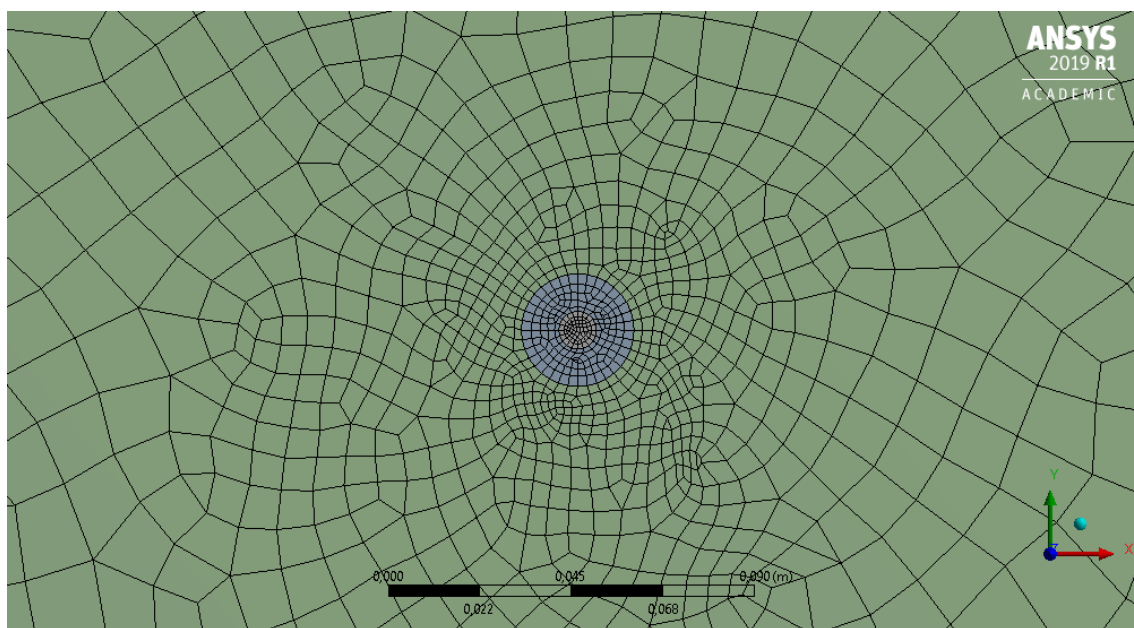


Figura 5.16 Mallado creado en el extremo del conductor

En la figura 5.16 podemos observar claramente como el mallado es continuo cuando pasa desde el acero al aluminio y cuando pasa desde el aluminio al aire, esto es gracias a que en la geometría definimos los tres cuerpos como una parte.

En la siguiente figura (5.17), se muestra una comparativa del mallado en la simetría 1 y en la simetría 2, al crear el 'Match Control' con iguales pero girados 180 grados, ya que, se encuentran en partes opuestas de la geometría. En la parte derecha se encuentra el mallado perteneciente a la simetría 1 y en la parte izquierda el mallado perteneciente a la simetría 2.

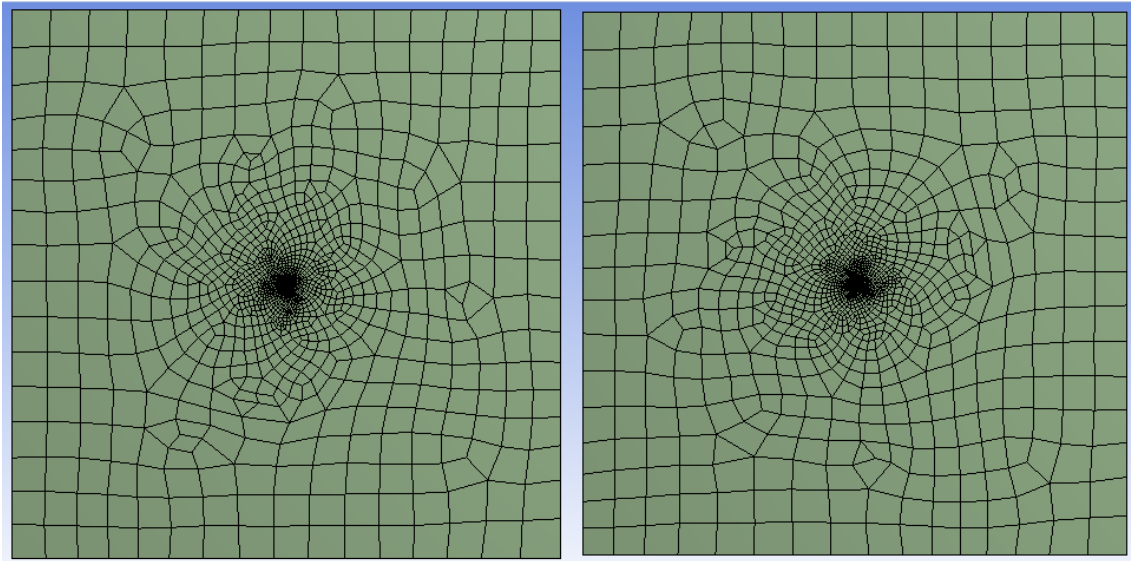


Figura 5.17 Comparación del mallado creado a ambos extremos del conductor

5.3 SIMULACIÓN

Una vez realizado el mallado, deberemos empezar con la simulación, en la página principal de ANSYS aparecerá el apartado de 'Mesh' con un tic verde y el apartado 'Setup' listo para configurarlo.

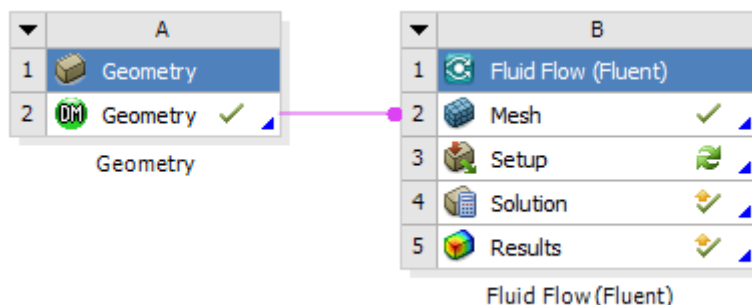


Figura 5.18 Selección del Setup en ANSYS Fluent

Haciendo doble click sobre 'Setup' se inicia Fluent Launcher, en el Setup vamos a ser capaces de definir las condiciones a las que se ve sometido el conductor, a continuación, se van a enumerar los pasos a seguir para configurar la simulación, se van a realizar tres simulaciones distintas, a temperaturas bajas, medias y altas. Para que el trabajo no sea repetitivo se explicará en profundidad como ha de procederse con la simulación con una temperatura baja, y con las temperaturas media y alta únicamente se indicarán los datos y los resultados obtenidos.

Uno de los problemas de realizar la simulación es que es en estado estacionario y no se tiene en cuenta la inercia térmica, para resolver esta situación se han escogido tres medidas obtenidas de las estaciones meteorológicas que formasen entre las tres un periodo de tiempo en el que las condiciones a las que se ve sometido el conductor fuesen más o menos constantes, esto evita que los resultados se desvíen debido a la inercia térmica que presentaría el conductor si justo

antes de tomar la medida se hubiese producido algún cambio en alguna de las variables de entrada.

A continuación, en esta tabla, se recoge la variable y las tres medidas realizadas, así como su valor medio:

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	6	6	6	6
Velocidad del viento (m/s)	1.1	1.1	1.2	1.13
Radiación solar (w/m ²)	0	0	0	0
Temperatura ambiente (°C)	1.9	1.8	1.6	1.75
Dirección del viento	194.36	190.36	135.36	173.36
Corriente (A)	251.6	248	249.6	249.73
Temperatura del conductor (°C)	4.8	4.3	3.9	4.3

Tabla 5.1 Condiciones atmosféricas de la simulación a temperatura baja

La dirección del viento viene expresada en grados, el cero se sitúa en la dirección del eje del conductor, es decir si la dirección del viento es de 0 o 180 grados esta sería paralela al eje mientras que, si la dirección fuese de 90 o 270 grados, la dirección del viento sería perpendicular al eje del conductor.

Una vez seleccionamos 'Setup' aparece una ventana con la configuración básica, para realizar esta simulación vamos a dejar las condiciones que aparecen por defecto.

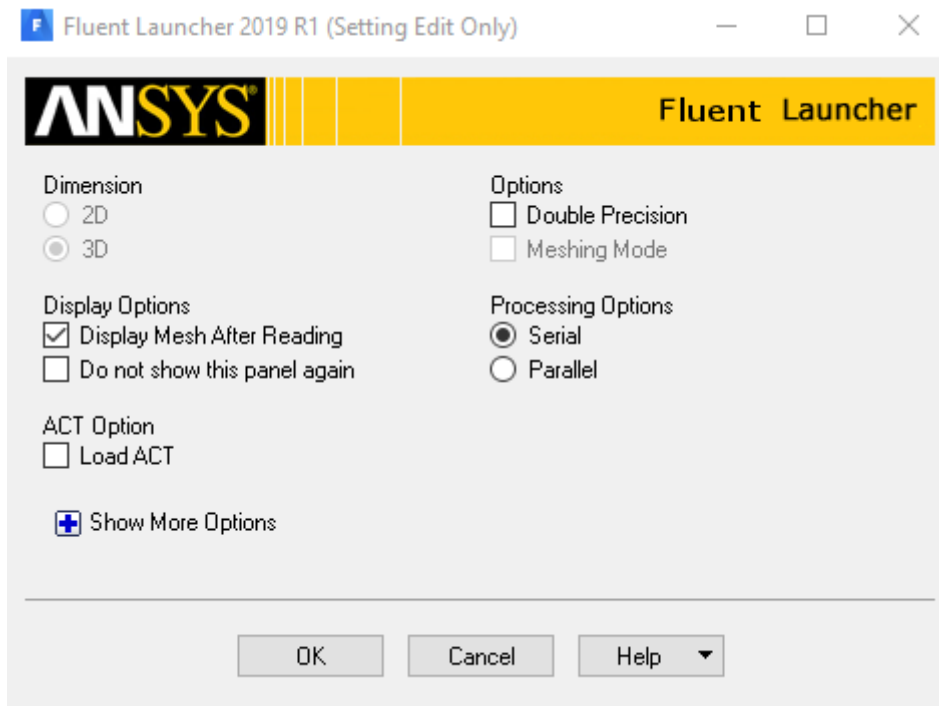


Figura 5.19 Fluent Launcher

Cuando ya estamos en el Fluent Launcher podemos empezar a definir las condiciones de la simulación.

El primer paso es establecer la aceleración de la gravedad en el eje y que será de -9.81 m/s².

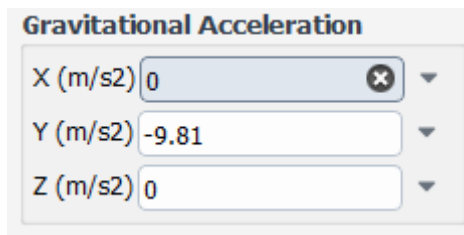


Figura 5.20 Gravedad

Después debemos configurar los modelos, dentro del programa hay multitud de modelos que se pueden configurar, para esta simulación solo necesitamos tres:

- Energía: como opción por defecto aparece deshabilitada, debemos dejarla en 'on'.
- Turbulencia: se va a elegir el modelo k- ω SST, este tipo de turbulencia es el más empleado para este tipo de simulaciones, en la siguiente figura se puede ver como seleccionarlo.

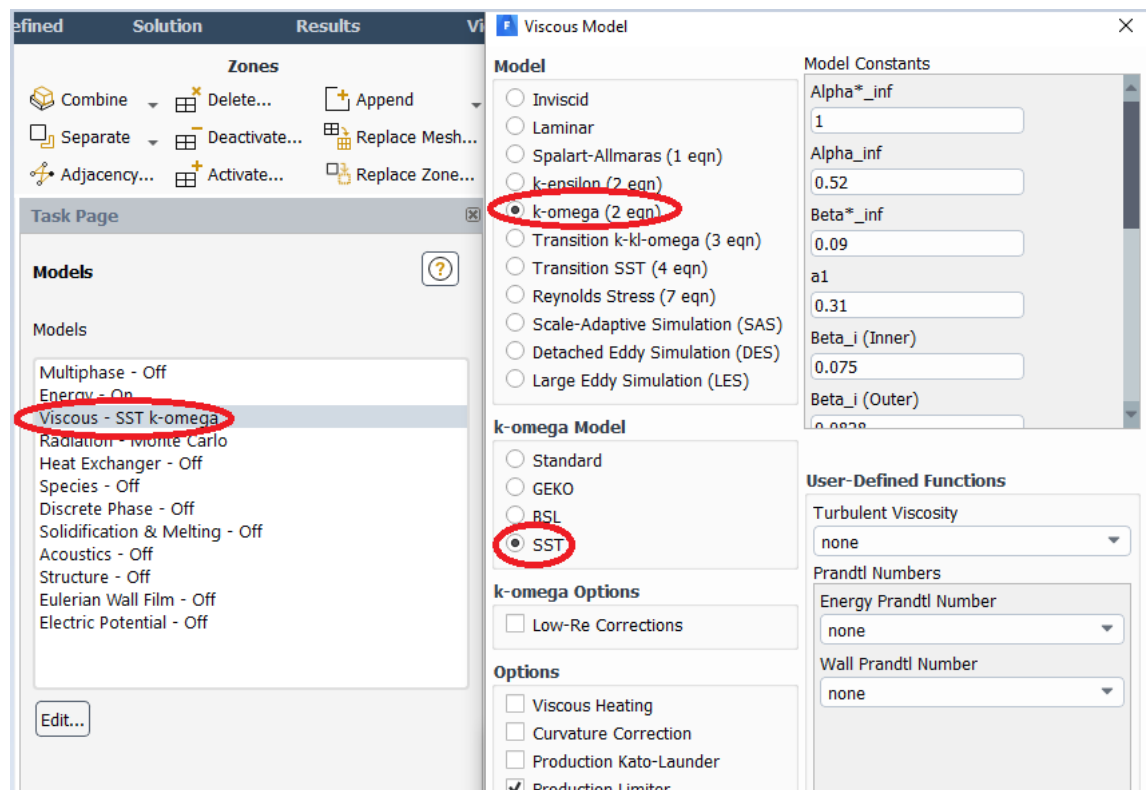


Figura 5.21 Modelo de viscosidad del viento

- Radiación: en este modelo introduciremos el valor de la radiación que recibe el conductor, en el caso de la temperatura baja es cero, aun así se introducirá para indicar como se hará en las siguientes simulaciones. Después de realizar pruebas con todos los modelos que ofrece ANSYS, se ha llegado a la conclusión de que el modelo escogido es el que más se adecua a la situación real.

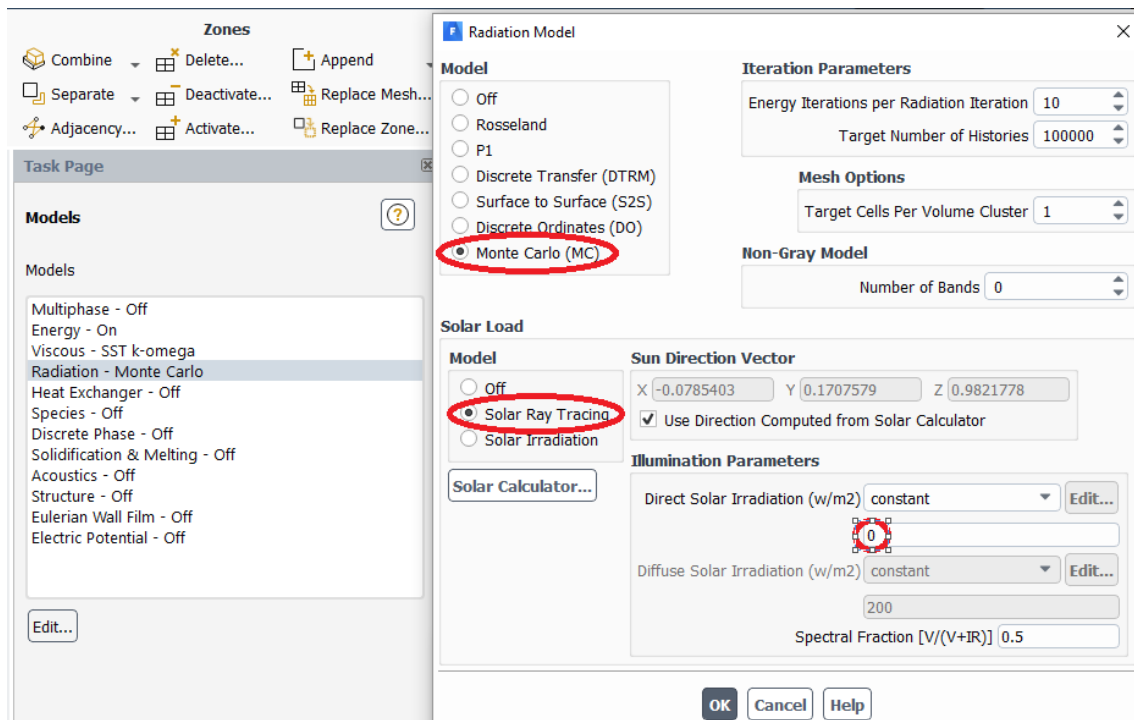


Figura 5.22 Radiación

Una vez definidos los modelos pasamos a 'Materials' (materiales), en la simulación aparecen tres tipos de materiales, el cilindro de menor diámetro es de acero y simula el alma del conductor, el cilindro de mayor diámetro es de acero y el volumen de control es de aire. Por defecto, vienen definidos los sólidos como aluminio y el fluido como aire, deberemos crear un nuevo material el acero, para ello lo importaremos de la biblioteca de materiales del programa, en la siguiente figura se muestra cómo hacerlo:

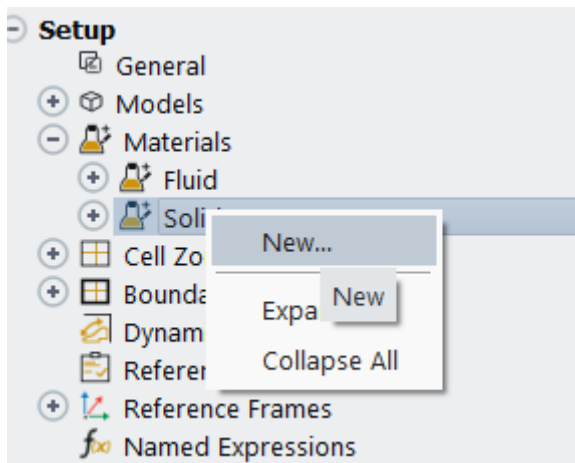


Figura 5.23 Creación de un nuevo material

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA AMPACID DE UNA LÍNEA SOMETIDA A MÚLTIPLES CONDICIONES AMBIENTALES

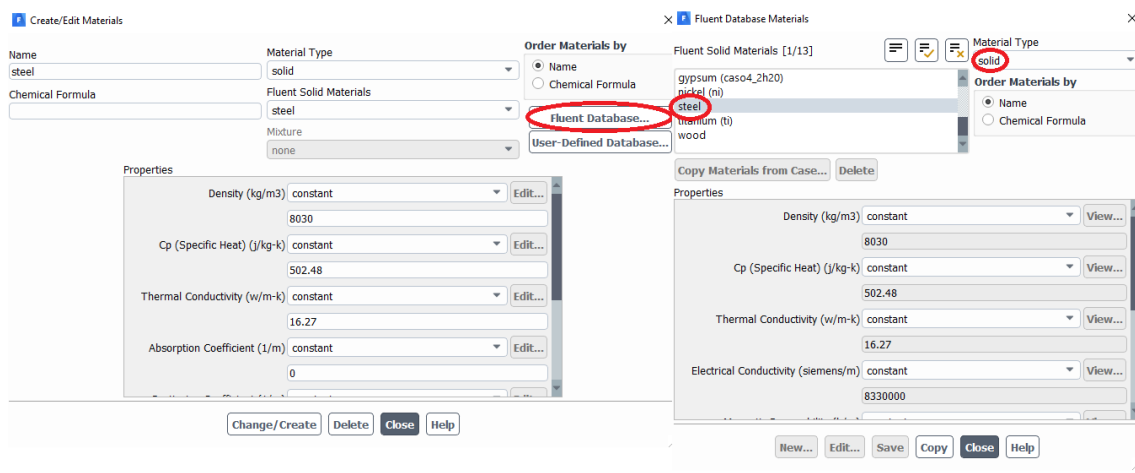


Figura 5.24 Selección de un nuevo material (acero)

A continuación, es la hora de definir las 'Cell Zone Conditions' (condiciones de contorno), en este apartado vamos a vincular cada geometría con su material correspondiente y asignaremos al aluminio la propiedad de generador de calor, ya que cuando circule por él una intensidad se calentará haciendo lo mismo con el aire que se sitúa a su alrededor.

Para calcular la generación deberemos aplicar la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{249.73^2 * 0.000069}{0.000395} = 10894.15 \text{ w/m}^3$$

Donde I es la corriente que circula a través del conductor medida en amperios, R es la resistencia por unidad de longitud (Ω/m) y s es la sección del cable de aluminio medido en m^2 .

En la siguiente figura se puede observar cómo proceder a la hora de definir las condiciones de contorno en el aluminio, en el acero y el aire sería igual a excepción de la radiación y la generación de calor ya que estas no existirían.

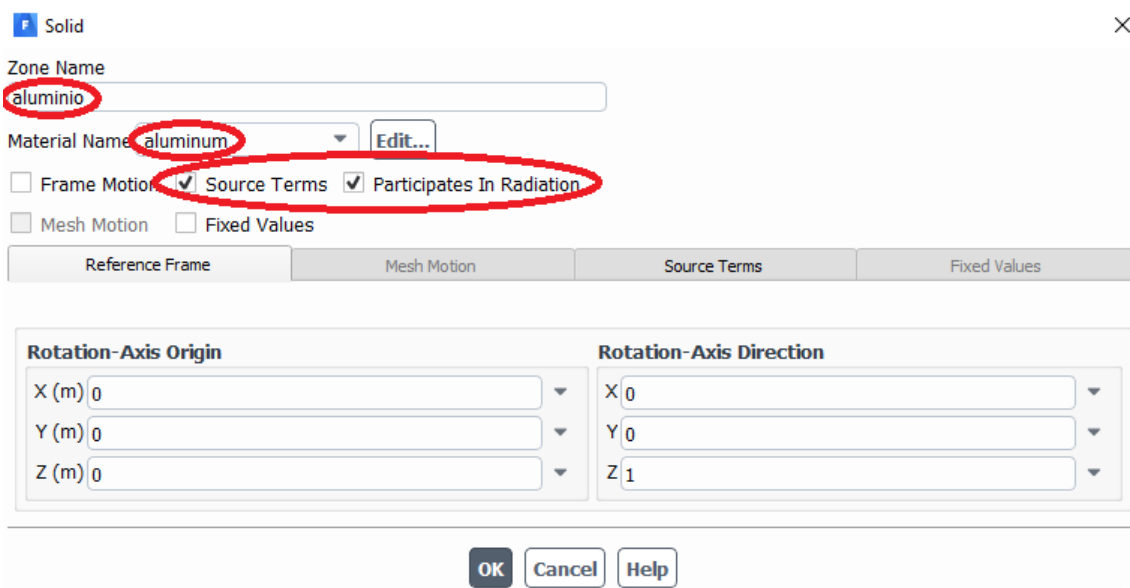


Figura 5.25 Condiciones de contorno de un material

En el apartado 'Zone Name' aparece el nombre asignado a la geometría en el apartado 'Mesh', cuando definimos el nombre de las caras y de los sólidos y en 'Material Name' debemos elegir el material que compone esta geometría.

También deberemos activar 'Source terms' y 'Participates in radiation', y, por último, deberemos introducir el valor del calor generado en el aluminio, 10894.15 w/m^3 .

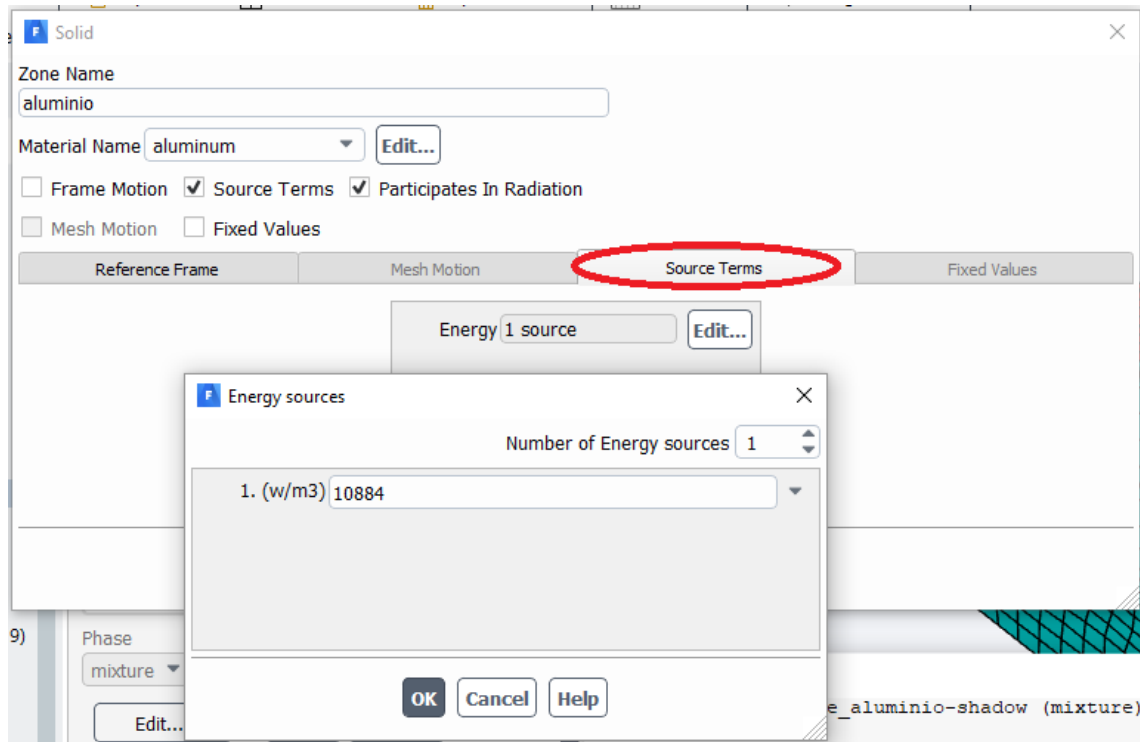


Figura 5.26 Fuente de calor de un sólido asignado a un material

Una vez definidas todas las condiciones de contorno, pasamos a las 'Boundary conditions', en este apartado vamos a definir todas las condiciones a las que está expuesto el conductor, dirección y magnitud del viento, temperatura ambiente, etc.

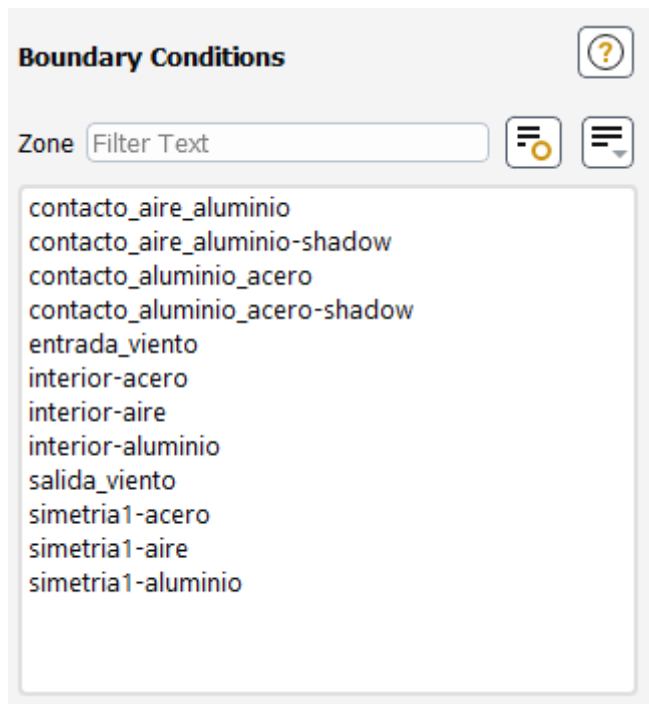


Figura 5.27 Boundary Conditions

Las distintas partes de la geometría están definidas como contacto, entrada o salida de viento, interior y simetría como se puede observar en la figura.

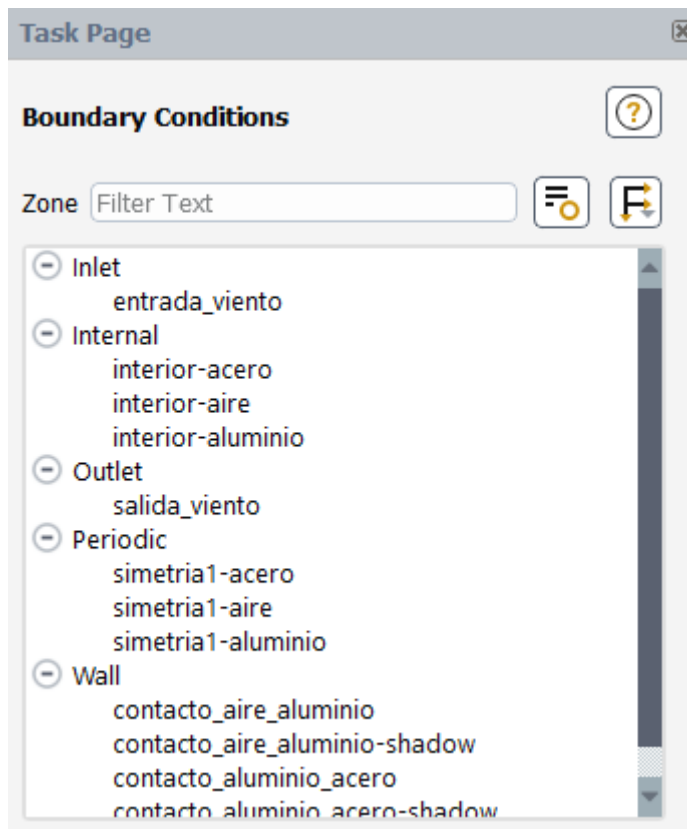


Figura 5.28 Partes de la geometría definidas con propiedades

- Entrada_viento: esta zona está definida como 'velocity inlet', ya que es la zona por la que entrará el viento en la simulación. A continuación, se muestra como introducir los datos.

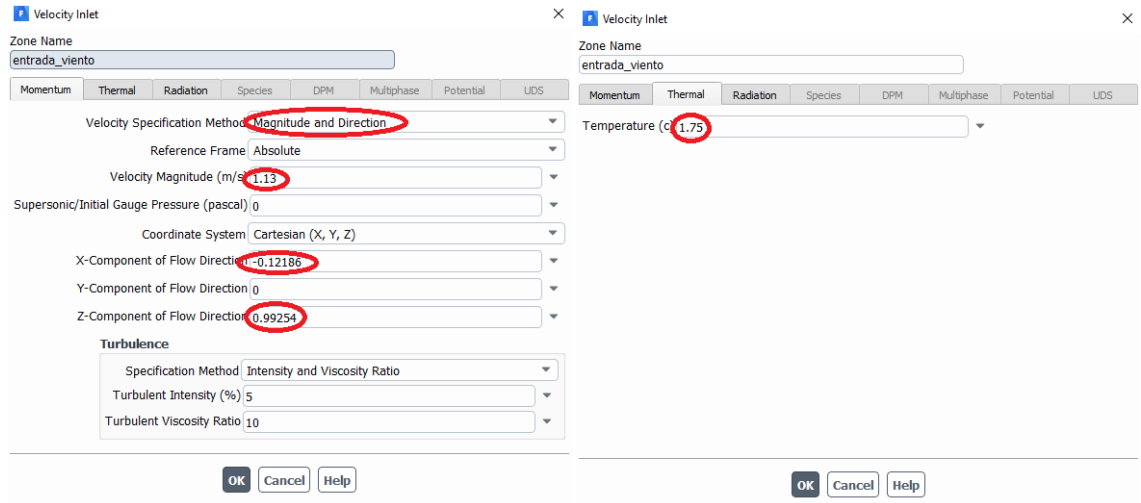


Figura 5.29 Configuración de las entradas de viento

El método de introducir el viento será por magnitud y dirección, en el apartado de 'Velocity Magnitude' introducimos el valor de la media de las tres medidas consideradas, para introducir la dirección del viento lo descomponemos en sus componentes en la dirección X y Z. Para obtener estos valores aplicamos las siguientes ecuaciones teniendo en cuenta los signos:

$$V_x = \sin(173) = -0.1216$$

$$V_z = \cos(173) = 0.9925$$

También debemos indicar la temperatura ambiente en el apartado 'Thermal', en este caso es de 1.75 °C.

- Salida de viento: esta zona está definida como 'Pressure-outlet', es la zona por la que saldrá el viento que entra por la entrada de viento, para que esto ocurra deberemos establecer una presión de cero pascales, y al igual que en la entrada de viento la temperatura ambiente será de 1.75 °C.

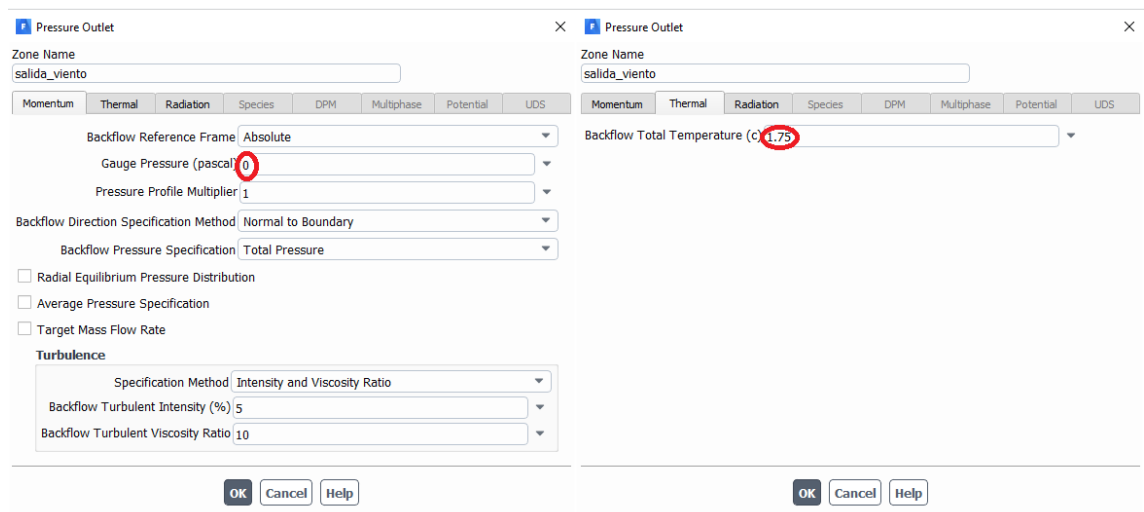


Figura 5.30 Configuración de las zonas definidas como 'Pressure Outlet'

- Contacto e interior: en estas zonas no hace falta cambiar los valores que aparecen definidos por el programa por defecto.
- Periodicidad: existirán tres zonas de periodicidad, llamadas como simetría, una para el acero, otra para el aluminio y otra para el aire, estas zonas nos permiten simular un conductor de longitud mucho más grande a los 0.3 m representados en la simetría para evitar que en los extremos se produzcan calentamientos que no suceden en la vida real debido a que el calor generado por el conductor quedase encerrado en la geometría. Para generarlo hay que realizar este proceso tres veces, una vez por cada material. En la consola de comandos introducimos el comando de la figura. La zona periódica y la zona de sombra son las caras de la geometría que queremos hacer periódicas.

```
/define/boundary-conditions/modify-zones> make-periodic
Periodic zone [()] 18
Shadow zone [()] 11
Rotationally periodic? (if no, translationally) [yes] n
Create periodic zones? [yes] y
```

Figura 5.31 Creación de una nueva zona periódica

Con este paso acabamos de definir las 'Boundary Conditions' y debemos realizar la simulación, en el apartado 'Solution' seleccionamos 'Initialization' y lo configuramos de la forma que se muestra en la figura, eligiendo 'Standard Initialization' y 'Compute from: all-zones', también debemos prestar atención a que la temperatura sea la que hemos definido en las 'Boundary Conditions':

Task Page

Initialization Methods

☐ Hybrid Initialization

☒ Standard Initialization

Compute from

all-zones

Reference Frame

☒ Relative to Cell Zone

☐ Absolute

Initial Values

X Velocity (m/s)

0

Y Velocity (m/s)

0

Z Velocity (m/s)

0

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)

0.004788375

Specific Dissipation Rate (1/s)

32.78059

Temperature (c)

1.749872

Figura 5.32 Inicialización de la simulación

Y por último realizamos el cálculo de la simulación en el apartado 'Run Calculation', el único parámetro que hay que cambiar es el número de iteraciones que estableceremos en 100.

5.4 RESULTADOS

Este es el último paso de la simulación en el que vamos a poder visualizar los resultados obtenidos para así poder analizarlos. En la página principal de ANSYS seleccionamos 'Result', en este momento 'Setup' ya aparece con el tic verde.

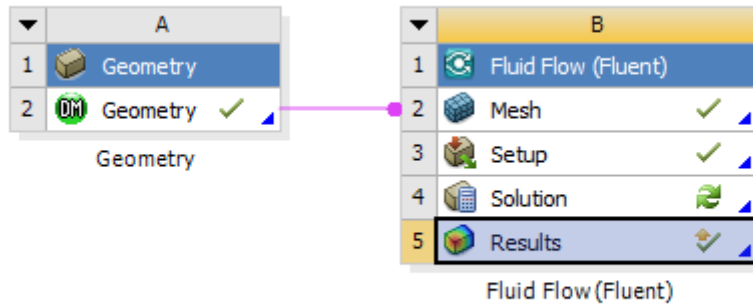


Figura 5.33 Selección de Resultados en ANSYS Fluent

Dentro de este apartado vamos a poder representar las gráficas que deseemos, en nuestro caso uno de los puntos más importantes es visualizar la temperatura del conductor y comprobar que la dirección del viento es la adecuada. Además, se pueden crear planos para visualizar las zonas que sean de interés, un ejemplo de esto sería crear un plano perpendicular al conductor y dibujar sobre él el contorno de la temperatura para observar como se comporta el aire situado alrededor del conductor.

En la siguiente figura se presenta rodeado con un círculo rojo cómo crear las visualizaciones, el primero, tres flechas, es utilizado para crear un vector, en esta simulación nos será de ayuda para visualizar las líneas de viento y el segundo, sirve para crear un contorno, que será utilizado para determinar la temperatura del conductor.

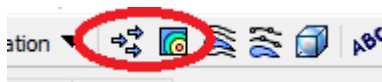


Figura 5.34 Creación de un nuevo contorno y un nuevo vector

Estos resultados se corresponden con la simulación a una temperatura baja.

- Representación de la temperatura del conductor.

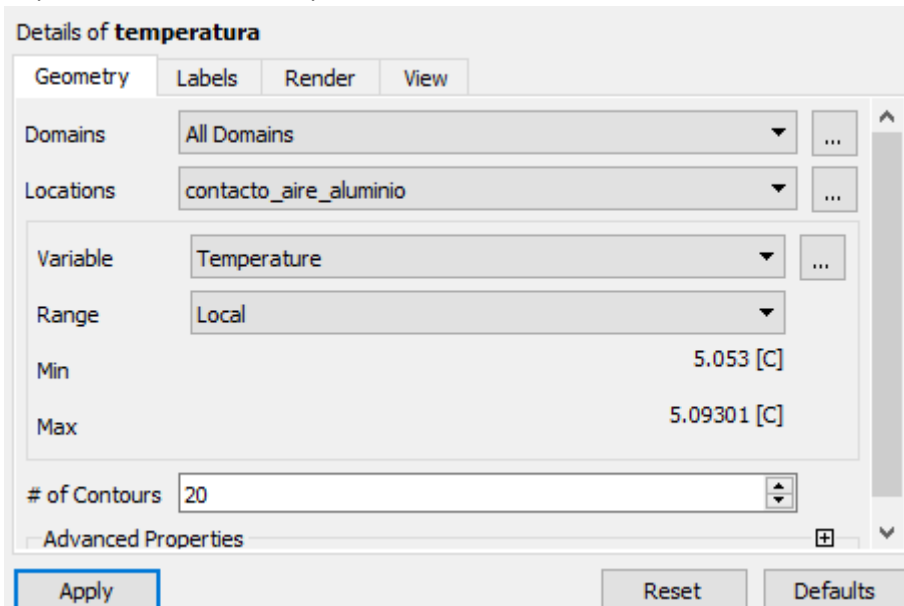


Figura 5.35 Definición de un contorno para visualizar la temperatura del conductor

La zona que nos interesa representar es la superficie del conductor, a la que hemos llamado 'contacto_aire_aluminio', se ha seleccionado rango local para que en la visualización podamos ver las diferencias de temperatura en el conductor y no aparezca un único color, para que se diera esta última situación deberíamos seleccionar rango global.

Como se puede observar en el fiigura 5.36, el conductor se encuentra a una temperatura media de 5.07 °C, aunque se visualicen muchos colores la diferencia entre el color rojo (el más caliente) y el azul (el más frío), es únicamente de 0.04°C.

La temperatura real del conductor es de 4.3 °C, en la simulación se calienta 0.77°C más.

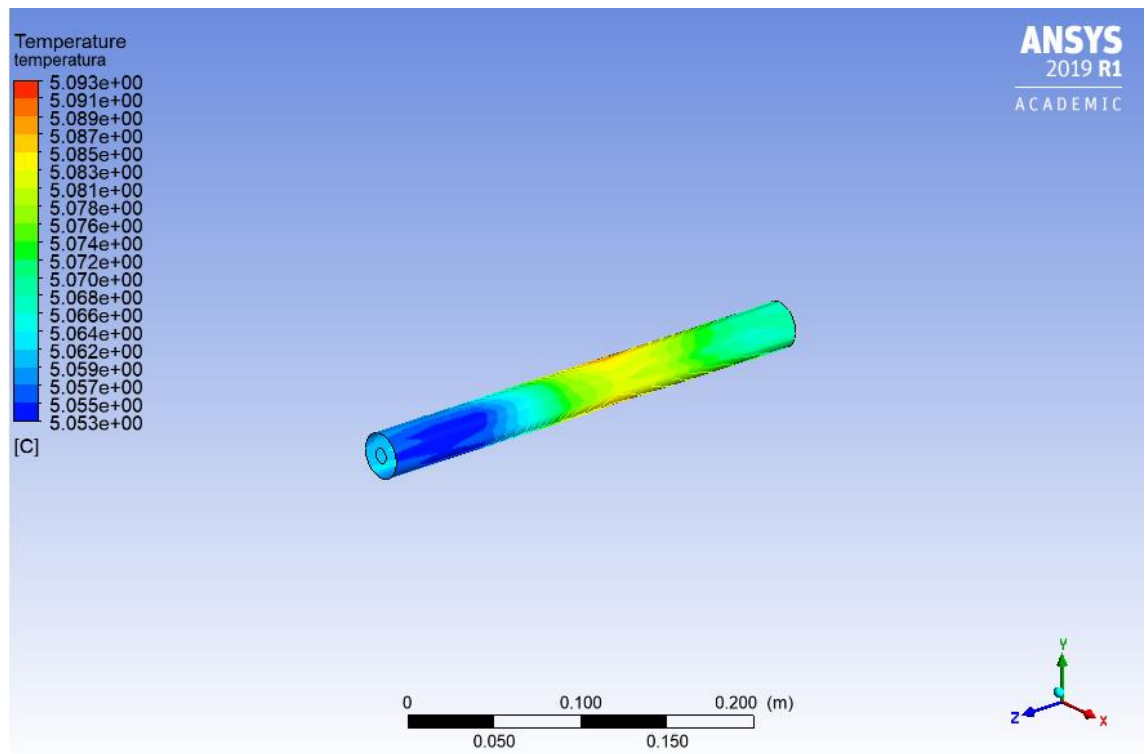


Figura 5.36 Temperatura del conductor en la simulación con temperatura baja

- Líneas de viento

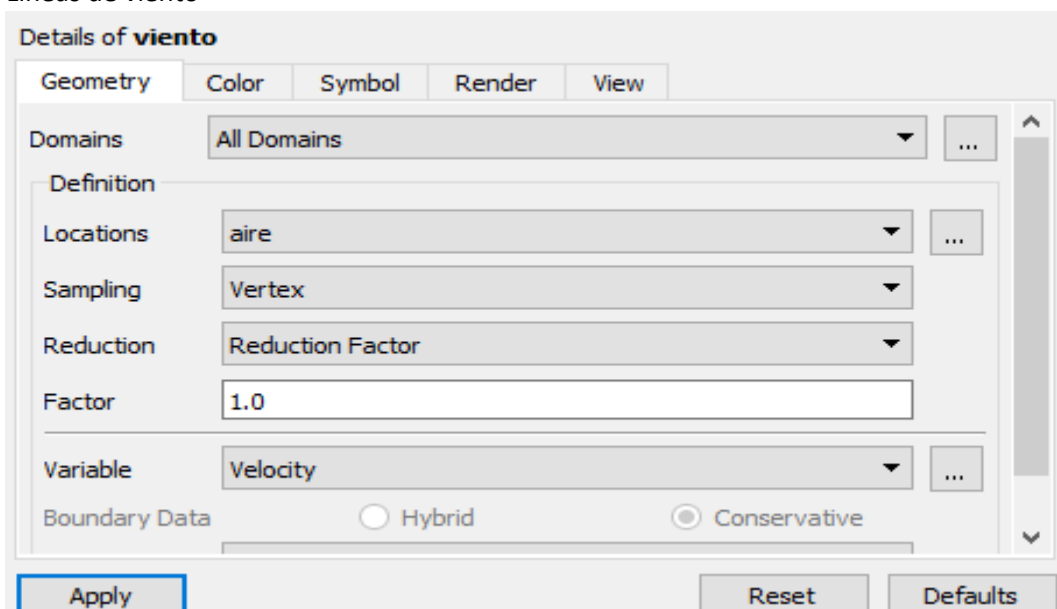


Figura 5.37 Definición de un nuevo vector para observar las líneas de viento que actúan sobre el conductor.

En esta visualización queremos representarla en todos los puntos del aire, por lo que en localización introduciremos aire y la variable será la velocidad.

En la figura observamos que la velocidad máxima del aire es 0.3 m/s, que se corresponde con los datos que fueron introducidos en el 'Setup', también observamos que la dirección es casi paralela al eje del conductor, debido a que el ángulo del viento es de 173 grados, muy cercano a los 180.

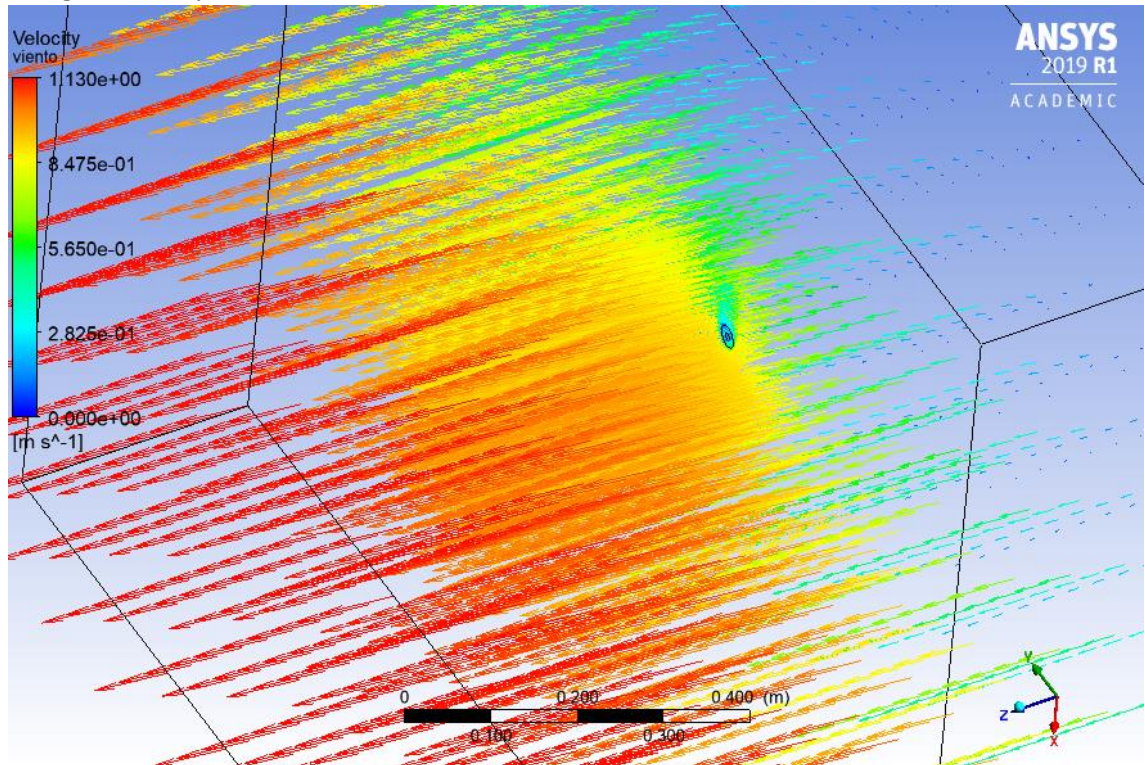


Figura 5.38 Líneas de viento en la simulación con temperatura baja.

- Otras representaciones auxiliares.

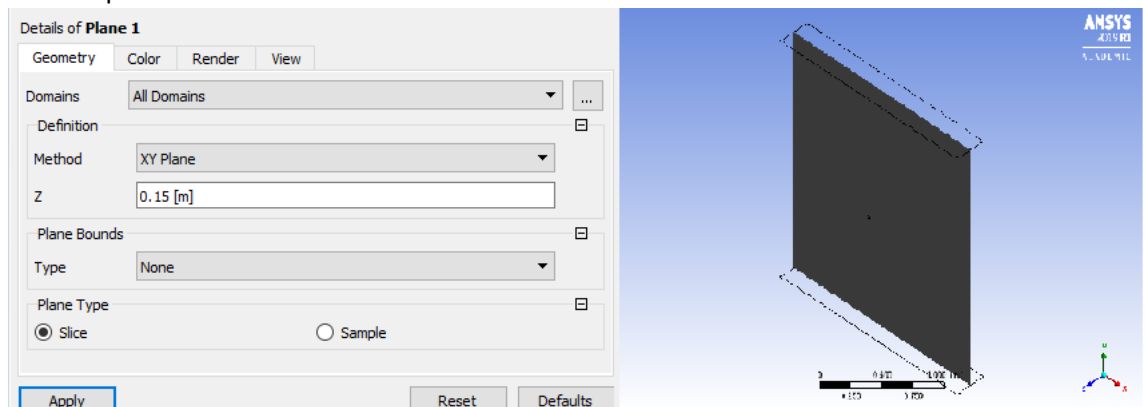


Figura 5.39 Creación de un plano auxiliar.

Para definir un plano debemos indicar el plano en el que le queremos y el punto por el que tiene que pasar, en este caso se encuentra en el plano XY y en el eje Z corta a 0.15 m, la mitad.

Con la ayuda de los planos vamos a visualizar a que presión está sometido el conductor debido al viento.

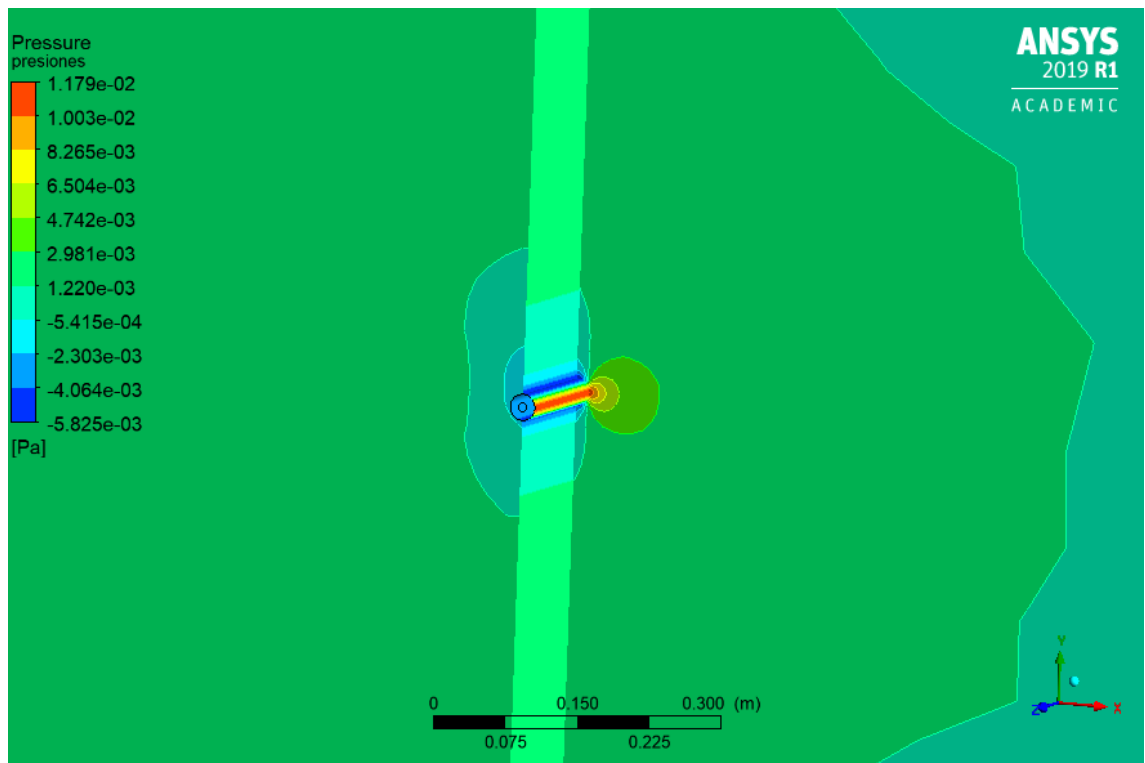


Figura 5.40 Visualización de la presión a la que se ve sometido el conductor en la simulación con temperatura baja

A continuación, se representan los resultados de la simulación a una temperatura media.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	5	5	5	5
Velocidad del viento (m/s)	2.2	2.5	2.4	2.36
Radiación solar (w/m ²)	7	4	2	4.3
Temperatura ambiente (°C)	10.6	10.7	10.6	10.63
Dirección del viento	91.63	85.63	82.63	86.63
Corriente (A)	348.4	382.8	324	351.73
Temperatura del conductor (°C)	15.2	15.4	15.4	15.3

Tabla 5.2 Condiciones atmosféricas de la simulación a temperatura media

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{351.73^2 * 0.000069}{0.000395} = 21610.8 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \sin(86.63) = 0.99756$$

$$V_z = \cos(86.63) = 0.06975$$

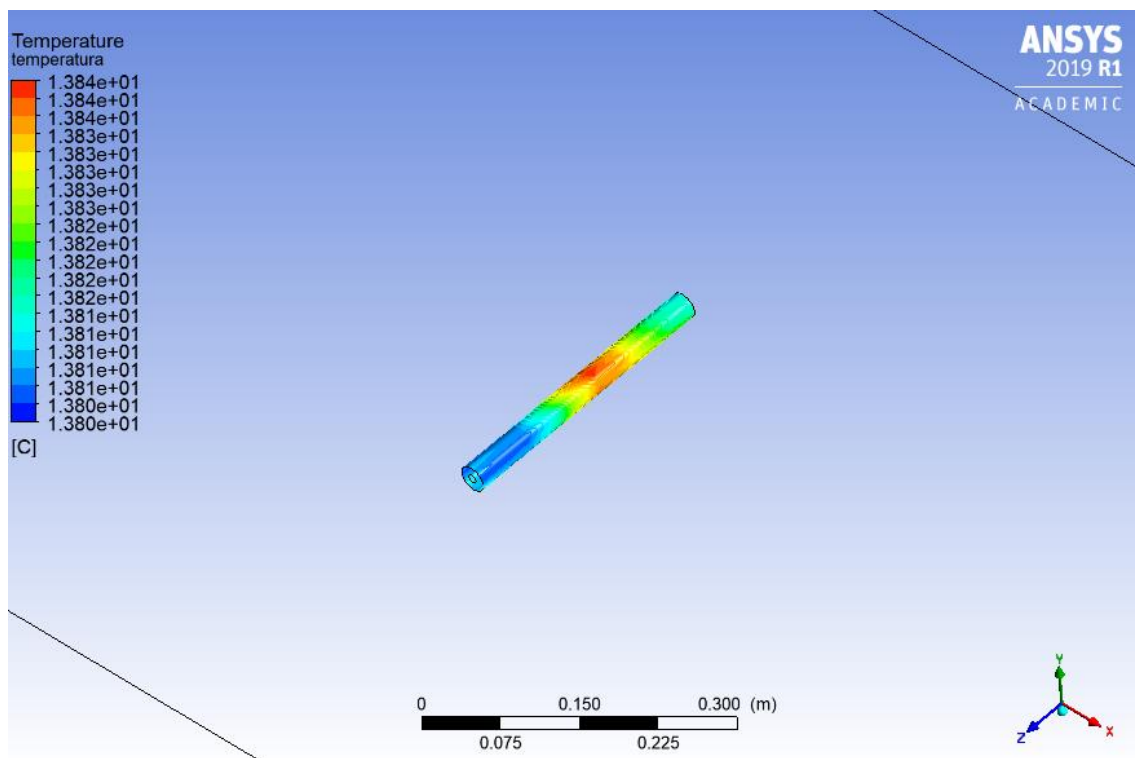


Figura 5.41 Temperatura del conductor en la simulación con temperatura media

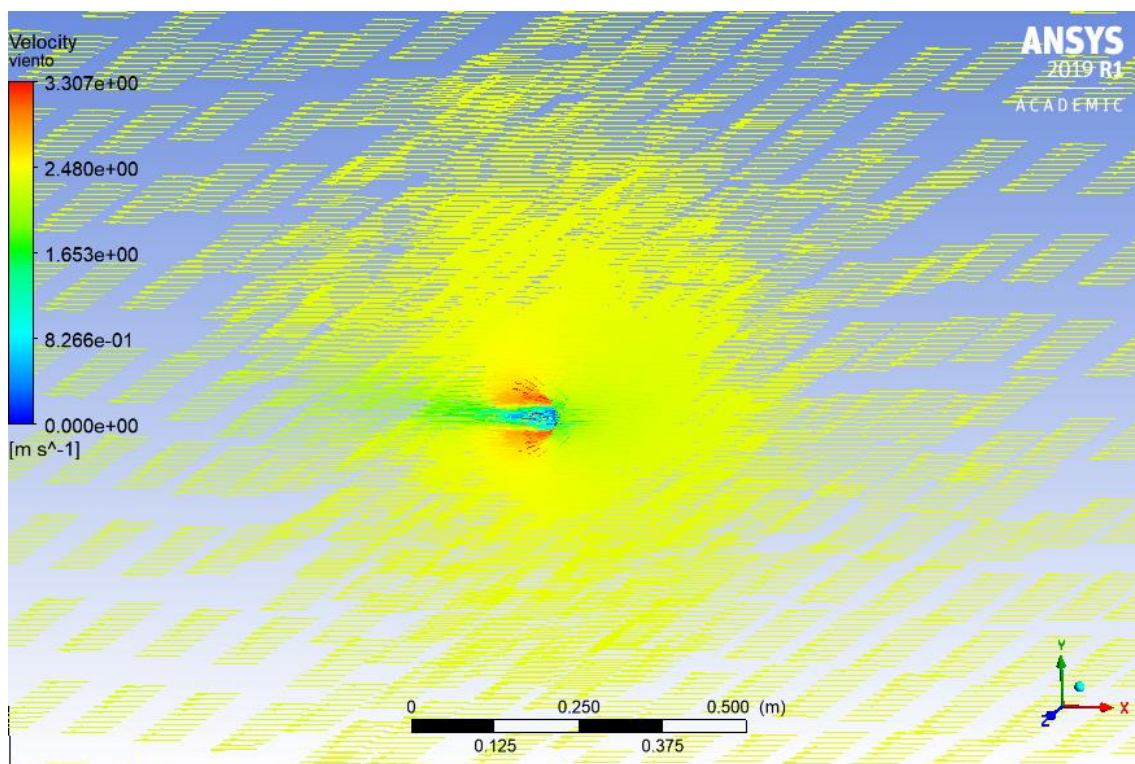


Figura 5.42 Líneas de viento en la simulación con temperatura media

En esta simulación la temperatura de la simulación es de 13.8°C y en la realidad es de 15.3°C, al igual que en el caso anterior hay un pequeño error.

Con respecto a las líneas de viento, la velocidad máxima es de 3.7 m/s debido a una aceleración en el momento de contacto con el conductor, pero la velocidad del aire en el resto del volumen es de aproximadamente 2.4 m/s.

A continuación, se representan los resultados de la simulación a una temperatura alta.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	6	6	6	6
Velocidad del viento (m/s)	3.5	4.3	3.8	3.86
Radiación solar (w/m ²)	702	700	724	708.6
Temperatura ambiente (°C)	12.9	13.7	13.8	13.46
Dirección del viento	201.36	191.36	196.36	196.36
Corriente (A)	668.4	614	626.4	636.36
Temperatura del conductor (°C)	29	30.2	29.5	29.56

Tabla 5.3 Condiciones atmosféricas en la simulación a temperatura alta

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{636.36^2 * 0.000069}{0.000395} = 70738.81 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(196.36) = 0.2756$$

$$V_z = \text{cos}(196.36) = -0.96126$$

En las figuras podemos observar, primero la temperatura del conductor que es de 26.8°C de media, en el caso real es de 29.5°C, es más diferencia que la que se da en las otras dos simulaciones, pero sigue sin ser una diferencia que nos vaya a crear problemas, ya que simula de una manera cercana a la realidad cómo se comporta el conductor.

Con respecto a las líneas de viento su velocidad es de 3.86 m/s y su dirección es bastante paralela al eje del conductor, ya que es de 196.36 grados muy cercanos a los 180 grados, que coincidiría con la dirección del eje del conductor.

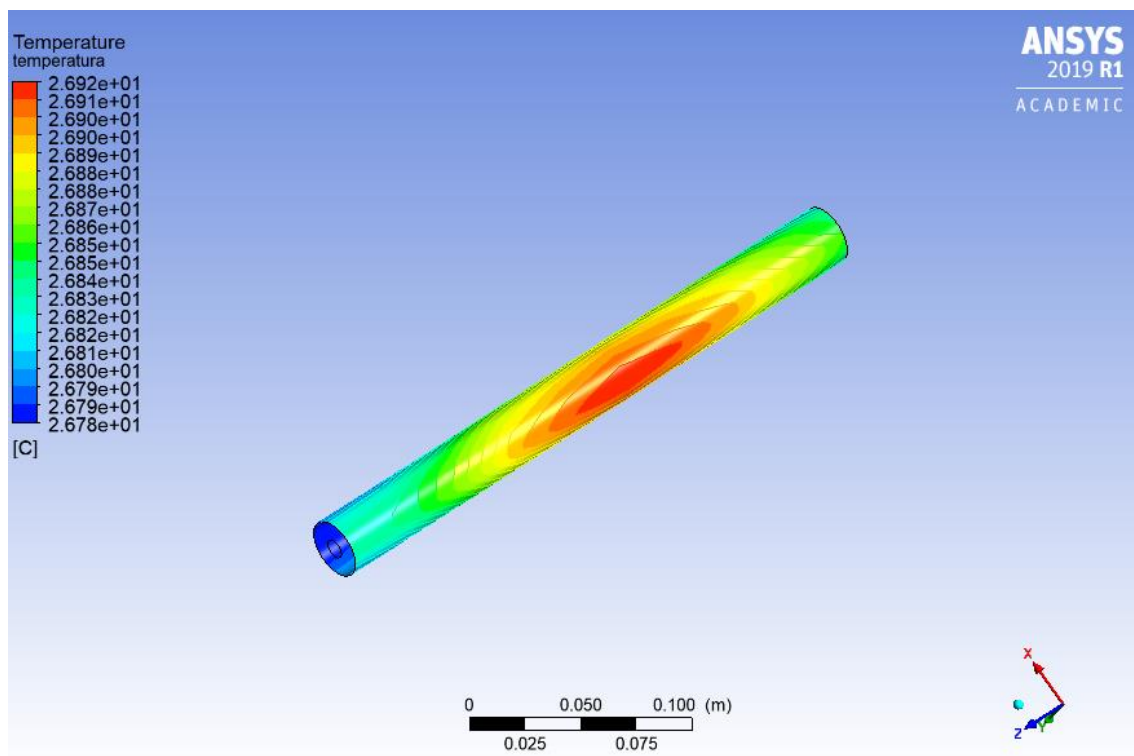


Figura 5.43 Temperatura del conductor en la simulación con temperatura alta

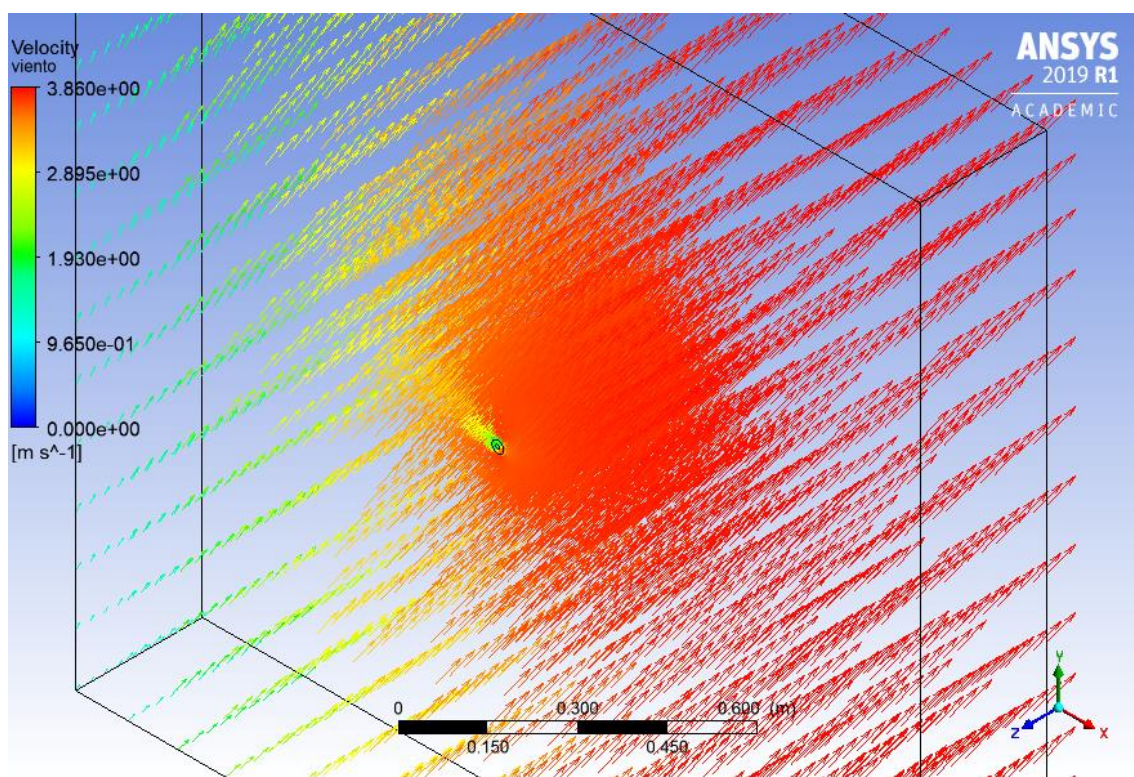


Figura 5.44 Líneas de viento en la simulación con temperatura alta

5.5 CONCLUSIÓN

Después de realizar las tres simulaciones y observar los resultados se puede ver que en ninguna de las tres existe una diferencia grande entre la temperatura que simula el conductor con la que en realidad existe, en magnitud, la más grande es la que se observa con la temperatura alta, existiendo una diferencia de casi tres grados, a medida que la temperatura ambiente y la velocidad del viento aumentan esta diferencia va aumentando situándose la temperatura de la simulación por debajo de la real, esto podría significar un problema cuando las temperaturas fueran muy superiores, pero no van a serlo mucho más, ya que dentro de todos los datos recopilados estos se encuentran en el límite, por lo que se trata de un error asumible. Con respecto a la temperatura baja, el error es de 0.77°C , es más significativa debido a que la temperatura del conductor solo es de cinco grados y en porcentaje es mucho mayor, esto da la razón a la normativa, en ella se encontraba que con velocidades de viento bajas, no se sabía si definir convección natural o convección forzada, y se elegía la más restrictiva, por lo que las simulaciones tendrán un error más significativo cuando la velocidad del viento y la temperatura sean menores.

6. SIMULACIÓN

El objetivo final de este trabajo es desarrollar una metodología para llevar a cabo la explotación dinámica de una línea sometida a diferentes condiciones meteorológicas a lo largo de la longitud de la línea.

Como se ha comentado en apartados anteriores uno de los principales problemas de la gestión dinámica de una línea es que se considera que toda la línea está sometida a las mismas condiciones meteorológicas a lo largo de toda su longitud, esto no es así, las líneas eléctricas pueden llegar a tener grandes longitudes y es muy normal que las condiciones ambientales varíen a lo largo de toda la longitud de la línea, estas variaciones pueden llegar a producir errores a la hora de calcular la ampacidad de la propia línea.

Una vez realizada la validación del modelo de comprobación, es el momento de llevar a cabo la simulación final. Gracias al modelo de validación, hemos comprobado que mediante la introducción de las variables ambientales se obtiene un resultado lo suficientemente cercano a los datos reales obtenidos de las estaciones meteorológicas. A partir de este modelo, se realizarán unos pequeños cambios, aunque en general deberá ser muy parecido para asegurar que los resultados sean lo más parecido posible a la realidad.

Se han realizado dos simulaciones distintas para observar cómo se comportan los conductores sometidos a distintas condiciones ambientales. En la primera simulación se han representado dos partes diferenciadas sobre el conductor, en cada una de ellas se introducirán condiciones ambientales diferentes y se observará como es el comportamiento en el conductor en la zona de transición entre las diferentes condiciones ambientales. En la segunda simulación, con el objetivo de lograr una simulación más cercana a la realidad, se han representado tres zonas diferenciadas, en las dos zonas de los extremos se representan condiciones ambientales reales obtenidas de las estaciones meteorológicas y en la zona central se han introducido datos ambientales, que aunque no son reales, tienen valores medios que se sitúan entre las dos situaciones reales, ya que en muchas ocasiones, magnitudes como la dirección del viento, varía de forma muy significativa entre un caso y otro, por ejemplo de un caso a otro puede llegar a tener una dirección casi contraria, en la realidad estos cambios no se producen de forma brusca, por lo que con este volumen entre los dos se ha intentado que en la simulación, el cambio entre una zona y otra sea más progresivo.

A continuación, se describen los cambios que se han llevado a cabo en las dos simulaciones con respecto al modelo de validación.

6.1 DOS VOLÚMENES DE CONTROL

En esta primera simulación se va a representar un conductor sometido a dos condiciones de viento diferentes, en comparación con el modelo de validación, la definición de la geometría es el punto que presenta más diferencias ya que, es en ella donde debemos definir las distintas zonas que posteriormente van a tener condiciones ambientales distintas.

Uno de los principales problemas que presenta ANSYS es la creación de zonas periódicas, no permite crear una zona periódica definida por un plano en el interior de un volumen, es por ello que se han representado cuatro zonas diferenciadas, las dos primeras tendrán las mismas condiciones y las dos últimas tendrán otras condiciones pero iguales entre ellas, a la hora de crear la periodicidad se hará de toda la longitud del conductor representada, por lo que los volúmenes situados en los extremos estarán contiguos al volumen con las otras condiciones ambientales, esto hace que en estas zonas los resultados no sean precisos y a la hora de los resultados solo se representarán las zonas centrales.

En la siguiente imagen se puede observar el resultado final de la geometría, los cilindros que simulan el acero y el aluminio del conductor también están separados en cuatro trozos al igual que el volumen que simula el aire, para poder representar únicamente las partes deseadas.

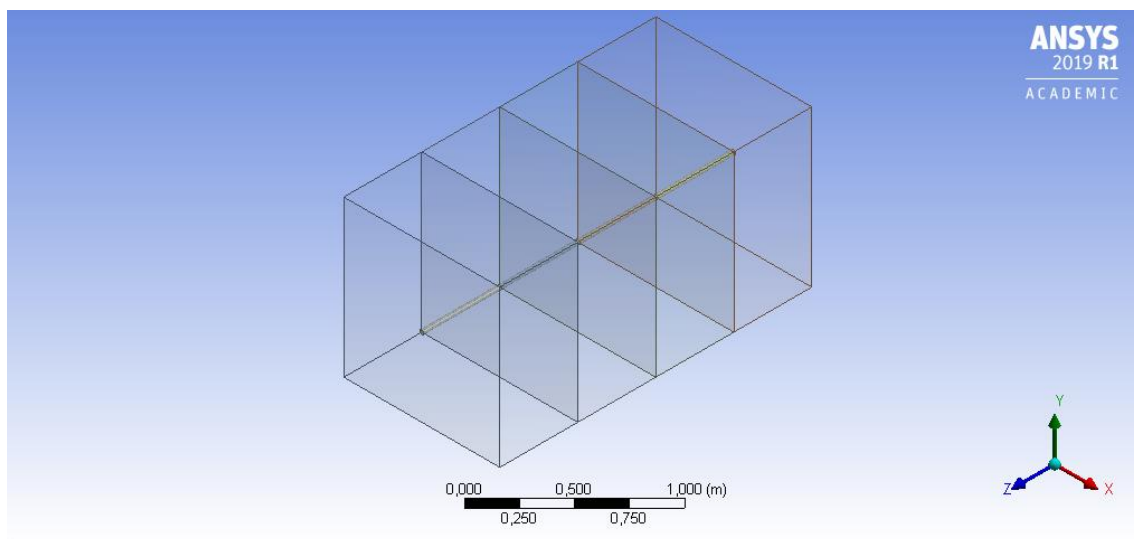


Figura 6.1 Geometría de la simulación con tres condiciones ambientales diferenciadas

Partiendo de la geometría del modelo de validación deberemos crear dos nuevas zonas con la misma geometría, compuesta de dos cilindros situando al conductor y un cubo simulando el aire que se encuentra a su alrededor, para ello deberemos situarnos en el plano YZ y representar los tres fragmentos como rectángulos, para el aire, al igual que en la simulación anterior, se utilizara la opción de extrusión, la principal diferencia se aprecia a la hora de realizar el conductor, para ello se representará un rectángulo de altura igual al radio sobre el eje Z, y con la opción 'revolve', conseguimos que gire alrededor de este eje produciendo un cilindro. En la 6.2 se detalla paso a paso como realizar este proceso.

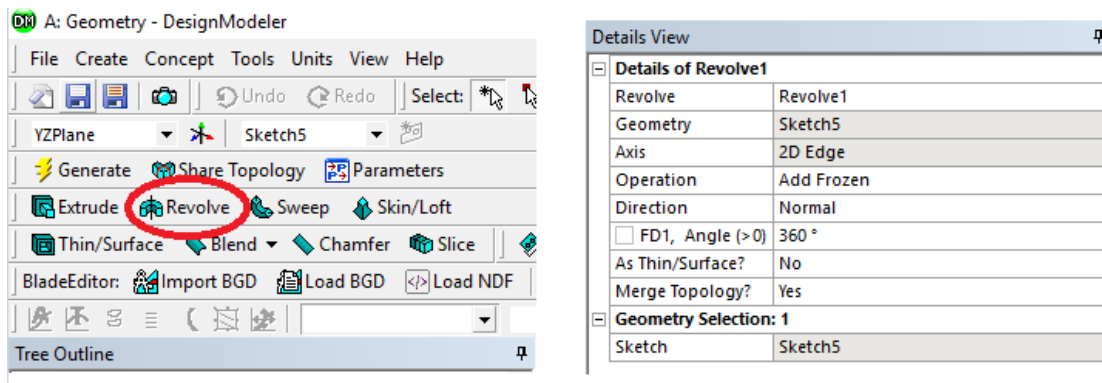


Figura 6.2 Creación de un cilindro en el eje YZ con el comando 'Revolve'

Una vez seleccionada la opción 'Revolve', señalizada con un círculo rojo en la figura 6.2 de la izquierda, aparece la ventana que se puede ver en la imagen de la izquierda, en ella, la opción 'Geometry' se ha seleccionado el rectángulo creado y en 'Axis' el eje Z, ya que es el eje sobre el que queremos que gire.

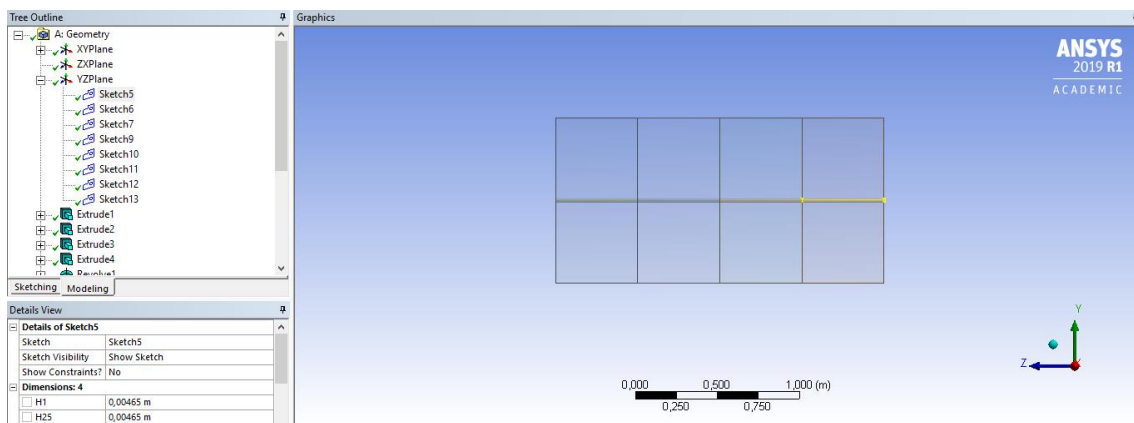


Figura 6.3 Vista de la Geometría en el plano YZ

En la figura 6.3 se representa la geometría vista desde el plano YZ, ya que es este en el cual se realizará el dibujo de la geometría.

Por último, se realizan las mismas operaciones realizadas en el modelo de validación como son la operación booleana de separar los distintos cuerpos y se crea una única parte compuesta de toda la geometría para que el mallado sea constante y uniforme cuando se produzcan cambios de un cuerpo a otro.

Una vez realizada la geometría, se define el mallado, en esta simulación será necesario nombrar más zonas que en la simulación anterior, ya que esta vez las entradas de viento pueden estar situadas a un lado o a otro del volumen de aire, si nos situamos en el plano XY, los vientos que tengan un ángulo comprendido entre 0 y 180 grados entrará por la parte derecha (representado en la figura con una flecha de color rojo) mientras que los vientos que tengan un ángulo de viento comprendido entre 180 y 360 entrarán por la parte izquierda (representado en la figura 6.4 con una flecha de color verde), esto es debido a que en algunos casos, aunque la dirección del viento sea parecida, si una es de 30 grados y otra es de 340 grados necesitaremos de dos zonas diferenciadas en las que poder introducir el viento.

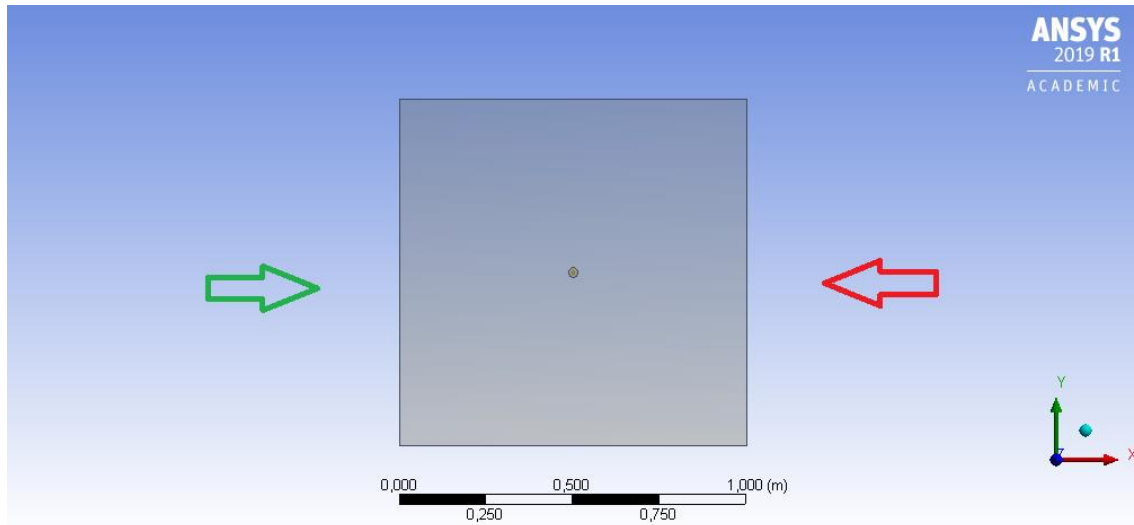


Figura 6.4 Diferentes entradas de viento empleadas en la simulación

Partiendo de la geometría deberemos definir dos nuevos sistemas de coordenadas, llamados 'Coordinate System' y 'Coordinate System 4' situados en los extremos de la geometría, que serán de ayuda a la hora de crear el 'Match control' de la misma forma que se creó en el modelo de validación para que el mallado en estas dos caras sea igual y no existan problemas a la hora de crear la zona periódica.

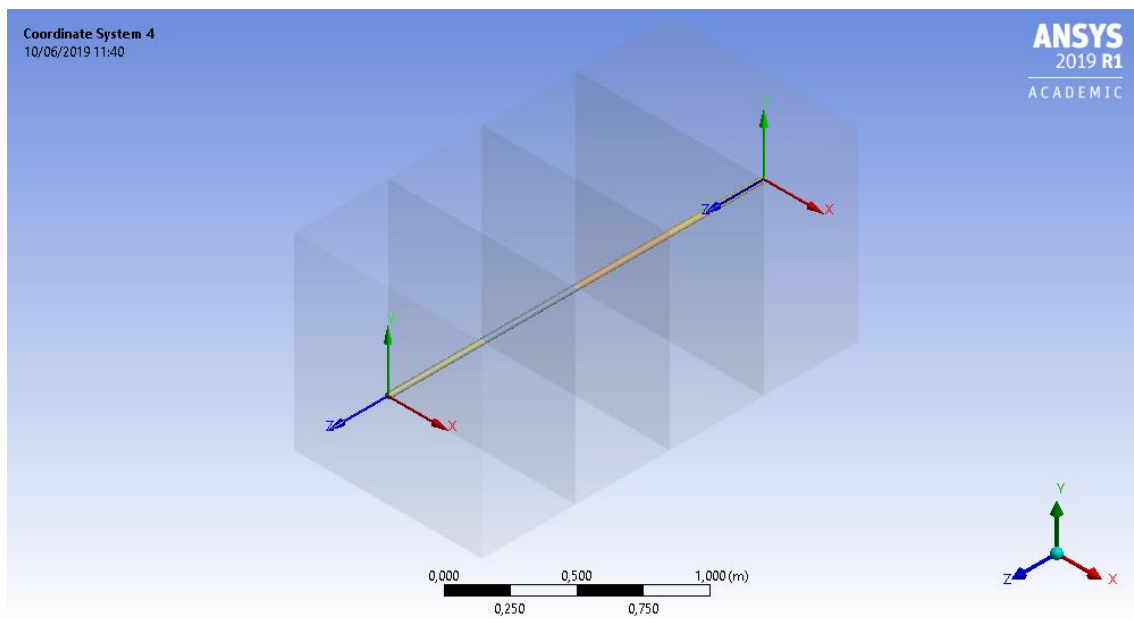


Figura 6.5 Sistemas de coordenadas empleados en la simulación de tres condiciones ambientales diferentes

En la figura 6.6, se muestran las diferentes zonas definidas, en cada volumen existen dos zonas denominadas 'entrada1.1' y 'entrada1.2', el número uno se refiere al volumen siendo el primer número el situado más a la izquierda en el eje Z y el 4 el contrario, y el segundo número representa la zona por la que entrará el viento siendo el 1 la zona derecha (flecha roja en la

figura anterior) y 2 la zona izquierda (flecha verde en la figura anterior). En cada simulación solo una de estas zonas se considerará como entrada de viento, definiéndose la otra como salida.

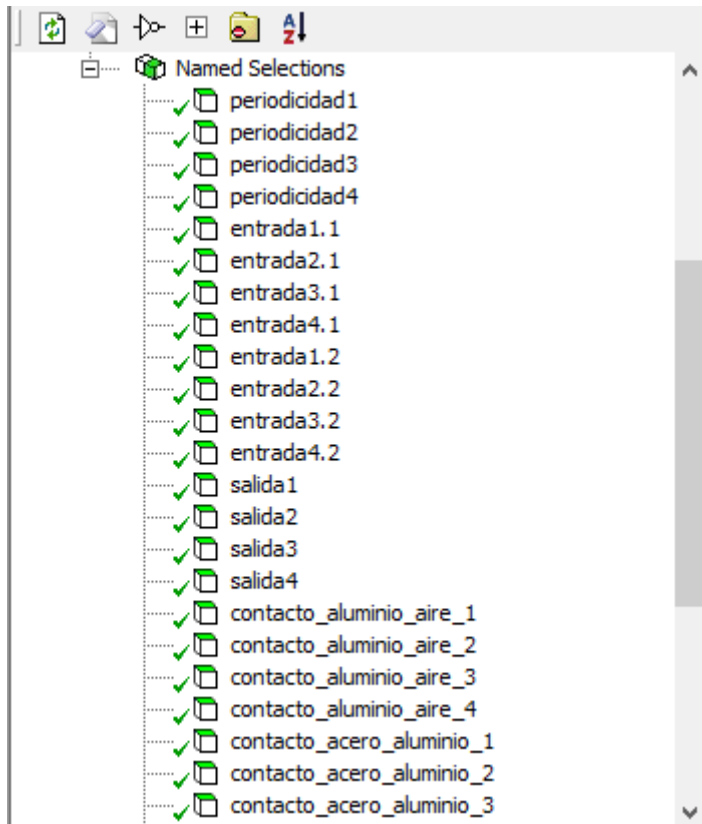


Figura 6.6 Zonas nombradas en la geometría

La zona definida como periodicidad es la definida en el modelo de validación como simetría, los contactos entre los distintos materiales son iguales que en las simulaciones anteriores y por último, en este caso las salidas únicamente son las partes superiores e inferiores de los volúmenes de aire, a las que se le unirán la entrada que no funcione como tal.

Una vez realizados estos pasos se procede a generar el mallado siendo este el resultado obtenido:

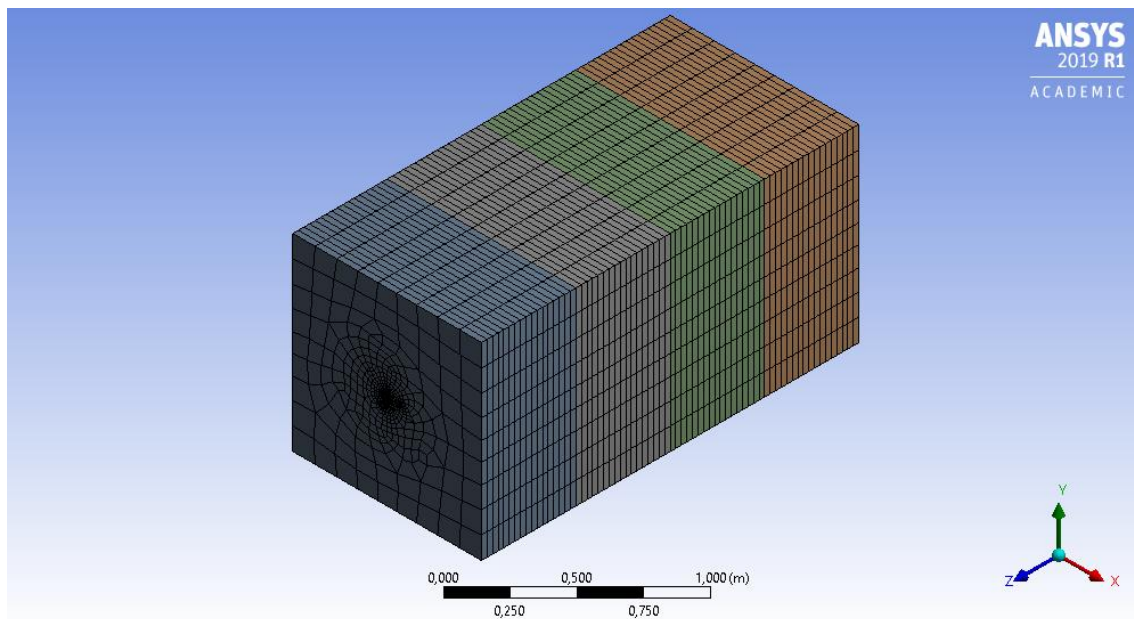


Figura 6.7 Mallado sobre la geometría creada

El último paso a la hora de realizar la simulación es configurar el 'Setup', el procedimiento es prácticamente idéntico al modelo de simulación, tanto en los modelos de energía, viscosidad del aire y radiación como en las condiciones de contorno.

Una de las ventajas de definir el conductor como partes diferenciadas es la capacidad de definir cada tramo diferenciado de conductor como una generación de calor diferente una de otra. Esto se puede observar en las figuras 6.8 y 6.9.

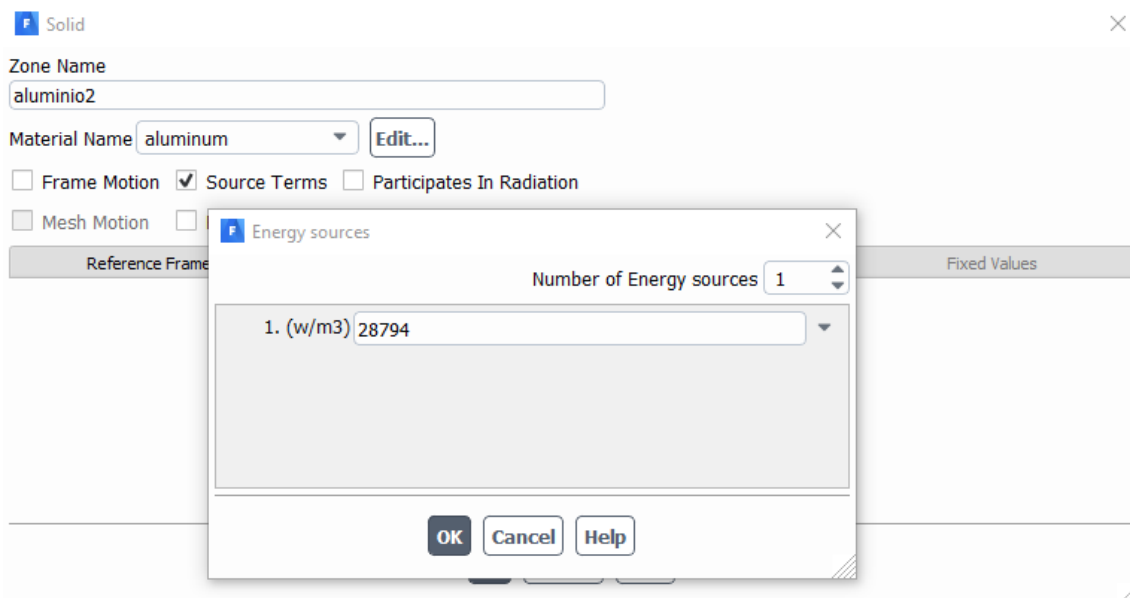


Figura 6.8 Generación de calor asignada a una sola parte del conductor

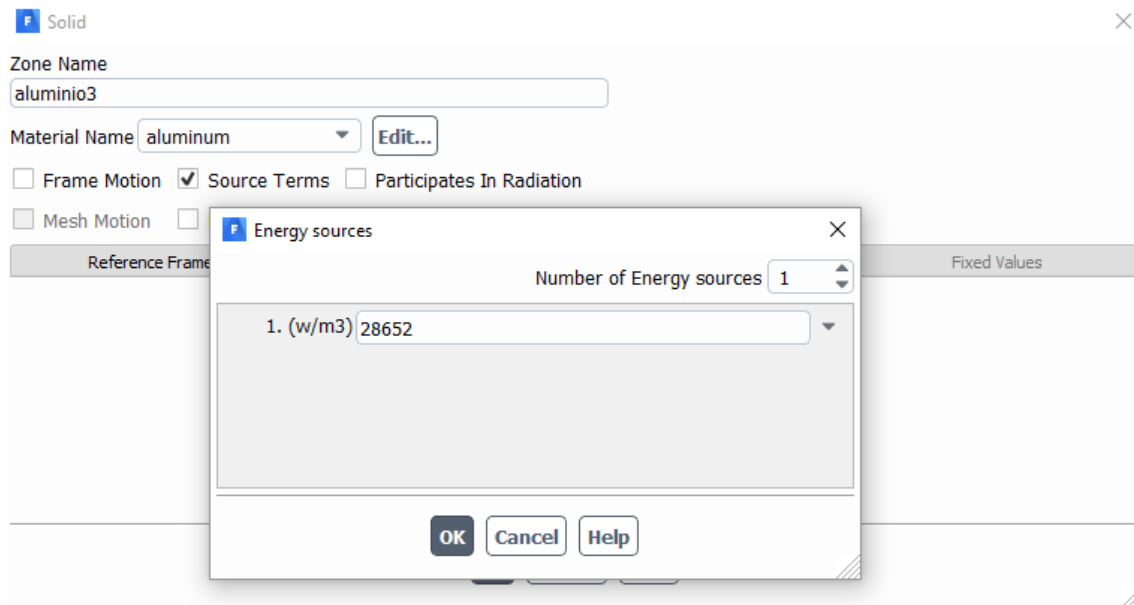


Figura 6.9 Generación de calor asignada a una zona distinta del conductor

En esta figura se puede observar que la generación de calor es casi idéntica, pero no igual, esto se debe a que entre las dos distancias medidas existe una distancia y se ha podido producir pérdidas ya que la fórmula para calcular la generación depende únicamente de la intensidad como variable. Aunque en este ejemplo no sean iguales, no significa que en todos los casos ocurra esto, en las simulaciones realizadas se irá exponiendo individualmente si son iguales o diferentes.

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} \quad (6.1)$$

Por último, debemos tener cuidado a la hora de definir las zonas que van a ser entrada de viento o salida, en la siguiente figura se muestra, en un ejemplo, como se han definido, las entradas se han definido como 'Velocity inlet', mientras que las salidas se han definido como 'Pressure outlet' prestando atención a las zonas que llevan como nombre entrada, pero actúan como salida, estas zonas aparecen rodeadas en rojo en la figura 6.10.

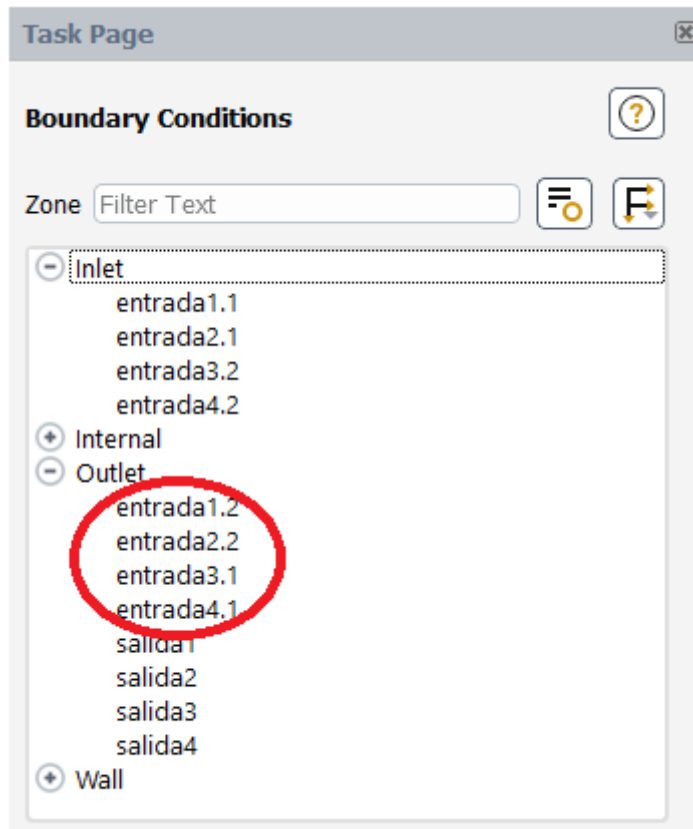


Figura 6.10 Zonas llamadas 'entrada' asignadas como salida

6.2 TRES VOLÚMENES DE CONTROL

La metodología a la hora de realizar a configuración de la simulación es igual que la simulación anterior en la que se tenían en cuenta dos condiciones ambientales distintas, en este caso se tendrán en cuenta las mismas dos condiciones ambientales, pero entre las dos se establecerá un volumen que se configurará con unas condiciones ambientales, estas condiciones se definirán de manera intermedia entre las dos para simular de manera más cercana a la realidad lo que ocurre, ya que no se producen cambios bruscos si no que van a ser progresivos. Como se quieren simular tres condiciones ambientales distintas se representarán cinco volúmenes diferenciados, los dos primeros con las mismas condiciones, el tercero tendrá las condiciones intermedias y los dos últimos tendrán otras condiciones. Con todo esto la geometría queda representada en la siguiente figura.

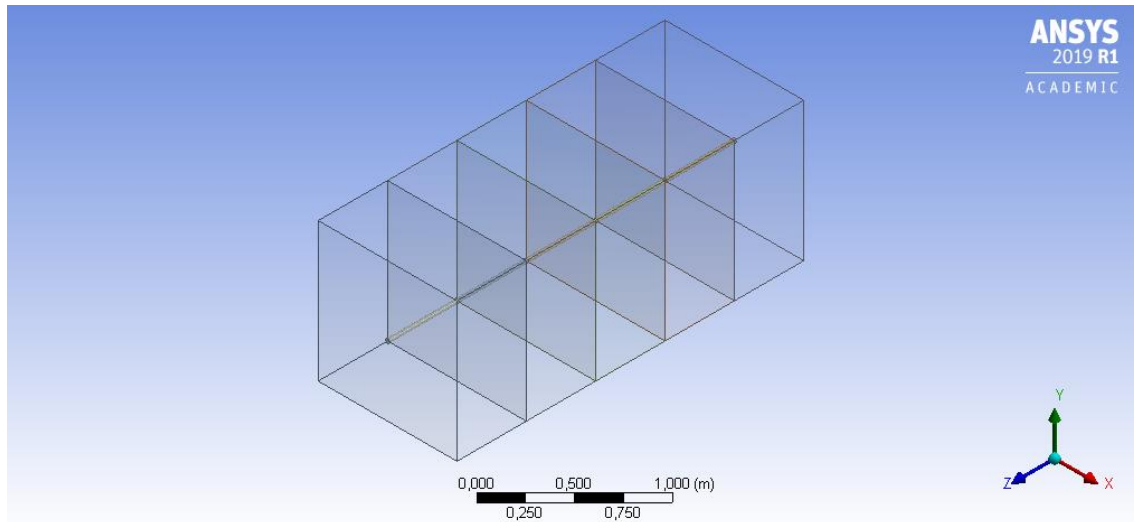


Figura 6.11 Geometría empleada para representar tres condiciones ambientales diferentes

Al introducir un nuevo volumen, en la parte referente al mallado, definiremos las nuevas superficies con distintos nombres, estos son iguales que los usados en la simulación con dos condiciones meteorológicas distintas, empezando la numeración con el 1 en la parte izquierda del eje Z (positiva) y acabando con el número 5 en la parte derecha del eje Z (negativa). Las caras y objetos quedan definidos como se puede ver en la siguiente imagen.

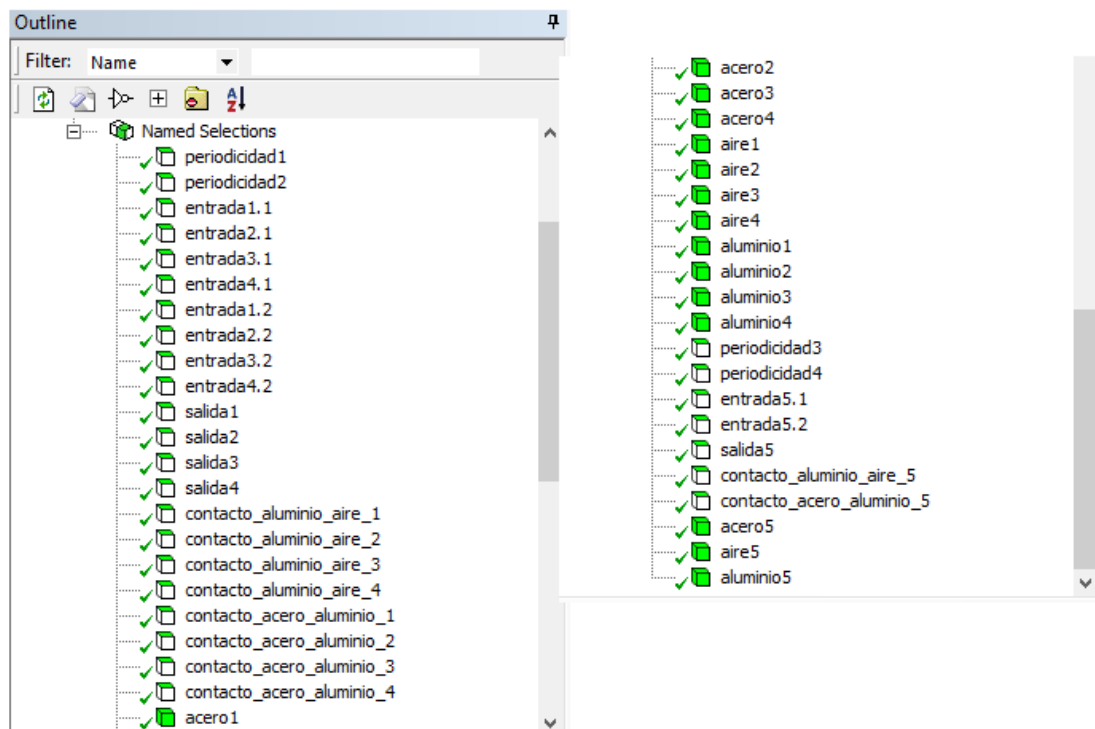


Figura 6.12 Distintas zonas de la geometría con tres zonas diferenciadas

Una vez configurado el mallado, quedará de la siguiente forma.

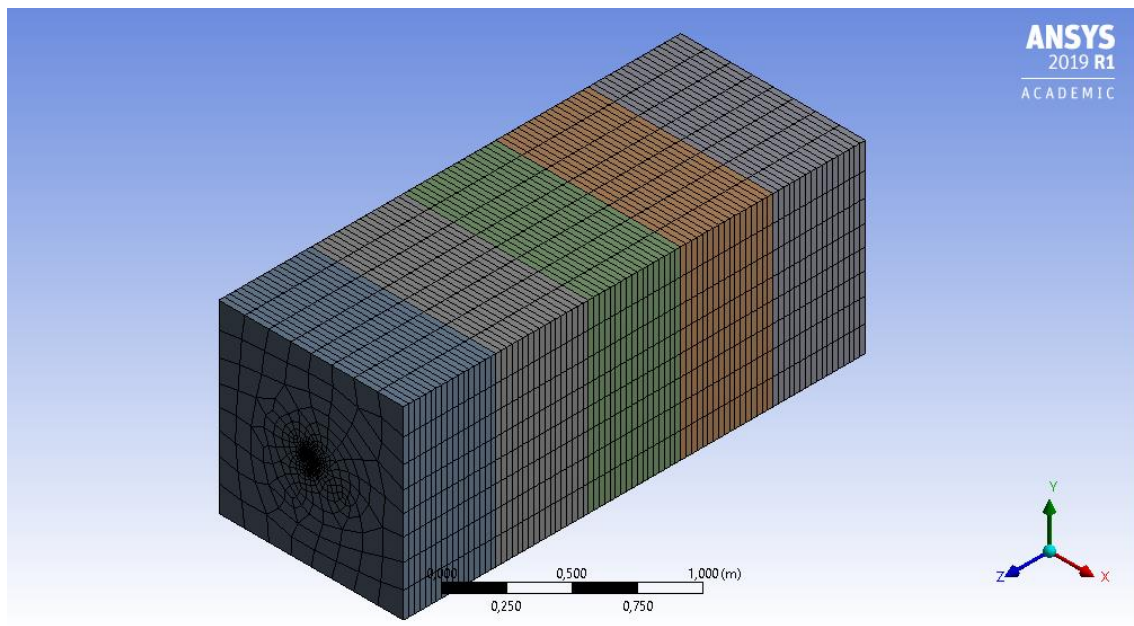


Figura 6.13 Mallado de la geometría de tres zonas diferenciadas

El 'Setup' se configura de manera idéntica que en la simulación de dos condiciones climatológicas distintas.

7. RESULTADOS

A continuación, en este apartado se expondrán los resultados obtenidos de las distintas simulaciones llevadas a cabo, en cada escenario se han realizado dos simulaciones, en una de ellas, el conductor estará sometido a dos condiciones ambientales diferentes, ambas de ellas son casos reales y en la otra el conductor estará sometido a tres condiciones ambientales distintas, las condiciones ambientales que están entre los dos extremos no son reales, son una media realizada con las dos condiciones ambientales conocidas, ya que, en casos reales no se dan cambios bruscos, con esta nueva situación se ha intentado recrear de forma más exacta lo sucedido en un entorno real.

Se han llevado a cabo tres simulaciones distintas, dos de ellas se han realizado con datos reales, mientras que en la tercera se ha intentado observar de manera más clara los cambios que se pueden producir en casos más extremos, para ello los datos introducidos son inventados, teniendo en cuenta los máximos encontrados dentro de los datos reales.

En todos los resultados representados se puede observar que los volúmenes de los extremos no se tienen en cuenta, esto es debido a los problemas para definir la periodicidad que presenta el programa, por lo que son más exactos los volúmenes representados en la figura.

7.1 SIMULACIÓN 1

En esta simulación se han introducido los datos recogidos en la siguiente tabla, se ha realizado la media de tres medidas consecutivas en el tiempo para que no se produzca mucha desviación con respecto a los datos reales debido a la inercia térmica que presenta el cable. Los datos introducidos en ANSYS son los pertenecientes a la columna 'Media'.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	1	1	1	1
Velocidad del viento (m/s)	4.7	4.8	5.3	4.93
Dirección del viento	72.13	80.13	79.13	77.13
Radiación solar (w/m ²)	0	0	1	0.33
Temperatura ambiente (°C)	9.7	9.7	9.6	9.66
Corriente (A)	423.6	416.8	378	406.13
Temperatura del conductor (°C)	16.8	15.9	15.4	16.03

Tabla 7.1 Primeras condiciones ambientales de la simulación 1

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{406.13^2 * 0.000069}{0.000395} = 28812 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \sin(77.13) = -0.97487$$

$$V_z = \cos(77.13) = -0.22274$$

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	2	2	2	2
Velocidad del viento (m/s)	0.8	1.4	1.7	1.3
Dirección del viento	286.37	13.37	318.37	320
Radiación solar (w/m ²)	0	0	1	0.33
Temperatura ambiente (°C)	10	10.1	10.1	10.06
Corriente (A)	423.6	416.8	378	406.13

Temperatura del conductor (°C)	16.1	16.1	17.1	16.43
--------------------------------	------	------	------	--------------

Tabla 7.2 Segundas condiciones ambientales de la simulación 1

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{406.13^2 * 0.000069}{0.000395} = 28812 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(320) = 0.64278$$

$$V_z = \cos(320) = 0.7660$$

Esta última tabla recoge los datos que se introducirán entre las dos condiciones meteorológicas presentes en las dos tablas anteriores, en la simulación con dos condiciones meteorológicas no se tienen en cuenta, solo se tienen en cuenta en la simulación con tres condiciones meteorológicas.

	Medida
Estación meteorológica	1/2
Velocidad del viento (m/s)	3.12
Dirección del viento	90
Radiación solar (w/m²)	0.33
Temperatura ambiente (°C)	9.85
Corriente (A)	406.13
Temperatura del conductor (°C)	16.15

Tabla 7.3 Condiciones intermedias de la simulación 1

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{406.13^2 * 0.000069}{0.000395} = 28812 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(90) = -1$$

$$V_z = \cos(90) = 0$$

Dos condiciones ambientales diferentes.

A continuación, se van a representar dos figuras obtenidas de la representación en ANSYS de las condiciones descritas anteriormente, una de ellas será un contorno que indicará la temperatura alcanzada por el conductor y el comportamiento de este y en la otra se representarán las líneas de viento para poder observar cómo se comporta el conductor con relación a la magnitud y dirección del viento.

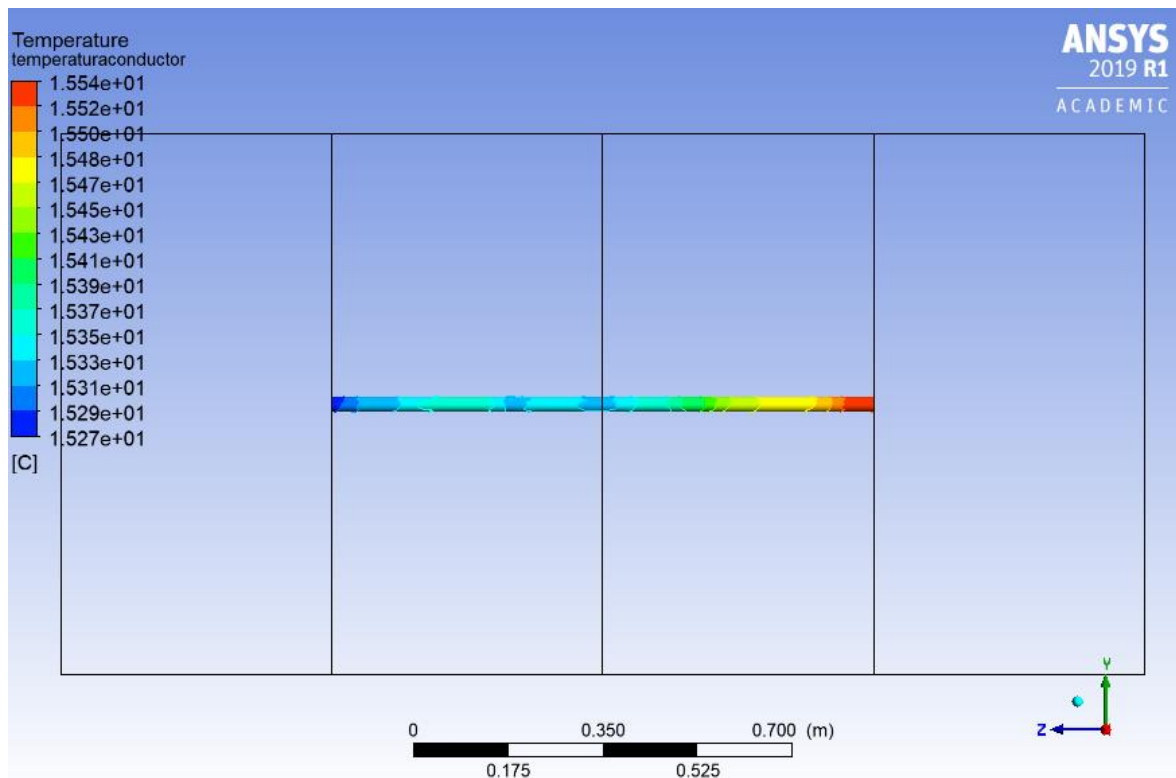


Figura 7.1 Temperatura del conductor en la simulación 1 con dos zonas diferenciadas

En esta primera figura el conductor tiene una temperatura que varía entre los 15.54°C y los 15.27°C, en comparación la temperatura del conductor debería estar entre los 16.03°C y los 16.43°C, la temperatura obtenida en la simulación es algo menor que en la realidad, pero la diferencia de temperatura que experimenta el conductor sí que está más aproximada.

La temperatura máxima se da en la zona derecha de la simulación, como se puede observar en las tablas 7.1 y 7.2 la temperatura ambiente era mayor y la velocidad del viento era menor en esta zona, por lo que tiene sentido que la temperatura del conductor evolucione de esta manera, manteniendo una temperatura más fría en la parte izquierda de la simulación y calentándose hasta llegar a su máximo en la parte derecha de la figura 7.1.

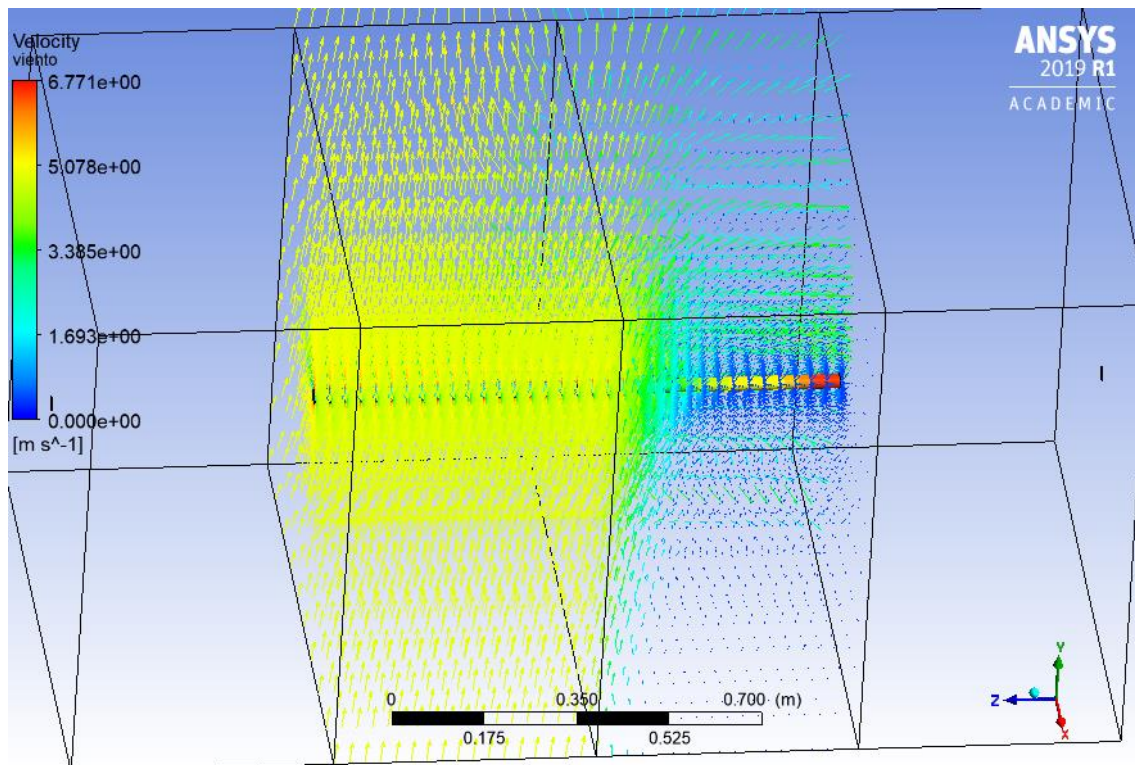


Figura 7.2 Líneas de viento en la simulación 1 con dos zonas diferenciadas

En la figura superior se observa la magnitud y dirección del viento, en la zona izquierda de la figura la magnitud del viento es más grande, por lo que tiene sentido que esta sea la zona en la que el conductor presenta menor temperatura.

En este caso se han utilizado las entradas de viento contrapuestas, ya que en una condición el ángulo del viento es de 320 grados y en la otra es de 77 grados, esto hace que, como se observa en la simulación en la parte central, la magnitud del viento caiga mucho, ya que al tener direcciones opuestas una se contrarresta con la otra

Tres condiciones ambientales diferentes.

En las dos próximas representaciones se tienen en cuenta las tres condiciones ambientales diferentes, las variables representadas son las mismas que en la simulación con dos condiciones ambientales diferentes.

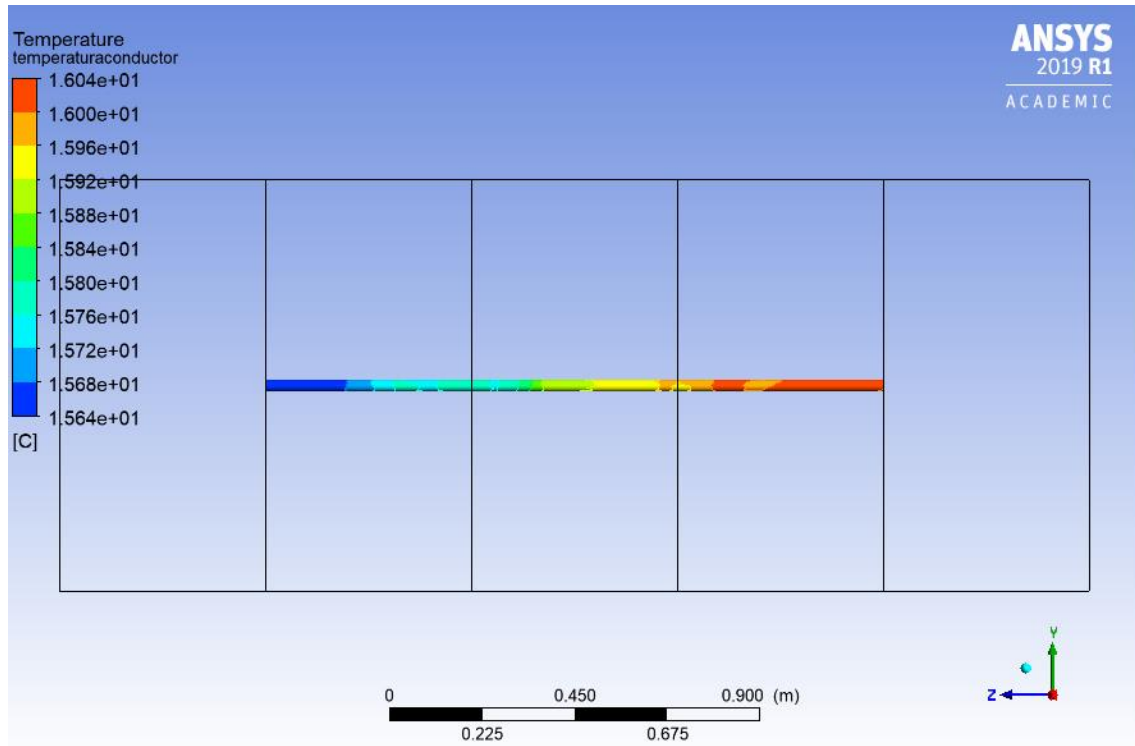


Figura 7.3 Temperatura del conductor en la simulación 1 con tres zonas diferenciadas

En esta primera figura el conductor tiene una temperatura que varía entre los 15.64°C y los 16.03°C, en comparación la temperatura del conductor debería entre los 16.03° y los 16.43°C, la temperatura obtenida en la simulación es algo menor que en la realidad, pero la diferencia de temperatura que experimenta el conductor sí que está más aproximada.

En la figura 7.3 se puede observar un cambio más gradual en la temperatura del conductor, pero la diferencia de temperatura entre los dos extremos representados del conductor es prácticamente igual que en la simulación con dos condiciones ambientales diferentes.

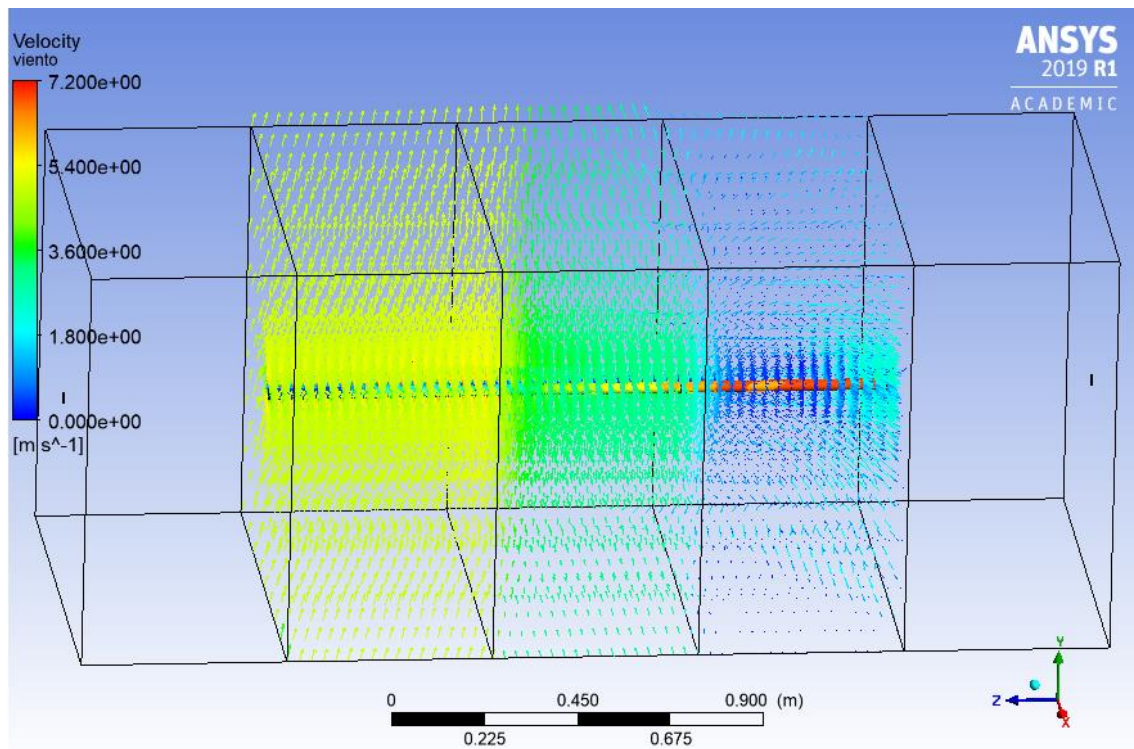


Figura 7.4 Líneas de viento en la simulación 1 con tres zonas diferenciadas

En la figura superior se observa la magnitud y dirección del viento, en la zona izquierda de la figura la magnitud del viento es más grande, por lo que tiene sentido que esta sea la zona en la que el conductor presenta menor temperatura. La zona intermedia es la correspondiente a los datos no reales, se puede apreciar que la magnitud y la dirección del viento se sitúa entre las condiciones reales para que los resultados sean aproximados a los reales.

Al igual que en la simulación con dos condiciones diferentes entre la condición representada en la zona central y la condición representada en la zona derecha de la figura 7.4 se produce un cambio en el sentido de la dirección del viento, por lo que no es de extrañar que exista una pequeña zona en la que la magnitud sea prácticamente cero, ya que se anula una con otra.

7.2 SIMULACIÓN 2

En esta simulación se va a proceder de forma idéntica a como se realizó en la 'Simulación 2'.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	1	1	1	1
Velocidad del viento (m/s)	7.9	8.2	8	8.03
Dirección del viento	110.13	89.13	80.13	93.13
Radiación solar (w/m ²)	505	757	579	613.6
Temperatura ambiente (°C)	15.5	15.6	15.9	15.6
Corriente (A)	402.4	414.67	417.5	411.5
Temperatura del conductor (°C)	22.1	24	23.3	23.13

Tabla 7.4 Primeras condiciones ambientales de la simulación 2

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{411.5 * 0.000069}{0.000395} = 29579.56 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(93.13) = -0.99919$$

$$V_z = \text{cos}(93.13) = 0.04013$$

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	2	2	2	2
Velocidad del viento (m/s)	8.2	9.6	10	9.26
Dirección del viento	55.37	48.37	45.37	49.7
Radiación solar (w/m ²)	500	656	506	554
Temperatura ambiente (°C)	16	16.2	16.3	16.16
Corriente (A)	402.4	414.67	417.5	411.5
Temperatura del conductor (°C)	23.5	23.5	23	23.3

Tabla 7.5 Segundas condiciones ambientales de la simulación 2

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{411.5^2 * 0.000069}{0.000395} = 29579.56 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(49.7) = -0.75813$$

$$V_z = \text{cos}(49.7) = 0.65209$$

	Medida
Estación meteorológica	1/2
Velocidad del viento (m/s)	8.65
Dirección del viento	70.8
Radiación solar (w/m ²)	583.5
Temperatura ambiente (°C)	15.95
Corriente (A)	411.5
Temperatura del conductor (°C)	23.2

Tabla 7.6 Condiciones intermedias de la simulación 2

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{411.5^2 * 0.000069}{0.000395} = 29579.56 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(70.8) = -0.94437$$

$$V_z = \text{cos}(70.8) = 0.3289$$

Dos condiciones ambientales diferentes.

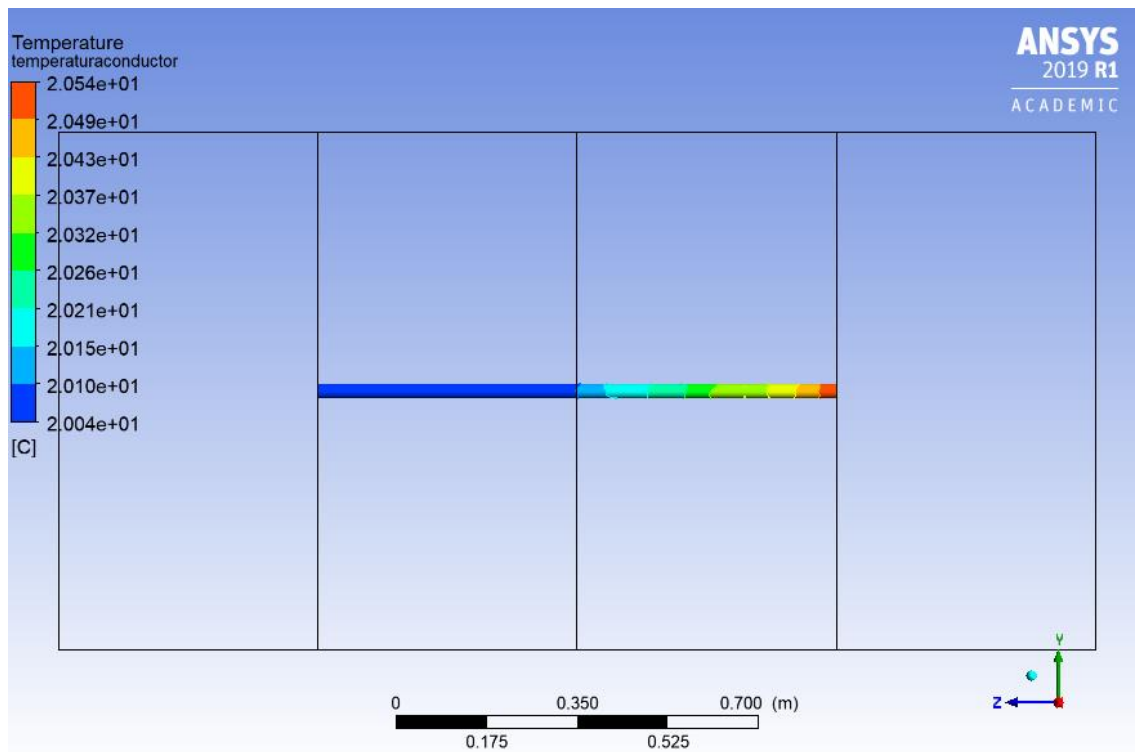


Figura 7.5 Temperatura del conductor en la simulación 2 con dos zonas diferenciadas

En esta primera figura el conductor tiene una temperatura que varía entre los 20.04°C y los 20.54°C, en comparación la temperatura del conductor debería entre los 23.13°C y los 23.3°C, la temperatura obtenida en la simulación es algo menor que en la realidad, pero la diferencia de temperatura que experimenta el conductor es casi idéntica.

En esta simulación sucede que aunque en la zona izquierda la magnitud del viento es algo inferior a la que existe en la zona izquierda, en la zona derecha tiene una dirección mucho más perpendicular con respecto al eje del conductor, por lo que permite que se produzca más evacuación de calor en esta zona y es lógico que la temperatura que presenta el conductor en esta zona sea menor, esto se puede observar con mayor claridad en la figura 7.6 en la que se representa la dirección del viento en ambas partes del conductor.

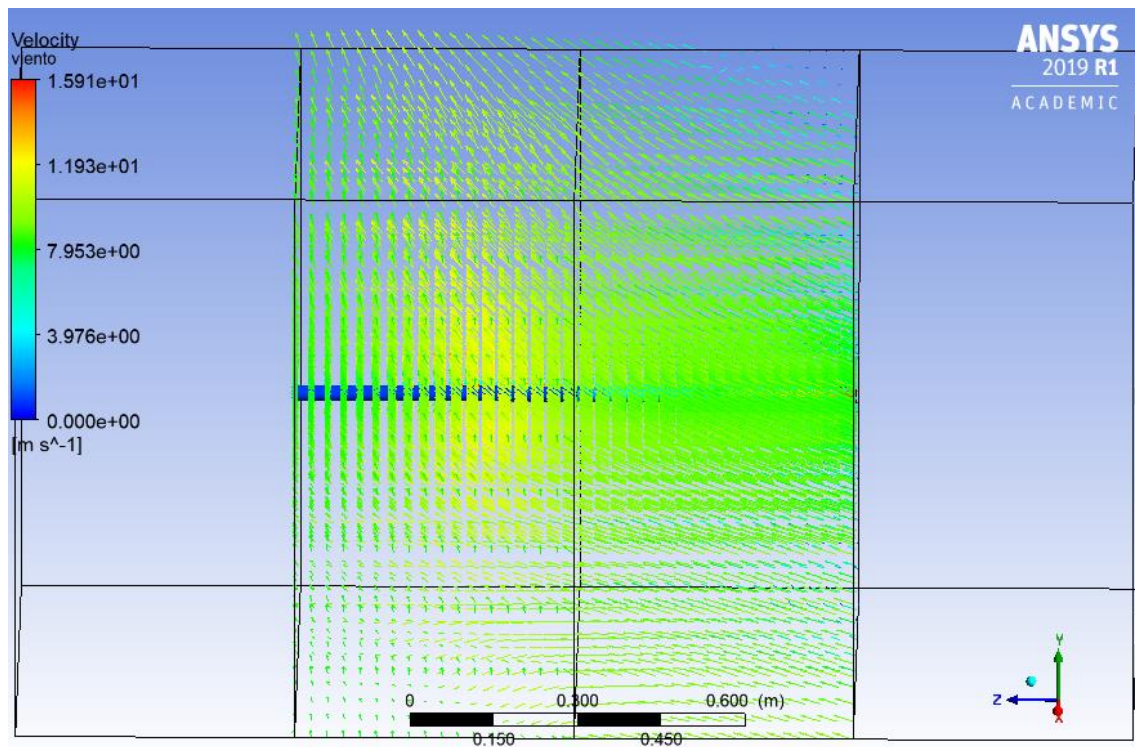


Figura 7.6 Líneas de viento en la simulación 2 con dos zonas diferenciadas

En la figura superior se observa la magnitud y dirección del viento, en la zona izquierda de la figura la magnitud del viento es más grande y perpendicular al eje del conductor, por lo que tiene sentido que esta sea la zona en la que el conductor presenta menor temperatura.

Tres condiciones ambientales diferentes.

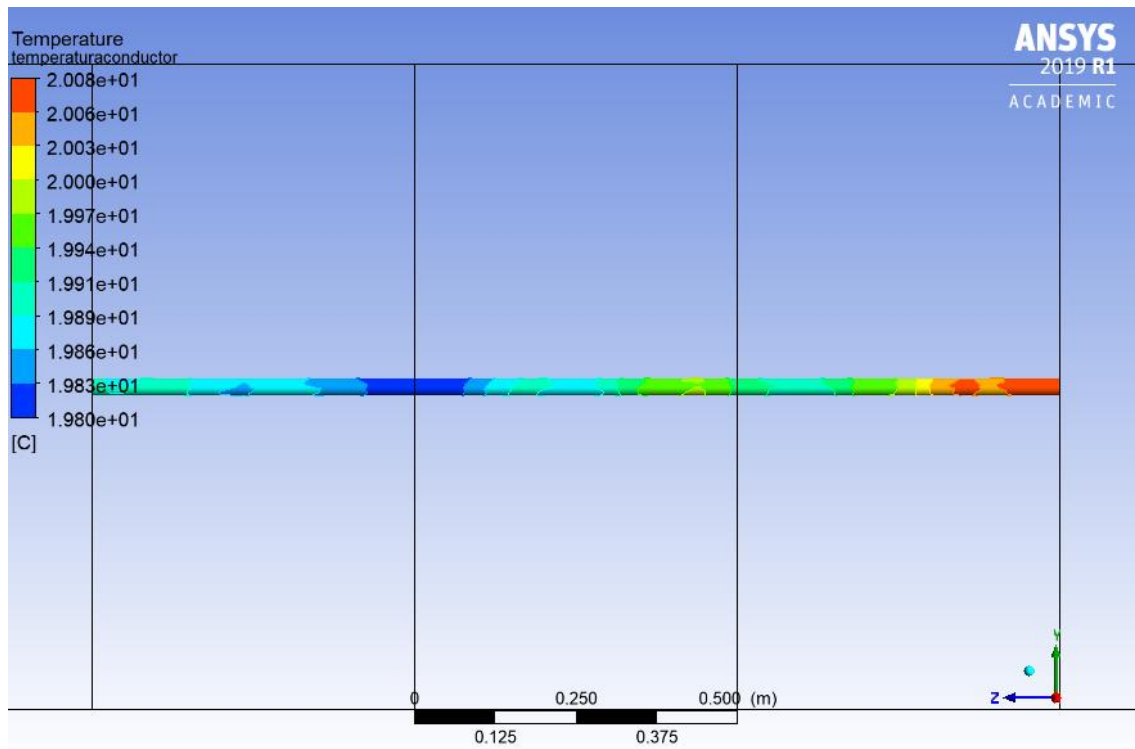


Figura 7.7 Temperatura del conductor en la simulación 2 con tres zonas diferenciadas

En esta primera figura el conductor tiene una temperatura que varía entre los 19.80°C y los 20.08°C, en comparación la temperatura del conductor debería entre los 23.13°C y los 23.3°C, la temperatura obtenida en la simulación es menor que en la realidad, pero la diferencia de temperatura que experimenta el conductor es casi idéntica a la real.

En esta simulación la temperatura es ligeramente inferior que la obtenida en la simulación con dos condiciones diferentes, pero la evolución de la temperatura del conductor a lo largo de toda la longitud representada es igual, a su vez, el gradiente de temperatura que se produce en el conductor es ligeramente inferior al introducir unas nuevas condiciones ambientales diferentes a las dos ya establecidas.

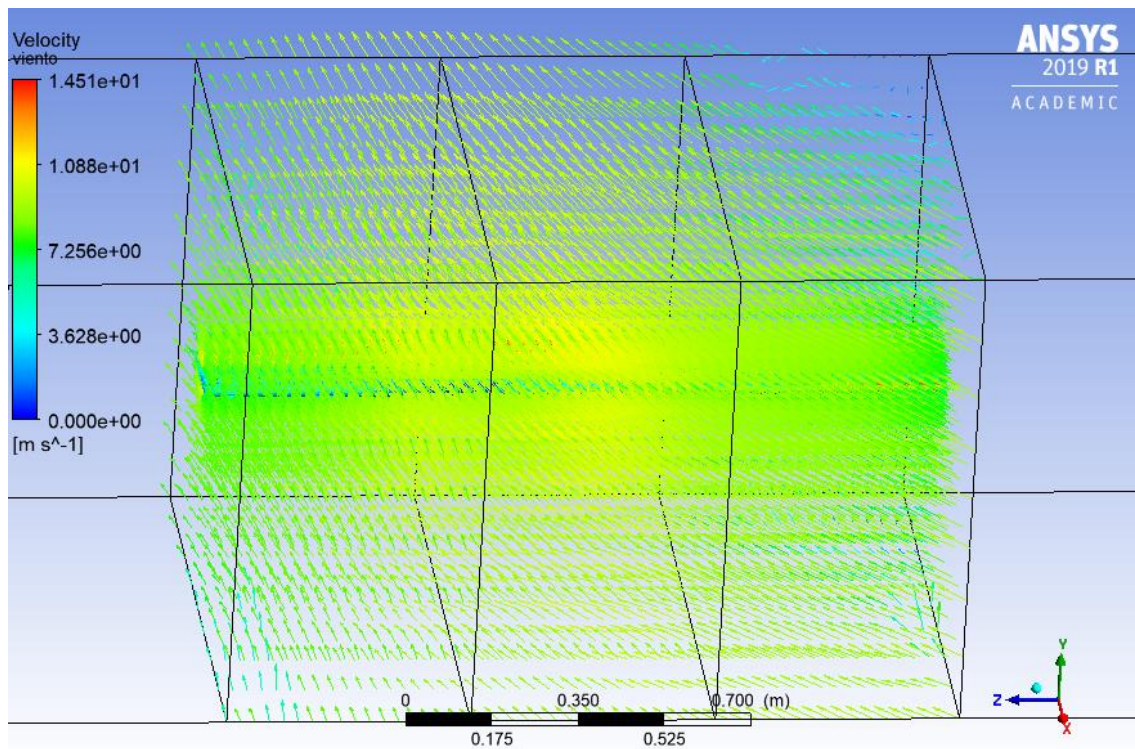


Figura 7.8 Líneas de viento en la simulación 2 con tres zonas diferenciadas

En la figura superior se observa la magnitud y dirección del viento, en la zona izquierda de la figura la magnitud del viento es más grande y perpendicular al eje del conductor, por lo que tiene sentido que esta sea la zona en la que el conductor presenta menor temperatura. La zona intermedia es la correspondiente a los datos no reales, se puede apreciar que la magnitud y la dirección del viento se sitúa entre las condiciones reales para que los resultados sean aproximados a los reales.

En este caso tanto la magnitud como la dirección del viento en las dos condiciones reales representadas no eran muy distintas unas de otras, es por eso que en la representación de las líneas de viento se puede observar perfectamente un cambio gradual en la dirección del viento pudiendo ser un caso que sucede en el día a día de las líneas, aún así, existe gradiente de temperatura en la longitud del conductor representada en esta simulación.

7.3 SIMULACIÓN 3

En esta simulación se va a proceder de forma idéntica a como se realizó en la 'Simulación 1' y en la 'Simulación 3'

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	5	5	5	5
Velocidad del viento (m/s)	5.2	3.1	4.8	4.36
Dirección del viento	32.63	55.63	55.63	47.96
Radiación solar (w/m ²)	198	331	266	265
Temperatura ambiente (°C)	7.3	7.7	7.8	7.6
Corriente (A)	630.5	604	656	630.2
Temperatura del conductor (°C)	14.8	14.8	16.4	15.3

Tabla 7 Primeras condiciones ambientales de la simulación 3

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{630.2 * 0.000069}{0.000395} = 69375 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(47.96) = -0.7427$$

$$V_z = \text{cos}(47.96) = -0.6696$$

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
Estación meteorológica	6	6	6	6
Velocidad del viento (m/s)	7.7	5.6	6.7	6.7
Dirección del viento	68.36	83.36	83.36	78.36
Radiación solar (w/m ²)	173	175	218	188.7
Temperatura ambiente (°C)	7.9	7.8	8.1	7.93
Corriente (A)	630.5	604	656	630.2
Temperatura del conductor (°C)	13.7	14.9	14.5	14.36

Tabla 8 Segundas condiciones ambientales de la simulación 3

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{630.2^2 * 0.000069}{0.000395} = 69375 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(78.36) = -0.9794$$

$$V_z = \text{cos}(78.36) = -0.2018$$

	Medida
Estación meteorológica	5/6
Velocidad del viento (m/s)	5.53
Dirección del viento	63.16
Radiación solar (w/m ²)	226.85
Temperatura ambiente (°C)	7.765
Corriente (A)	630.2
Temperatura del conductor (°C)	14.83

Tabla 9 Condiciones intermedias de la simulación 3

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{630.2^2 * 0.000069}{0.000395} = 69375 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(63.16) = -0.8923$$

$$V_z = \text{cos}(63.16) = -0.4515$$

Dos condiciones ambientales diferentes.

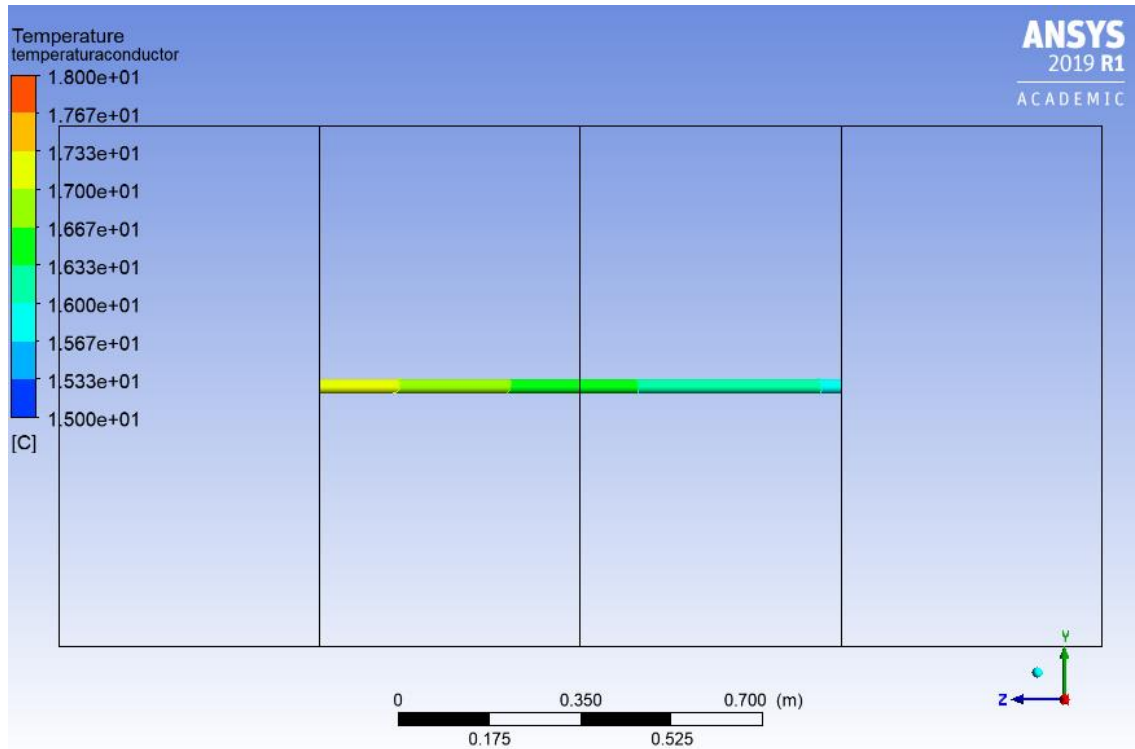


Figura 7.9 Temperatura del conductor en la simulación 3 con dos zonas diferenciadas

En esta primera figura el conductor tiene una temperatura que varía entre los 17°C y los 16°C, en comparación la temperatura del conductor debería entre los 15.3°C y los 14.36°C, la temperatura obtenida en la simulación es algo mayor que en la realidad, aproximadamente 1.7°C, pero la diferencia de temperatura que experimenta el conductor es casi idéntica, 1°C.

En comparación con las dos simulaciones anteriores, el gradiente observado en la temperatura del conductor es mayor, llegando a cambiar un grado en un metro de longitud representado.

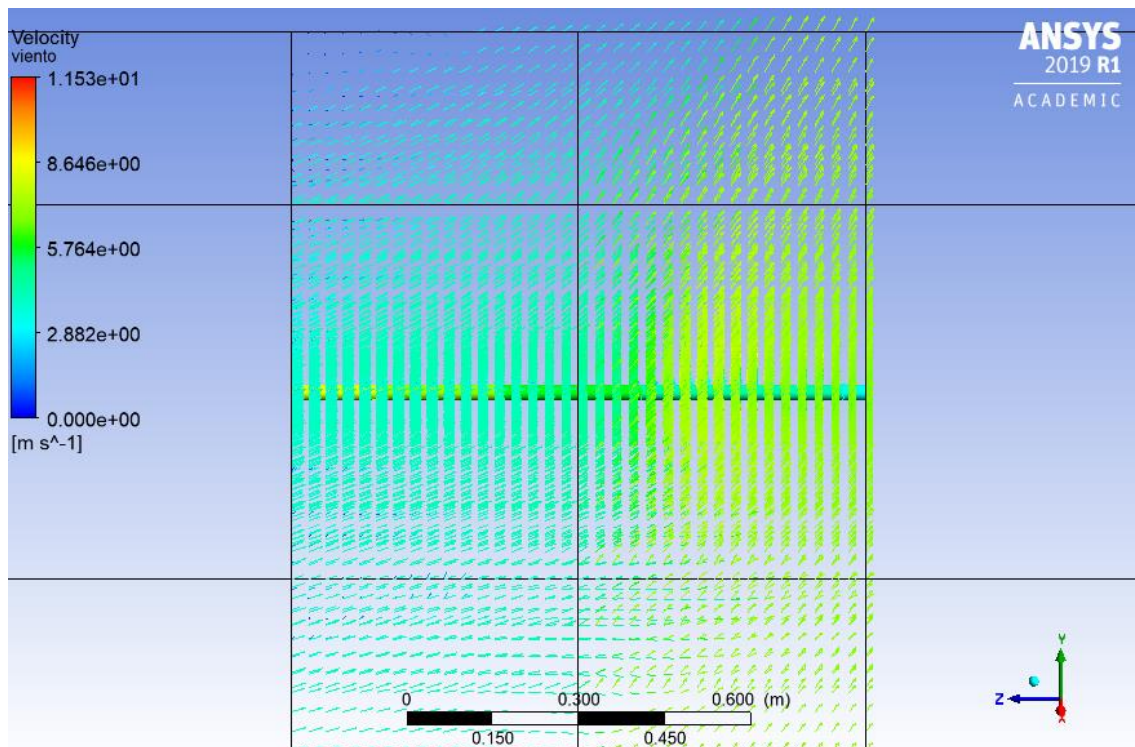


Figura 7.10 Líneas de viento en la simulación 3 con dos zonas diferenciadas

En la figura superior se observa la magnitud y dirección del viento, en la zona derecha de la figura la magnitud del viento es más grande y perpendicular al eje del conductor, por lo que tiene sentido que esta sea la zona en la que el conductor presenta menor temperatura.

Al igual que en la simulación 2, tanto la magnitud como la dirección del viento no presentan valores muy distintos, por lo que, al representar la figura 7.10 se observa un cambio progresivo incluso sin la necesidad de representar un tercer volumen con unas condiciones intermedias, aun así, a continuación, se realizará la simulación con tres condiciones ambientales.

Tres condiciones ambientales diferentes.

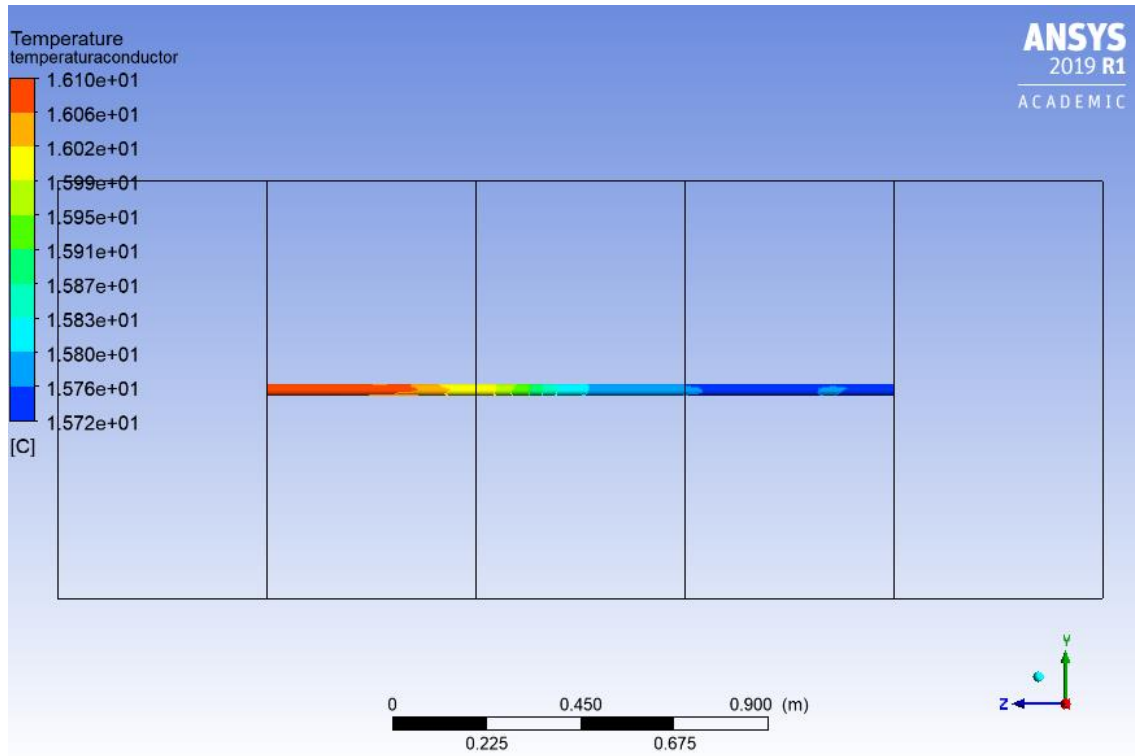


Figura 7.11 Temperatura del conductor en la simulación 3 con tres zonas diferenciadas

En esta primera figura el conductor tiene una temperatura que varía entre los 16.1°C y los 15.72°C, en comparación la temperatura del conductor debería entre los 15.3°C y los 14.36°C, la temperatura obtenida en la simulación es algo mayor que en la realidad.

Al igual que ha sucedido en las otras dos simulaciones llevadas a cabo, al introducir estas condiciones ambientales intermedias, el gradiente de temperatura obtenido en el conductor es menor que cuando únicamente se realiza la simulación con dos condiciones diferentes, aun así en la figura 7.11 se observa que este gradiente se produce en la parte central del conductor, zona en la que cambian las condiciones, y en la zona de los extremos que se ha representado, la temperatura ya se ha estabilizado.

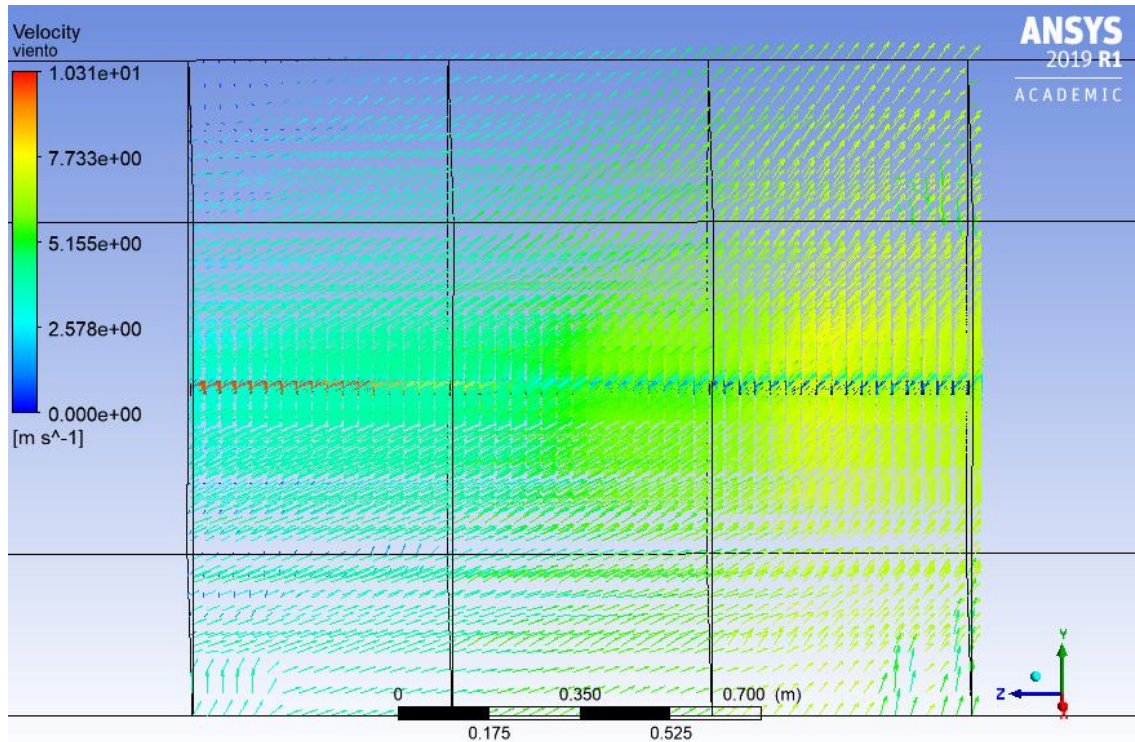


Figura 7.12 Líneas de viento en la simulación 3 con tres zonas diferenciadas

En la figura superior se observa la magnitud y dirección del viento, en la zona derecha de la figura la magnitud del viento es más grande y perpendicular al eje del conductor, por lo que tiene sentido que esta sea la zona en la que el conductor presenta menor temperatura. La zona intermedia es la correspondiente a los datos no reales, se puede apreciar que la magnitud y la dirección del viento se sitúa entre las condiciones reales para que los resultados sean aproximados a los reales.

Como se ha comentado en la simulación con dos condiciones ambientales diferentes, los datos de viento no eran excesivamente diferentes y se apreciaba un cambio gradual, ahora que se ha introducido un tercer volumen, este cambio es más gradual, pudiendo ser esta la causa de que el gradiente de temperatura observado en el conductor sea menor que en la simulación anterior con solo dos condiciones diferentes.

7.4 SIMULACIÓN 4 (CASO EXTREMO)

En esta simulación los datos introducidos en el programa no son reales, esta simulación se ha llevado a cabo para poder observar de una forma mucho más clara el comportamiento del conductor cuando el cambio de una zona del conductor a otra es más grande, situaciones muy difíciles de encontrar en la vida real, pero que en casos muy específicos podrían llegar a darse. Los datos introducidos están dentro del rango de los datos reales para no introducir alguno que fue imposible que ocurriera.

	Medida
Estación meteorológica	-
Velocidad del viento (m/s)	0
Dirección del viento	90
Radiación solar (w/m ²)	0
Temperatura ambiente (°C)	15
Corriente (A)	650

Tabla 7.10 Primeras condiciones ambientales de la simulación 4 (condiciones extremas)

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{650^2 * 0.000069}{0.000395} = 73803.8 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(0) = 0$$

$$V_z = \text{cos}(0) = 1$$

	Medida
Estación meteorológica	-
Velocidad del viento (m/s)	10
Dirección del viento	90
Radiación solar (w/m ²)	0
Temperatura ambiente (°C)	15
Corriente (A)	650

Tabla 7.11 Segundas condiciones ambientales de la simulación 4 (condiciones extremas)

$$Q = \frac{I^2 * R}{s} = \frac{650^2 * 0.000069}{0.000395} = 73803.8 \text{ w/m}^3$$

$$V_x = \text{sen}(90) = -1$$

$$V_z = \text{cos}(90) = 0$$

Dos condiciones ambientales diferentes.

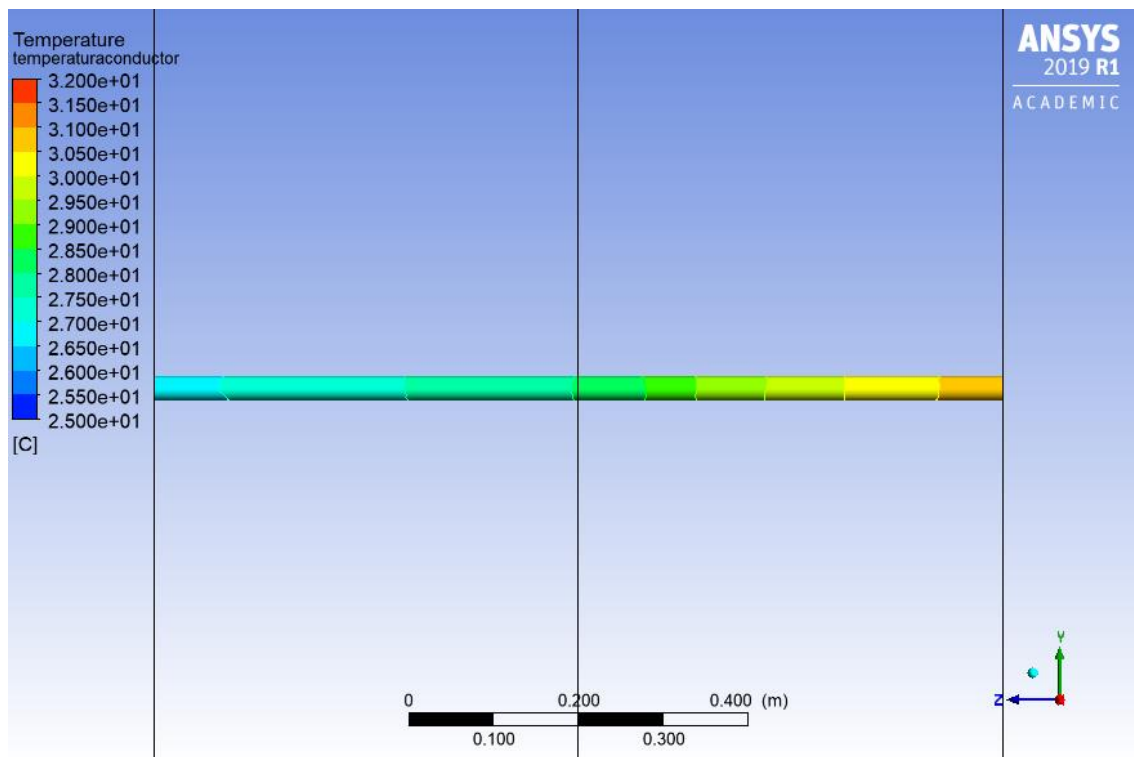


Figura 7.13 Temperatura del conductor en la simulación 4 con dos zonas diferenciadas

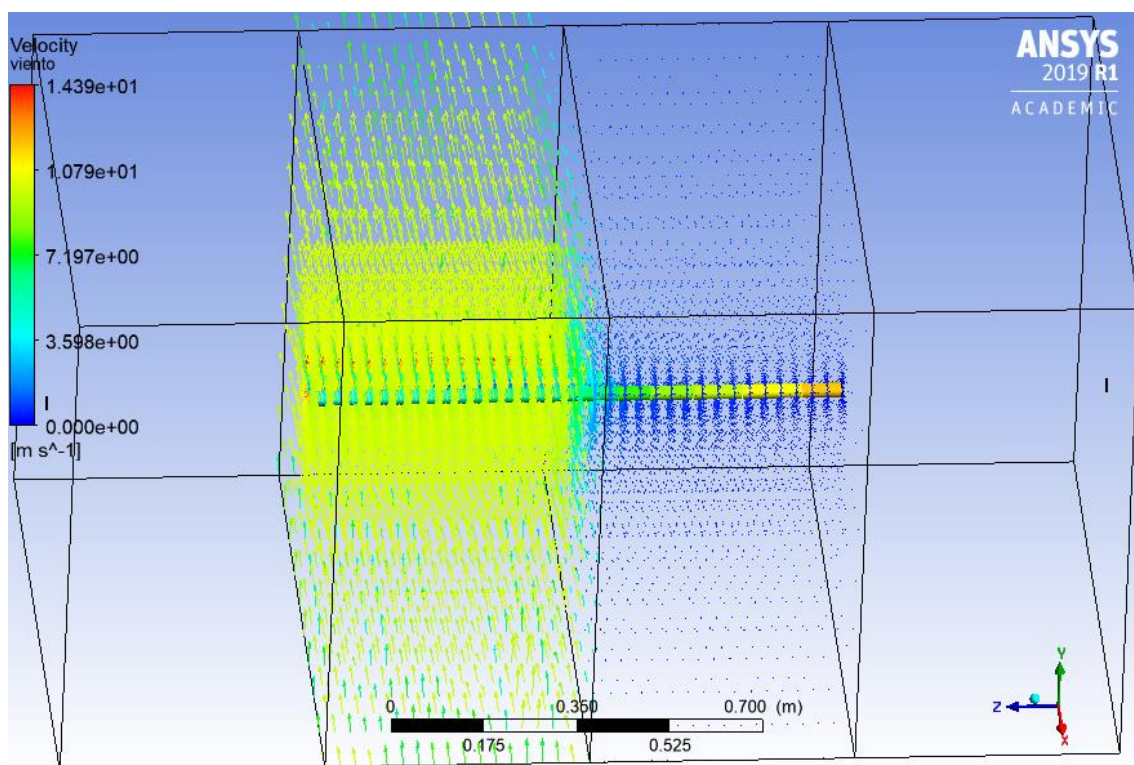


Figura 7.14 Líneas de viento en la simulación 4 con dos zonas diferenciadas

En esta simulación no contamos con datos reales, aun así, no son datos imposibles de producirse, la corriente que circula por el conductor es de 650 A, una corriente observada en los datos reales, bastante alta, el resto de variables no son extremadamente altas, pero son completamente diferentes la una de la otra, por ejemplo en la zona derecha tenemos viento a 10 m/s y con una dirección perpendicular al eje del conductor y en la zona izquierda no existe viento, como se puede observar en la figura 7.14, esto hace que en la zona izquierda existe refrigeración por convección mientras que en la zona derecha la refrigeración por convección será nula.

En la figura 7.13 se puede observar que la máxima temperatura que alcanza el conductor es de 31°C y la mínima de 27°C, son 4°C de diferencia en una longitud de apenas 1 metro de conductor, este gradiente es mucho mayor que en el resto de las simulaciones realizadas anteriormente y nos indica que la dirección y la magnitud del viento son las variables críticas que determinarán la temperatura del conductor.

En la figura 7.14 se pueden observar las líneas de viento en la zona izquierda el viento tiene una magnitud de 10 m/s, muy grande en comparación con la zona derecha que no tiene viento, es lógico que sea la zona derecha la que presenta una mayor temperatura del conductor.

Tres condiciones ambientales diferentes.

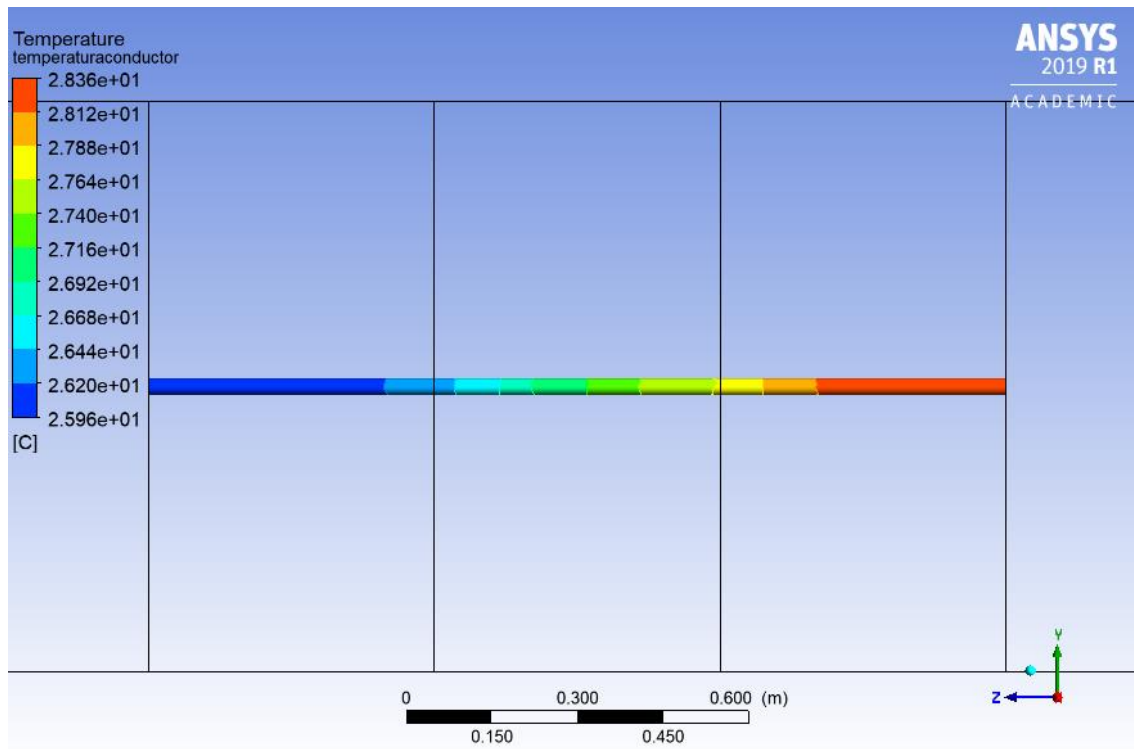


Figura 7.15 Temperatura del conductor en la simulación 4 con tres zonas diferenciadas

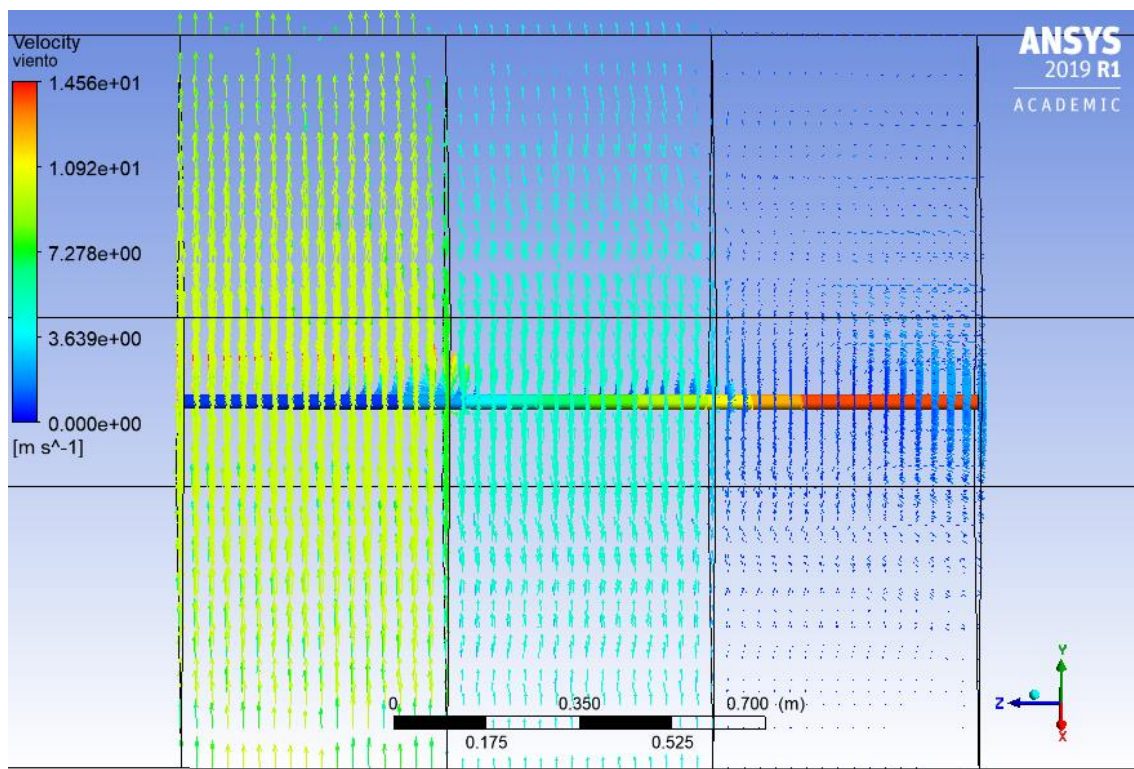


Figura 7.16 Líneas de viento en la simulación 4 con tres zonas diferenciadas

En la figura 7.15 se observa la temperatura del conductor en la simulación con tres condiciones meteorológicas distintas. La mayor temperatura que presenta el conductor es de 28.36°C mientras que la temperatura más baja es de 25.96°C , en este caso la diferencia de temperatura que experimentará el conductor es de 2.4°C en una longitud de conductor 0.5 m superior a la simulación con dos volúmenes.

Se vuelve a observar que al introducir este tercer volumen con condiciones ambientales intermedias el gradiente obtenido es menor, pero la superficie en la que tiene lugar es mayoritariamente la que presenta estas nuevas condiciones estabilizándose antes de llegar al extremo.

En la figura 7.16 se observan las líneas de viento, los extremos del conductor son iguales a los de la simulación con dos condiciones meteorológicas distintas, en la zona central se ha simulado una velocidad de 5 m/s, la media de las otras dos, para que se produzca un cambio más progresivo que sea más real al experimentado en la realidad.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado cuatro simulaciones en las que el conductor estaba sometido a diferentes condiciones meteorológicas a lo largo de su longitud, en cada uno de los casos se han realizado dos versiones distintas, en una el conductor se ha visto sometido a dos condiciones meteorológicas diferentes, estos datos eran reales, y en el otro caso al conductor se le ha sometido a tres condiciones meteorológicas distintas, las dos condiciones del extremo del conductor son datos reales, es en la zona central en la que los datos no son reales si no una media de las otras dos condiciones, esta zona está creada con el fin de que la simulación tenga una mayor similitud con el proceso ocurrido en la realidad, ya que, no se van a producir cambios bruscos en la temperatura y la dirección del viento, si no que deberán ser algo progresivos.

En las dos primeras simulaciones la diferencia de temperatura que se produce en el conductor es muy pequeña, en el caso de la simulación con dos condiciones meteorológicas distintas en la primera el gradiente es de 0.3°C y en la segunda de 0.5°C , mientras que en la simulación con tres condiciones meteorológicas es de 0.3°C en ambas. La diferencia de temperatura observada en el conductor es muy pequeña como para ver su comportamiento, pero estas dos simulaciones son útiles a la hora de verificar el comportamiento del modelo, aunque este proceso se llevó a cabo en el apartado del modelo de validación, con dos o tres condiciones meteorológicas distintas se verifica que el comportamiento es bastante semejante a la realidad ya que las temperaturas del conductor, algo mayores en la realidad que en la simulación son bastante semejantes. Otro punto que podemos observar en estas dos simulaciones es que cuando se introducen tres condiciones distintas, la variación de temperatura a lo largo del conductor es ligeramente menor que con dos condiciones distintas y este cambio se produce en una longitud algo superior, lo que quiere decir que la introducción de unas condiciones intermedias suaviza el cambio, aunque finalmente los resultados en los extremos son prácticamente iguales.

En la tercera simulación también se han introducido datos reales, en esta se ha buscado un caso en el que las condiciones a las que se ve sometido el conductor sean diferentes entre sí, para poder ver de forma más clara su comportamiento. Según los datos reales, el cambio de temperatura que debería experimentar el conductor es de 1°C , en la simulación este cambio es de 1°C cuando se introducen dos condiciones distintas y de 0.4°C cuando se introducen tres, como se observó en las otras dos simulaciones anteriores la temperatura varía en menor medida con tres condiciones distintas, pero el cambio de temperatura que sufre el conductor se da en una corta longitud, esto significa que las condiciones meteorológicas a las que se ve sometido el conductor en cada parte de su longitud van a determinar la temperatura de funcionamiento del conductor, sin que ésta sea constante a lo largo de toda su longitud, se producirán gradientes de temperatura de mayor o menor magnitud en los lugares de la línea en los que se produzcan cambios en las magnitudes ambientales que afectan al conductor.

La última simulación realizada es la única en la que los datos introducidos son ficticios, la finalidad de esta simulación es, dentro de unos márgenes reales, simular unas condiciones extremas, que se den en la realidad sería muy extraño pero no imposible, la dirección del viento simulada es perpendicular al eje del conductor, situación en la que la evacuación del calor sea máxima, mientras que en la otra zona del conductor no existirá viento y la disipación del calor provocado por el transporte de corriente será nula, en esta simulación se observa un gradiente de 5°C cuando solo se introducen dos condiciones distintas y casi 3°C cuando se introducen las

tres, en este caso es un cambio muy significativo en la temperatura del conductor, cuando se simulan la condición intermedia es más pequeño el cambio dado pero se llega a la conclusión de que las distintas partes del conductor van a estar a distintas temperaturas, es decir, aunque se trate de un material conductor del calor existirán diferencias, en algunos casos significativas, dependiendo directamente de las condiciones meteorológicas a las que esté sometido el conductor.

Estas diferencias de temperatura que existirán a lo largo del conductor determinarán la ampacidad del mismo, por lo que será de vital importancia identificar las zonas en las que estas diferencias se van a producir debido a que la temperatura en una zona puede ser completamente diferente a la que se da en otra y si la ampacidad se calcula con datos menores a los reales, la corriente que circule por el conductor podría ser superior a la permitida y producir averías como por ejemplo el recocido del conductor.

8.1 FUTURAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN

Tras la realización de este trabajo existen diversos aspectos en los que se podrían desarrollar futuras investigaciones relacionados con la ampacidad de las líneas eléctricas. Entre ellos, algunos temas interesantes pueden ser:

- Emplazamiento de sensores y estaciones meteorológicas

Como se ha desarrollado en este trabajo el punto más importante a la hora de realizar la explotación dinámica de una línea, son las condiciones ambientales a las que va a estar sometida la línea, es con estos datos sobre los que se van a realizar los cálculos que posteriormente proporcionarán el valor de la ampacidad. Esto implica que el método de conocer las condiciones ambientales, estaciones meteorológicas dispuestas a lo largo de la longitud de la línea, sea decisivo a la hora de maximizar la ampacidad, y situar estas estaciones en los puntos clave de la línea donde el conductor esté más solicitado se convierta en un punto importante de investigación.

- Velocidades bajas del viento

En la normativa actual la diferencia entre convección natural, producida con velocidades de viento bajas, y convección forzada, producida con velocidades de viento altas, está bien definida cuando la magnitud de la velocidad del viento es lo suficientemente baja o lo suficientemente alta, pero es en las situaciones en las que la velocidad del viento es baja pero sin llegar a ser extremadamente baja cuando la normativa no propone un método exacto y establece calcular las dos posibilidades (convección natural y convección forzada) y seleccionar la más restrictiva de las dos. En las simulaciones expuestas anteriormente se observa claramente que es con las condiciones de viento bajas en las que los resultados obtenidos de la simulación se alejan en mayor medida de los datos reales, por lo que resultaría interesante establecer una metodología que permita operar con mayor exactitud en estas situaciones.

- Paso de una línea soterrada a una línea aérea

Un punto que no se ha tenido en cuenta en este trabajo son los pasos de línea aérea a línea soterrada y viceversa, sería interesante conocer el comportamiento en estas secciones ya

que la evacuación del calor del conductor va a ser totalmente diferente en un medio y en otro, por ejemplo, en el medio aéreo existirá viento que ayudará a la evacuación del calor generado, esta situación no existirá cuando la línea se encuentre soterrada.

12. BIBLIOGRAFÍA

- IEEE 738 – Standard for calculating the current-temperature. Relationship of bare overhead lines.
- CIGRE TB 601- Guide for thermal rating calculations of overhead lines.
- CIGRE TB 299- Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings.
- CIGRE TB 498- Guide for application of direct Real-Time Monitoring Systems.
- CIGRE TB 756-Thermal monitoring of cable circuits and grid operators' use of dynamic rating systems.
- Metodología para gestión dinámica de capacidad en líneas aéreas de alta tensión basada en múltiples medidas discretas de condiciones ambientales - Raquel Martinez Torre. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria 2016.
- Aumento de la eficiencia de las redes de distribución de energía utilizando técnicas de calibrado dinámico – Antonio González Diego. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria 2016.
- Sistemas de energía eléctrica en alta tensión – Francisco Javier Balbás García. Servicio Publicaciones Universidad de Cantabria.
- Powerline Ampacity System, Theory, Modeling and Applications – Anjan K. Deb. CRC Press.
- Dynamic management in overhead lines: A successful case of reducing restriction in renewable energy sources integration – R. Mínguez, R. Martinez, M. Mañana, A. Arroyo, R. Domingo, A. Laso. Electric Power Systems Research 173, pp 135-142. 2019.
- Distributed vs. spot temperature measurements in Dynamic rating of overhead power lines – R. Martinez, A. Useros, P. Castro, A. Arroyo, M. Mañana. Electric Power Systems Research 170, pp 273-276. 2019.
- Calibrado dinámico de líneas para la integración de energías renovables – Proyecto Dynelec. Revista IndustriAmbiente N. 2, Septiembre 2013.
- REE <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/series-estadisticas-nacionales> [último acceso 23/06/2019].

ANEXO A_ Lista de figuras, gráficas y tablas

FIGURAS

Figura 1.1 – Estructura de un conductor

Figura 1.2 – Esquema de un análisis de una línea

Figura 4.1 – ANSYS Fluent

Figura 5.1 – Designer Modeler de ANSYS, crear nuevo sketch y extruir una geometría creada

Figura 5.2 – Configuración para definir una extrusión

Figura 5.3 – Realización de la operación ‘Boolean’

Figura 5.4 – Definir cada uno de los cuerpos como sólido o fluido

Figura 5.5 – Formar nueva parte

Figura 5.6 – Geometría de un conductor rodeado de un volumen de control

Figura 5.7 – Fluent Flow, seleccionar caras

Figura 5.8 – Definir el nombre de una geometría creada

Figura 5.9 – Nombres de la geometría creada

Figura 5.10 – Insertar sistema de coordenadas

Figura 5.11 – Definir situación de un nuevo sistema de coordenadas

Figura 5.12 – Nuevo sistema de coordenadas dentro de la geometría creada

Figura 5.13 – Creación de un nuevo ‘Match Control’

Figura 5.14 – Definir características de un nuevo ‘Match Control’

Figura 5.15 – Mallado de la geometría creada

Figura 5.16 – Mallado creado en el extremo del conductor

Figura 5.17 – Comparación del mallado creado a ambos extremos del conductor

Figura 5.18 – Selección del ‘Setup’ en ANSYS Fluent

Figura 5.19 – Fluent Launcher

Figura 5.20 – Gravedad

Figura 5.21 – Modelo de viscosidad del viento

Figura 5.22 – Radiación

Figura 5.23 – Creación de un nuevo material

Figura 5.24 – Selección de un nuevo material

Figura 5.25 – Condiciones de contorno de un material

Figura 5.26 – Fuente de calor de un sólido asignado a un material

Figura 5.27 – ‘Boundary Conditions’

Figura 5.28 – Partes de la geometría definidas con propiedades

Figura 5.29 – Configuración de las entradas de viento

Figura 5.30 – configuración de las zonas definidas como ‘Pressure-outlet’

Figura 5.31 – Creación de una nueva zona periódica

Figura 5.32 – Inicialización de la simulación

Figura 5.33 – Selección de resultados en ANSYS Fluent

Figura 5.34 – Creación de un nuevo contorno y un nuevo vector

Figura 5.35 – Definición de un contorno para visualizar la temperatura del conductor

Figura 5.36 – Temperatura del conductor en la simulación con temperatura baja

Figura 5.37 – Definición de un nuevo vector para visualiza las líneas de viento que actúan sobre el conductor

Figura 5.38 – Líneas de viento en la simulación con temperatura baja

Figura 5.39 – Creación de un plano auxiliar

Figura 5.40 – Visualización de la presión a la que se ve expuesto el conductor en la simulación con temperatura baja

Figura 5.41 – Temperatura del conductor en la simulación con temperatura media

Figura 5.42 – Líneas de viento en la simulación con temperatura media

Figura 5.43 – Temperatura del conductor en la simulación con temperatura alta

Figura 5.44 – Líneas de viento en la simulación con temperatura alta

Figura 6.1 – Geometría de la simulación con tres condiciones ambientales diferentes

Figura 6.2 – Creación de un cilindro en el eje YZ con el comando ‘revolve’

Figura 6.3 – Vista de la geometría en el plano YZ

Figura 6.4 – Diferentes entradas de viento empleadas en la simulación

Figura 6.5 – Sistemas de coordenadas empleados en la simulación de tres condiciones ambientales diferentes

Figura 6.6 – Zonas nombradas en la geometría

Figura 6.7 – Mallado sobre la geometría creada

Figura 6.8 – Generación de calor asignada a una sola parte del conductor

Figura 6.9 – Generación de calor asignada a una zona distinta del conductor

Figura 6.10 – Zonas llamadas ‘entrada’ asignadas como salida

Figura 6.11 – Geometría empleada para representar tres condiciones ambientales diferentes

Figura 6.12 – Distintas zonas de la geometría con tres zonas diferenciadas

Figura 6.13 – Mallado de la geometría con tres zonas diferenciadas

Figura 7.1 – Temperatura del conductor en la simulación 1 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.2 – Líneas de viento en la simulación 1 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.3 – Temperatura del conductor en la simulación 1 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.4 – Líneas de viento en la simulación 1 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.5 – Temperatura del conductor en la simulación 2 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.6 – Líneas de viento en la simulación 2 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.7 – Temperatura del conductor en la simulación 2 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.8 – Líneas de viento en la simulación 2 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.9 – Temperatura del conductor en la simulación 3 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.10 – Líneas de viento en la simulación 3 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.11 – Temperatura del conductor en la simulación 3 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.12 – Líneas de viento en la simulación 3 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.13 – Temperatura del conductor en la simulación 4 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.14 – Líneas de viento en la simulación 4 con dos zonas diferenciadas

Figura 7.15 – Temperatura del conductor en la simulación 4 con tres zonas diferenciadas

Figura 7.16 – Líneas de viento en la simulación 4 con tres zonas diferenciadas

GRÁFICAS

Gráfica 2.1 – Variación de la temperatura longitudinal a lo largo del conductor

Gráfica 4.1 – Inercia térmica del conductor ante un cambio en la corriente

TABLAS

Tabla 1.1 – Potencia eléctrica instalada en España

Tabla 2.1 – Número de Nusselts

Tabla 2.2 – Valores para distinto $Gr \cdot Pr$

Tabla 2.3 – Valores de las constantes para una atmósfera limpia o industrial

Tabla 2.4 – Variación de la temperatura del conductor sometido a distintas condiciones ambientales

Tabla 5.1 – Condiciones atmosféricas de la simulación a temperatura baja

Tabla 5.2 – Condiciones atmosféricas de la simulación a temperatura media

Tabla 5.3 – Condiciones atmosféricas de la simulación a temperatura alta

Tabla 7.1 – Primeras condiciones ambientales de la simulación 1

Tabla 7.2 – Segundas condiciones ambientales de la simulación 1

Tabla 7.3 – condiciones intermedias de la simulación 1

Tabla 7.4 – Primeras condiciones ambientales de la simulación 2

Tabla 7.5 – Segundas condiciones ambientales de la simulación 2

Tabla 7.6 – condiciones intermedias de la simulación 2

Tabla 7.7 – Primeras condiciones ambientales de la simulación 3

Tabla 7.8 – Segundas condiciones ambientales de la simulación 3

Tabla 7.9 – condiciones intermedias de la simulación 3

Tabla 7.10 – Primeras condiciones ambientales de la simulación 4 (condiciones extremas)

Tabla 7.11 – Segundas condiciones ambientales de la simulación 4 (condiciones extremas)

