

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

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**MODELO DINÁMICO DE AMPACIDAD
MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LAS
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS.**

**(Dynamic ampacity model through the use of
climatic conditions)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autora: María Arroyo Herrero

Diciembre – 2016

Agradecimientos

Primero me gustaría expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado en la realización de este trabajo de fin de grado, así como a mi tutor, Mario Mañana, por su consejo.

Agradecer también a mi familia, cuya paciencia ha sido indispensable. A Cristina y Clara, por todo el apoyo que me han brindado sin el cual estos cuatro años habrían sido mucho más duros. A Miguel, por estar siempre cuando lo he necesitado y ver la parte positiva de todo.

Muchas gracias a todos.

Resumen

En el presente documento se expone un estudio de la temperatura máxima admisible para el correcto rendimiento de las líneas de alta tensión, temperatura también denominada como ampacidad.

Se expondrán las causas que han llevado a este estudio, entre las cuales se encuentra el hecho de que la población demanda cada vez una mayor potencia per cápita, mientras que las administraciones correspondientes no están construyendo mayor número de líneas por una serie de razones, lo cual hace necesario la mejora de la eficiencia de las líneas actualmente instaladas, de forma que se pueda realizar un transporte de potencia mayor por línea.

Debido a estas condiciones, la solución más sencilla y económica implica la creación de un modelo dinámico de ampacidad, de forma que este valor varíe a tiempo real dependiendo de valores climáticos medidos a partir de diferentes estaciones meteorológicas, instaladas en puntos concretos de las líneas.

Se realizará un estudio de la variabilidad que implican cambios en diferentes factores climáticos como son la humedad, la velocidad y dirección del viento o la lluvia a partir del simulador multifísico ANSYS, y gracias también a una pequeña instalación situada en la fachada del edificio ETSIIT de la cual se pueden obtener datos reales de temperatura como comparativa con los resultados obtenidos por ordenador.

Además, se realizará un modelo de dicha instalación a partir del programa de diseño INVENTOR, de forma que resulte más accesible y visual y no se necesite de esta forma acceder a la fachada.

Al final del estudio se puede ver como los factores que más influyen en la ampacidad de las líneas son por un lado la presencia de lluvia y por otro la velocidad y dirección del viento, siendo este el factor más importante, como mostrarán los resultados de las simulaciones.

Review

This paper presents a study of the maximum permissible temperature for the correct performance of high voltage lines, temperature that can also be known as ampacity.

The causes that have led to this study will be explained, among all them is the fact that the population is demanding more power per capita along the years, while the corresponding administrations are not building more lines due to different matters, this is the reason why it is necessary to improve the efficiency of the lines currently installed, so that a greater power transport can be carried out per line.

Owing to these conditions, the simplest and most economical solution involves the creation of a dynamic ampacity model, so that this value varies in real time, depending on the climatic values, measured from different meteorological stations installed in specific points of the lines.

A variability study involving changes in different climatic factors such as humidity, wind speed and direction or the presence of rain will be carried out through the use of ANSYS, a multiphysical computer simulator, and also thanks to a small meteorological installation located on the facade of the ETSIIT building, with it, real temperature data can be obtained and used as comparative with the computer results.

In addition, a model of this installation will be created with the design program INVENTOR, so that the entire installation can be more accessible and visual and thus not needed to accede the facade to see it.

At the end of this papers, it can be seen that the climatic factors that most affect the ampacity of the lines are, on the one hand the presence of rain, and in the other hand the speed and direction of the wind; this last variable is the most important one, and it will be shown with the results of the simulations.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación del estudio	1
1.2. Objetivo del estudio	5
2. CONTEXTO HISTÓRICO	6
2.1. Breve historia del transporte eléctrico	6
2.2. Avances tecnológicos desde la revolución industrial	8
3. DESCRIPCIÓN DE LAS REDES INTELIGENTES (SMART GRIDS)	10
3.1. Historia y evolución	10
3.2. Objetivos de las redes inteligentes	12
4. DESCRIPCIÓN DEL PUESTO DE ESTUDIO (LÍNEA AUXILIAR INSTALADA)	13
4.1. Componentes principales	14
4.2. Descripción	15
4.2.1. Medida de temperatura	16
4.2.2. Medida de variables meteorológicas	17
5. MODELOS APLICABLES EN LAS REDES ELÉCTRICAS ACTUALES	17
5.1. Visión y ecuaciones generales	17
5.2. Cálculo del calor generado y el calor cedido	18
5.2.1. Cálculo del calor generado por efecto joule	18
5.2.2. Cálculo del calor generado por efectos magnéticos	19
5.2.3. Cálculo del calor generado por radiación solar	20
5.2.4. Distribución de temperatura en un conductor	21
5.2.5. Calculo del calor cedido por convección	23
5.2.6. Calculo del calor cedido por radiación	27
5.3. Métodos para el cálculo del balance térmico	29
5.3.1. Método estático	29
5.3.2. Método dinámico	30

6. DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN	32
6.1. Modelo de inventor	32
6.2. Modelo con ansys	33
6.2.1. Generación de la geometría	35
6.2.2. Tipos de mallado	36
6.2.3. Generación del mallado	39
6.2.4. Análisis	45
7. RESULTADOS OBTENIDOS	51
7.1. Análisis térmico	51
7.2. Análisis de fluidos	55
7.3. Análisis en conjunto	66
8. COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES	67
9. LÍNEAS FUTURAS	68
10. NORMATIVA APLICABLE	69
10.1. Comparacion de la normativa ieee y cigre	74
11. BIBLIOGRAFÍA	75
11.1. Artículos	75
11.2. Sitios web	76
11.3. Libros y manuales	77
11.4. Normativa	78
12. ANEXO I	80
13. ANEXO II	85
14. ANEXO III	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escenario de la evolución de la población mundial	1
Figura 2. Escenario de la evolución de la demanda eléctrica hasta 2030	2
Figura 3. Escenario de la evolución de la demanda per cápita hasta 2030.....	3
Figura 4. Evolución del consumo mundial de energía y aumento de la población mundial	5
Figura 5. Nuevas tecnologías que han aparecido a raíz de la tercera revolución industrial.....	9
Figura 6. Evolución de la red eléctrica a lo largo del tiempo.....	11
Figura 7. Monitorización y previsión diaria del consumo energético en España (REE)	12
Figura 8. Visión global de los componentes principales del puesto de estudio.....	14
Figura 9. Variación del efecto pelicular a partir de cambios en frecuencia y en radios del conductor.....	19
Figura 10. Aumento de la temperatura ante cambios de corriente	21
Figura 11. Distribución radial de densidad de corriente y temperatura en un conductor (simulación por el método de elementos finitos).....	22
Figura 12. Diferencia entre convección forzada y natural.....	25
Figura 13. Enfriamiento por convección debido a vientos con distintas velocidades y direcciones	27
Figura 14. Métodos de cálculo del balance térmico de un conductor	29
Figura 15. Pérdidas y ganancias térmicas en el conductor	31
Figura 16. Visión global del modelo INVENTOR	32
Figura 17. Visión en detalle del modelo INVENTOR	33
Figura 18. Visualización del volumen de control rodeando el cuerpo estudiado	36
Figura 19. Integración numérica para aproximación del área bajo la curva.....	37
Figura 20. Tipología de elementos en un mallado	38
Figura 21. Características elegidas para el mallado, método 'Curvature'	40
Figura 22. Mallado obtenido con el método 'curvature'	40
Figura 23. Mallado obtenido con el método 'proximity'	41
Figura 24. Mallado obtenido con el método 'proximity and curvature'.....	42
Figura 25. Características modificadas para la obtención del mallado.....	44
Figura 26. Visualización final del mallado a utilizar en el estudio	44
Figura 27. Datos obtenidos a partir de la simulación eléctrica.	47
Figura 28. Distribución de temperaturas en el interior del cable.....	53
Figura 29. Gráfico, variación de la temperatura con distintos coeficientes convectivos	54
Figura 30. Variación de la intensidad de los vectores (viento) con el ángulo de ataque	56
Figura 31. Gráfico de variación térmica con respecto al ángulo del viento.	57
Figura 32. variación térmica con variaciones de la humedad	59
Figura 33. Gráfico de la 1era simulación de temperatura con lluvia (10°C)	64
Figura 34. Gráfico de la 2da simulación de temperatura con lluvia (14°C).....	65
Figura 35. Gráfico de la 3ra simulación de temperatura con lluvia. (18°C)	65
Figura 36. Datalogger CR800	81
Figura 37. Esfera de aluminio anodizado.....	81
Figura 38. Sondas de tipo pt100.....	82
Figura 39. Anemoveleta ultrasónica.....	83
Figura 40. Imagen de un piranómetro.....	84
Figura 41. Balance radiativo terrestre	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del material del conductor sobre el que se realiza el estudio [14]	15
Tabla 2. Valores de los coeficientes A y m para el cálculo del valor de Nusselt en convección natural	24
Tabla 3. Coeficientes necesarios para el cálculo del número de Nusselt en convección forzada	26
Tabla 4. Numero de nodos según el tipo de elemento en el mallado	38
Tabla 5. Numero de nodos y elementos, método 'curvature'	41
Tabla 6. Numero de nodos y elementos, método 'proximity'	42
Tabla 7. Numero de nodos y elementos, método 'proximity and curvature'	43
Tabla 8. Numero de nodos y elementos del mallado final	44
Tabla 9. Valores tomados para la simulación eléctrica	46
Tabla 10. Valores de coeficiente convectivo con respecto a la velocidad del viento	52
Tabla 11. Datos de variación térmica con la dirección del viento	56
Tabla 12. Resultados de la simulación con humedad	60
Tabla 13. Resultados de las simulaciones con lluvia	64
Tabla 14. Resultados ante variaciones de las variables en conjunto	66
Tabla 15. Medida de la radiación solar total, que llega a la atmósfera.	87
Tabla 16. Radiación total que llega a la superficie terrestre	88
Tabla 17. Caso real 1 para la simulación de la humedad	89
Tabla 18. Caso real 2 para la simulación de la humedad	89
Tabla 19. Caso real 3 para la simulación de la humedad	90
Tabla 20. Caso real 1 para la simulación de la lluvia	90
Tabla 21. Caso real 2 para la simulación de la lluvia	91

1.INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

A lo largo de nuestra historia, el ser humano ha evolucionado y buscado formas para cubrir nuestras necesidades básicas y a continuación, a llegar a un estado de bienestar.

En las últimas décadas, principalmente debido al gran aumento de la población mundial y al acceso a mayores niveles de consumo y bienestar de países hasta ahora en vías de desarrollo, la demanda de energía mundial se ha incrementado considerablemente. Estudios realizados en el ámbito de la demanda energética mundial, indican que dicha demanda durante el periodo 2000-2030 aumentará a un ritmo del 1.8% anual como puede apreciarse a partir de las figuras 1 y 2. Concretamente en España, el consumo en 2015 ha aumentado en un 1.9% tal y como indican las previsiones y a pesar de la crisis que se ha vivido en los últimos años, con la que el consumo nacional incluso se había reducido 4 años consecutivos. [11]

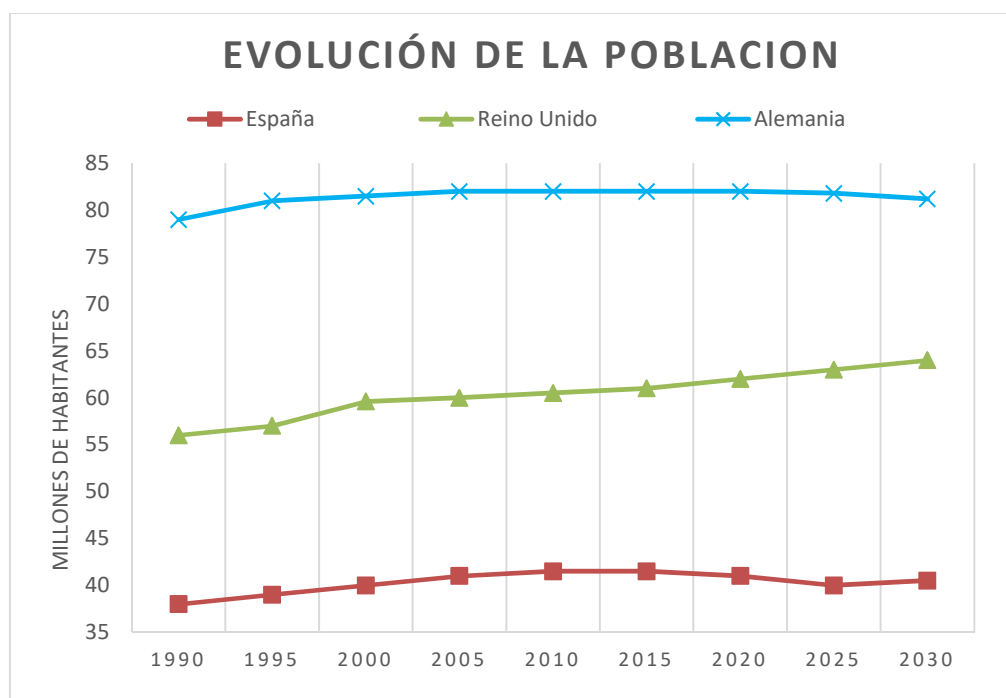


Figura 1. Escenario de la evolución de la población mundial

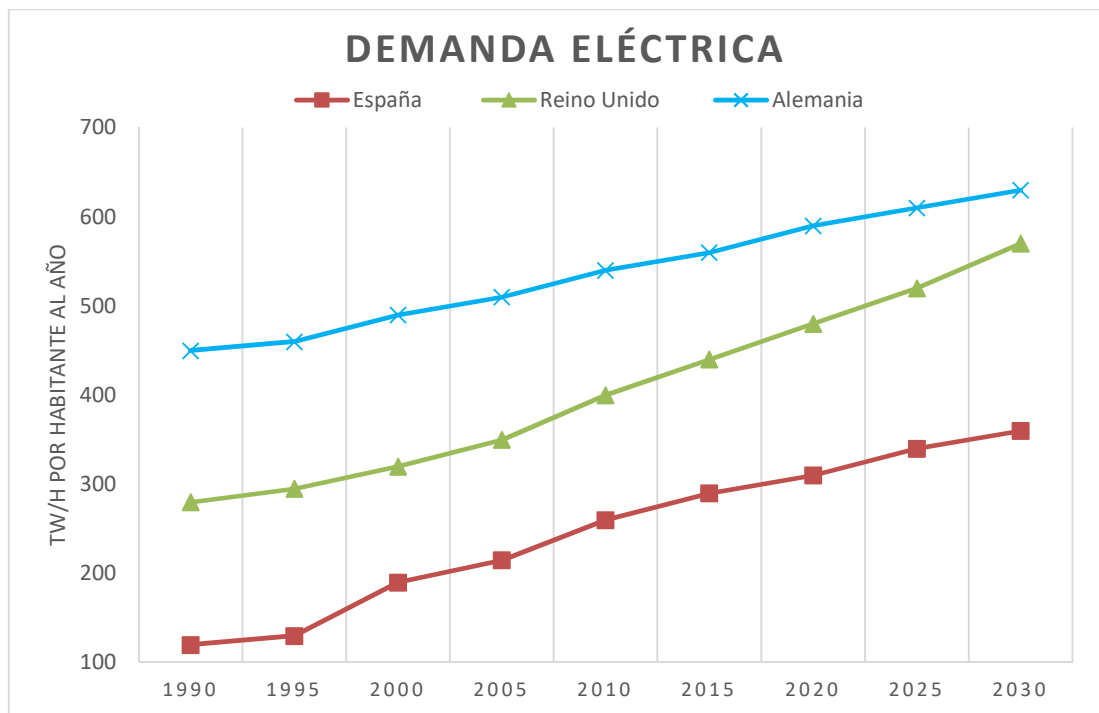


Figura 2. Escenario de la evolución de la demanda eléctrica hasta 2030

Estas mismas previsiones indican también que el sistema energético estará dominado mayoritariamente por combustibles fósiles, lo que supondrá un aumento de las emisiones mundiales de CO₂ siendo estas en el 2030 el doble a las que se produjeron en 1990.

Debido a este posible futuro aumento de las emisiones, los métodos de generación de energía de forma renovable están cobrando cada vez mayor peso dentro de la red eléctrica mundial. En España, el 36,9% de la generación eléctrica peninsular proviene de las energías renovables, siendo las energías hidráulica y eólica las de mayor importancia.

En este caso en particular, y en concreto, la que más nos influye para este estudio, la energía eólica, se debe no solo a un aumento de los parques de generación eólicos sino a un incremento de la potencia que cada uno de los aerogeneradores que se están instalando o que están ya instalados puede suministrar a la red eléctrica.

La integración de la generación eólica ha consolidado al sistema eléctrico español como uno de los líderes mundiales en renovables,

llegando en máximos a cubrirse el 70,4% del consumo eléctrico peninsular, pero también supone un problema a la hora de transportar esa energía generada desde los aerogeneradores por las líneas de transmisión, sin perder potencia o perdiendo la menor posible.

Este crecimiento de la capacidad de generación energética no ha sido un proceso paralelo al desarrollo de la capacidad de transporte y distribución de las infraestructuras ya existentes. [12]

Con todo esto, se hace evidente que es necesario un aumento de la capacidad de evacuación de la energía en general, ya que según las previsiones la demanda per cápita continuará aumentando a lo largo de los años (figura 3).

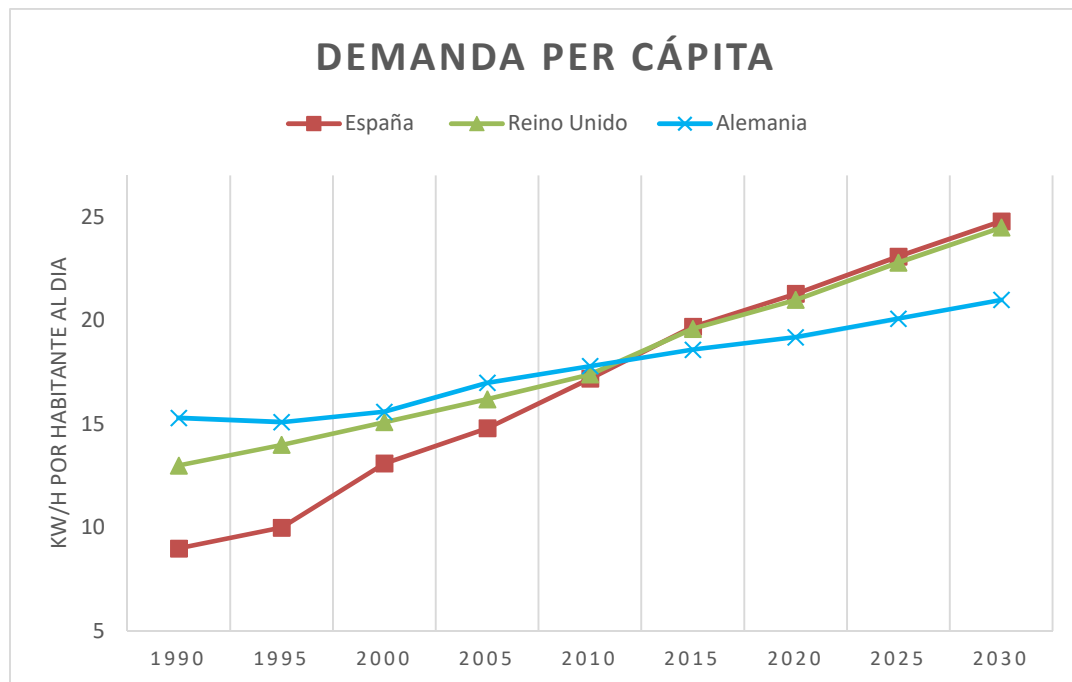


Figura 3. Escenario de la evolución de la demanda per cápita hasta 2030

Este objetivo de aumento de capacidad de transmisión se puede realizar de varias formas:

1. Instalación de nuevas infraestructuras de transporte y distribución.
2. Repotenciación de las infraestructuras ya existentes, mediante la utilización de conductores de alta capacidad y/o el aumento de la tensión de evacuación.

3. Utilización de técnicas dinámicas de explotación, que permitan aprovechar las condiciones ambientales existentes para optimizar la capacidad de transmisión de las infraestructuras disponibles.

La primera de las opciones es bastante inviable, primero, debido a los costes económicos que supondría, segundo debido a los largos plazos de espera que conllevaría su construcción y tercero debido al impacto social y medioambiental de las nuevas líneas (habría que realizar expropiaciones, realizar estudios medioambientales...)

La segunda opción tiene más ventajas desde el punto de vista económico, debido a que supone unos costes menores, pero, aunque pueda llevarse a cabo sin realizar nuevos estudios medioambientales, con los retrasos que esto conlleva, el incremento de la capacidad que se podría obtener es muy limitado, debido que no estaremos aplicando cambios muy significativos en las infraestructuras de transporte.

La última de las opciones basada en técnicas dinámicas, es la que requiere menor inversión económica de las tres posibilidades expuestas y presenta grandes ventajas con respecto a tiempos y a disponibilidad.

La técnica se basa en la monitorización de la temperatura del conductor en tiempo real para maximizar su capacidad de evacuación, teniendo en cuenta tanto la intensidad que recorre el cable en cada momento como las condiciones ambientales externas.

Todos estos cambios en la red eléctrica suponen un cambio en la forma de controlar y gestionar las instalaciones y los dispositivos eléctricos. Esto desemboca en los llamados "Smart grids" o redes inteligentes, en donde se plantean nuevos retos de cara a la optimización de los recursos energéticos. Este trabajo se basará en la aplicación de este tercer método y la comprobación de los resultados que supone. [13]

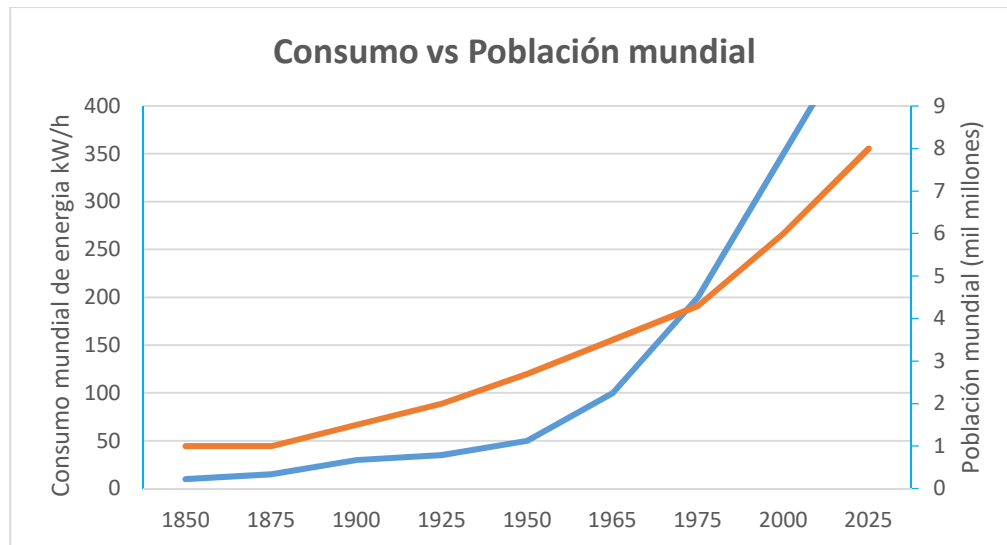


Figura 4. Evolución del consumo mundial de energía y aumento de la población mundial

1.2. **OBJETIVO DEL ESTUDIO**

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el nuevo paradigma en las redes eléctricas inteligentes requerirá de una gestión dinámica de la capacidad de transporte de las líneas eléctricas.

Esta gestión implicaría la monitorización de variables meteorológicas, para comprobar la influencia de las mismas sobre la capacidad térmica del conductor, de forma que éste sea capaz incluso de sobrepasar la máxima corriente que, según la normativa, se ha fijado como máxima para dicho conductor, y por lo tanto pudiendo desarrollarse un modelo dinámico de ampacidad, (temperatura máxima admisible en el conductor) con respecto de las líneas de transporte.

Además de la monitorización de los cambios de temperatura que implica la climatología en el cable, habría que tener en cuenta además el resto de elementos que componen la línea y que también tienen limitaciones, ya sean térmicas o de paso de corriente (trafos, celdas, interruptores, etc.).

Si se realizan cambios en la corriente máxima que atraviesa la línea, también habría que tener en cuenta cambios en estos elementos para que

soporten este aumento sin peligro de que se reduzca su vida útil demasiado y sin que generen problemas de seguridad.

El objetivo del presente proyecto será comparar los resultados obtenidos a partir de la simulación el sistema multifísico ANSYS, con los resultados reales que podrán ser medidos en una línea de tensión instalada en la fachada de la escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicaciones (ETSIIT).

Posteriormente se realizará un estudio de los resultados obtenidos, a través del análisis de datos y se finalizará con las conclusiones pertinentes.

2. CONTEXTO HISTÓRICO

2.1. BREVE HISTORIA DEL TRANSPORTE ELÉCTRICO

La electricidad ha sido uno de los descubrimientos más importantes que ha realizado el ser humano y supuso desde el principio grandes cambios tanto sociales como económicos.

Las primeras investigaciones acerca de la electricidad se realizaron en el año 1747, por Benjamín Franklin, quien consideraba que en general existían dos tipos de fluidos en la tierra y que la electricidad era por tanto uno de esos fluidos, algo que estaba presente en todos los cuerpos ya fuese en defecto o en exceso, comenzando así con la diferenciación entre electricidad negativa como falta de la misma y electricidad positiva como el exceso.

A partir de estas observaciones, Franklin comenzó a establecer relaciones entre los rayos que caían al suelo y el ámbar, material que ya había sido estudiado en épocas mucho anteriores, concretamente en la Grecia antigua por Tales de Mileto (600 a.C), debido a la gran electricidad estática que posee (al frotarlo atraía pequeñas partículas de polvo). Estas relaciones entre el rayo y el ámbar fueron esenciales para poder definir el

concepto de carga eléctrica y también para inventar el famoso pararrayos, al conocer la atracción de los rayos hacia los materiales metálicos.

Décadas después, Alessandro Volta explicó la capacidad de excitación de la electricidad, al observar distintos metales en agua salada, en concreto, fabricó sus famosas “baterías”, las cuales producían cargas eléctricas por medio de una reacción química originada con dos placas de zinc y cobre sumergidas en ácido sulfúrico, y denominó el concepto como corriente. En 1819, Hans Oersted descubrió que una aguja magnética colgada de un hilo, se apartaba de su posición inicial cuando pasaba próxima a ella una corriente eléctrica y postuló que estas producían un efecto magnético.

Otro gran científico importante en la historia de la electricidad es Nikola Tesla, quien inventó un tipo de transformador que produce señales de alta frecuencia, demostrando que las máquinas funcionaban mejor con esa corriente alterna que con la corriente continua previamente descubierta. En este mismo periodo y gracias a James Maxwell, aparecen las ecuaciones que unificaban la descripción de los comportamientos eléctricos y magnéticos y su desplazamiento a través el espacio en forma de ondas.

A finales del siglo XIX y sobre todo a lo largo del siglo XX, todos los hogares comienzan a electrificarse, a partir de simples bombillas y posteriormente cocinas, ventiladores, radios, teléfonos...

El primer generador de corriente alterna fue construido en 1832 por Hipólito Pixii, y los avances que se realizaron en el ámbito eléctrico fueron dentro del campo de la corriente continua, por lo que la primera transmisión se realizó de esta forma. En 1882 se instaló el primer tendido eléctrico de una línea de 2kV DC en Alemania. Desde esta primera infraestructura, las líneas de distribución instaladas a continuación tanto en Europa como en América funcionaron en baja corriente en continua, pero existían grandes pérdidas en el transporte.

No fue hasta que se inventó el transformador en 1885 y se produjeron las pertinentes mejoras en el generador de corriente alterna, cuando ésta empezó a considerarse para la distribución y transporte energético.

Estas mejoras permitían generar energía de forma más barata gracias a turbinas hidroeléctricas.

El transformador permitía variar de forma mucho más sencilla y eficiente el nivel de tensión en las líneas, por lo que se podían conseguir transportes a largas distancias con pérdidas mucho menores.

A finales del siglo XIX se introdujo la transmisión trifásica con sus correspondientes ventajas, y a principios del siglo siguiente aparecieron los primeros motores de inducción.

Desde entonces no se han producido avances tecnológicos realmente innovadores para la distribución y transporte energético, actualmente se está estudiando la posibilidad de volver a la transmisión de energía a través de corrientes continuas, pero seguirían existiendo limitaciones en cuanto a la potencia máxima que se puede transportar, no siendo suficiente para desalojar la energía generada en algunos puntos de la red, mayormente aquellos donde se genera energía a partir de fuentes renovables ya que son muy intermitentes. [14]

2.2. AVANCES TECNOLÓGICOS DESDE LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

La revolución industrial surgió como máxima expresión de la forma que tiene el ser humano de cambiar lo que nos rodea buscando factores que hagan más cómoda nuestra vida, y transformó enormemente ámbitos tan importantes como la economía o la política, tanto de países en concreto, como de forma mundial.

La aceleración científica que se produjo debido a los impulsos de nuevas investigaciones e innovaciones, permitieron un crecimiento económico independiente de la agricultura y más basado en un sistema

secundario de servicios. Este proceso comenzó en Inglaterra entre 1750 y 1850 de forma espontánea, basándose en el desarrollo de la industria manufacturera y generalizando el uso de maquinarias en fábricas en sustitución de la mano de obra, con el objetivo de ahorrar tanto costes económicos (de producción) como de reducir los tiempos de fabricación.

A principios del siglo XX, la energía eléctrica, generada a partir de motores de combustión interna, principalmente gracias a los combustibles fósiles, dieron lugar a la segunda revolución industrial. Las innovaciones técnicas que aparecieron gracias a nuevas fuentes de energía como el gas, el petróleo o la electricidad, nuevos materiales y nuevos sistemas de transporte y comunicación, introdujeron transformaciones en cadena que afectaron al factor trabajo y sistema científico. A través de la utilización de la electricidad en las maquinarias de las fabricas comenzó la producción de forma masiva, también conocida como producción en cadena que comenzó con los automóviles de Henry Ford. [6]



Figura 5. Nuevas tecnologías que han aparecido a raíz de la tercera revolución industrial

La tercera revolución industrial o también llamada revolución de la inteligencia (RCT Revolución Científico Técnica), es la que estamos viviendo en la actualidad y que ha tenido comienzo a mediados del siglo

XX. La aparición de la tecnología de la comunicación de internet y las diferentes energías renovables que pretenden sustituir a las energías de origen fósil, han generado nuevos cambios tanto económicos como políticos.

De entre las nuevas tecnologías que han aparecido en este periodo, se puede destacar la conversión de edificios en plantas de energía, el transporte basado en el vehículo eléctrico o la tecnología a la que se ha hecho referencia previamente, denominada "Smart grid" o red de distribución de energía inteligente, la cual se basa en la integración dinámica de los desarrollos en ingeniería eléctrica y los avances de las tecnologías de la información y telecomunicación. [7]

3. DESCRIPCIÓN DE LAS REDES INTELIGENTES (SMART GRIDS)

3.1. HISTORIA Y EVOLUCIÓN

Como ya se ha mencionado, el sistema eléctrico ha tenido cambios muy limitados en su estructura desde su primera aparición. La primera evolución vino de la mano de Thomas A. Edison, quien creó la primera red eléctrica de corriente continua en 1881.

Esta primera etapa está caracterizada por la innovación y la aparición de muchos nuevos conceptos dispositivos y modelos, siendo por supuesto el invento más destacado entre todos el de la bombilla eléctrica.

La segunda etapa evolutiva del sistema eléctrico se debe a la introducción de la corriente alterna gracias a Nikola Tesla y George Westinghouse. A finales del siglo XIX se producen las primeras transmisiones de energía eléctrica a larga distancia, permitiendo así que la generación de esta energía no tuviese que estar cercana al punto de consumo y superando así las limitaciones previas que presentaba la transmisión energética. [17]

Desde entonces, la infraestructura eléctrica ha cambiado muy poco, y hoy en día es ya inadecuada; no se diseñó para cubrir las necesidades del mundo digital actual, con las grandes necesidades energéticas que esto supone, es por esto que se necesita una nueva evolución del sistema que permita tener una estructura más fuerte y estable, evolución que puede ser posible gracias a los nuevos avances tecnológicos de los últimos años.

A raíz de esta problemática y con la intención de optimizar el control del consumo energético y mejorar los sistemas de monitorización existentes en la red, en 1980 aparecen los primeros monitores automáticos, para poder realizar seguimientos del consumo de los clientes.



Figura 6. Evolución de la red eléctrica a lo largo del tiempo

Una década más tarde, ya comenzó a existir una infraestructura avanzada capaz de determinar la cantidad de energía que es utilizada a lo largo del día. Sin ir más lejos, actualmente en la web de la red eléctrica española se puede acceder a esta información, que describe la energía que se ha suministrado las horas previas y realiza una predicción para las futuras horas del día, como se puede ver en la Figura 7. [18][19]

Para dar solución a las necesidades del sector eléctrico, las comisiones europeas comenzaron a tratar el concepto de una red inteligente, buscando un cambio en la generación, transmisión y distribución de la electricidad. Esta red inteligente puede quedar definida como una gama de soluciones que sirven para optimizar el uso eficiente de la energía eléctrica.

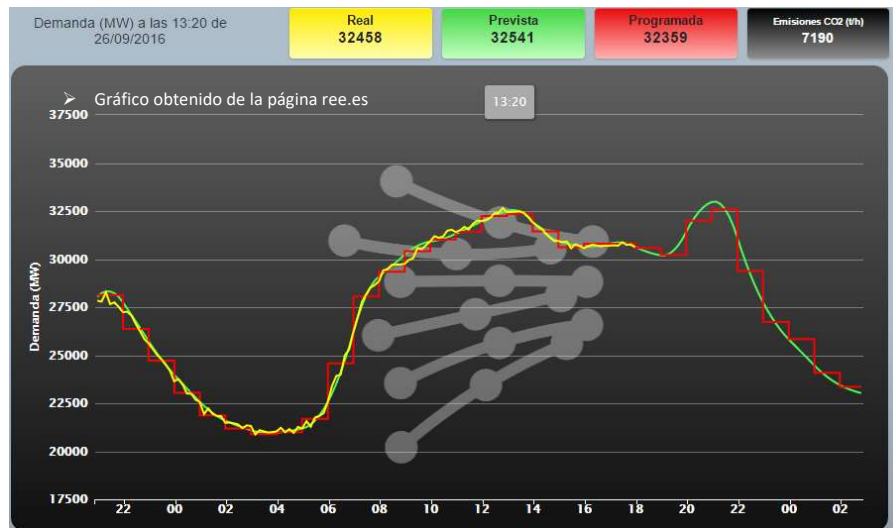


Figura 7. Monitorización y previsión diaria del consumo energético en España (REE)

Smart Grid es un sistema de integración de vías de transporte y distribución de electricidad con tecnología digital, monitorizando, protegiendo y optimizando las operaciones que llevan a cabo los elementos interconectados, es por tanto la evolución natural de una red centralizada unidireccional, a un modelo de red donde todos los elementos son productores y consumidores a la vez. Esta red inteligente no puede resumirse de forma específica con acciones concretas, sino que es un conjunto de acciones que generan una infraestructura, existente para alcanzar objetivos determinados. [20]

3.2. **OBJETIVOS DE LAS REDES INTELIGENTES**

Las redes inteligentes permiten llevar a cabo un mejor proceso de monitorización comunicación e información de los elementos, utilizando

técnicas y tecnologías muy innovadoras, buscando conseguir los siguientes objetivos: [19][20]

- Automatizar la red eléctrica, lo que permitirá el correcto mantenimiento de las infraestructuras.
- Lograr cambios de variación y adaptación a la oferta y la demanda, sobre todo en puntos críticos de uso masivo de la red, o de alta generación energética (Debido mayoritariamente a las energías renovables, las cuales se caracterizan por tener una generación energética muy variable).
- Facilitar la integración de nuevos elementos, nuevas tecnologías de almacenamiento y la generación intermitente mencionada previamente.
- Gestionar la demanda, permitiendo a los consumidores administrar la energía de forma eficiente, consiguiendo un correcto flujo de energía y comunicaciones bidireccionales entre los diferentes elementos conectados.
- Hacer la red más fuerte y estable, mejorando su operación, disminuyendo las diferentes pérdidas existentes y la necesidad de inversiones continuadas.
- Reducir cuantitativamente las emisiones contaminantes, disminuyendo así el impacto ambiental de la generación y transporte energético.

4.DESCRIPCIÓN DEL PUESTO DE ESTUDIO (LÍNEA AUXILIAR INSTALADA)

La línea sobre la que se va a realizar la simulación y sobre la que se tomarán diferentes datos para poder realizar comparaciones con los resultados a obtener a través del software ANSYS, consta de una serie de componentes principales.

4.1. **COMPONENTES PRINCIPALES**



Figura 8. Visión global de los componentes principales del puesto de estudio.

- 1 conductor LARL 455 (Condor).
- 2 bobinados toroidales.
- 1 variador.
- 1 datalogger Campbell CR800.
- 1 pirómetro laser para la medida de temperatura por infrarrojos.
- 1 esfera de aluminio anodizado adosada al cable.
- 2 sondas de temperatura pt100.
- 1 transformador para medida de corriente.
- 1 anemoveleta ultrasónica windsonic.
- 2 piranómetros.
- 1 sensor de temperatura y humedad ambiental
- 1 sensor meteorológico todo en uno (anemoveleta ultrasónica, piranómetro, temperatura, humedad, pluviómetro de scattering)
- 1 datalogger Setelsa.
- 1 Equipo informático.

4.2. DESCRIPCIÓN

Se trata de una instalación destinada al estudio de la ampacidad dinámica en conductores aéreos. Para ello, se hacen pasar altas corrientes por el conductor y se mide la temperatura del mismo, la cual puede llegar a depender fuertemente de las condiciones meteorológicas.

El sistema tiene capacidad para generar corrientes de hasta 700 A. Esta corriente generada, será regulada mediante el variador. Para poder alcanzar las elevadas corrientes en la instalación, se ha ideado un sistema con dos toroides que actúan como primarios de un transformador, siendo el secundario una sola espira, formada por el conductor aéreo y el conductor que atraviesa los toroides y se conecta a los extremos del LARL 455, cuyas propiedades quedan descritas en la siguiente tabla.

CONDUCTORES DE ALUMINIO ACERO ALUMOWELD NORMA ESPAÑOLA - UNE 21018 LARL												
	Sección nominal			Alambres de aluminio		Alambres de acero Alumoweld		nominal		Carga de rotura	Resistencia DC a	Peso. kg/km
Denominación	Aluminio	Acero	Conductor completo	N.º	ϕ	N.º	ϕ	Núcleo de acero	Conductor completo			
	mm	mm ²	mm ²		mm		mm	mm	mm			
LARL 280 Hawk	241,7	39,4	281,1	26	3,44	7	2,68	8,04	21,80	8,760	0.1131	929
LARL 380 Gull	337,3	43,7	381	54	2,82	7	2,82	8,46	25,38	10.96	0.0820	1222
LARL 455 Conductor	402,3	52,2	454,5	50	3,08	7	3,08	9,24	27,72	12.94	0.0688	1457
LARL 545 Cardinal	484,5	62,8	547,3	54	3,38	7	3,38	10,12	30,42	15.32	0.0571	1755
LARL 635 Finch	565	71,6	636,6	54	3,65	19	2,19	10,96	32,85	17.75	0.0490	2037

Tabla 1. Propiedades del material del conductor sobre el que se realiza el estudio [15]

De esta manera, se consigue un transformador con una elevada relación de espiras, que permite generar las altas corrientes a partir de tensiones en torno a uno o dos voltios. La corriente final vendrá dada por la tensión de entrada de los toroides que, como se ha mencionado previamente, depende de la regulación del variador. Dicha corriente es medida por el transformador de intensidad, conectado al datalogger de Campbell.

4.2.1. Medida de temperatura

Para la medida de temperatura del conductor se emplean dos métodos:

- Medida directa mediante sondas pt100.
- Medida indirecta mediante Infrarrojos.

La medida directa consiste en dos sondas pt100, una en contacto directo con el cable y otra sobre una pequeña esfera (6 cm de diámetro) de aluminio anodizado que rodea el cable. Las sondas están conectadas a un conversor que devuelve una señal de tensión en el rango de 0 a 5 V, el cual ha sido calibrado con un patrón de pt100, certificado por el centro nacional de metrología. La salida de los conversores es leída por el datalogger de Campbell.

La medida indirecta se realiza mediante un sistema patentado dentro del propio grupo GTEA, y consiste en un dispositivo de medida de temperatura por infrarrojos, apuntando a la esfera colocada en el cable. El dispositivo se conecta con un ordenador para almacenar los datos, el cual está sincronizado con el datalogger de Campbell.

El disponer de los dos tipos de medida permite la realización de un estudio de deriva entre la temperatura medida de forma directa sobre el conductor y la medida de forma indirecta. Además, el sistema permite apreciar el efecto de disipación de temperatura en la esfera gracias a la doble medida mediante pt100.

4.2.2. Medida de variables meteorológicas

Las variables meteorológicas se obtienen principalmente del sistema conectado al CR800, el cual tiene la gran ventaja de admitir programación interna, ofreciendo así la flexibilidad necesaria para, por ejemplo, programar la curva de conversión de las pt100 y almacenar directamente el valor de temperatura en vez de la tensión proporcionada por el conductor. Además, este datalogger CR800 se apaga cuando el voltaje primario está por debajo de 9.6V, lo que reduce las posibilidades de que tome medidas imprecisas.

El sistema dispone de una anemoveleta ultrasónica, tal y como recomiendan las normas 738 de IEEE y TB601 de Cigre, claramente superior a la de cazoletas en aplicaciones de medida de ampacidad como pudo comprobar GTEA en un pequeño estudio; dos piranómetros, para la medida de radiación directa y reflejada y un sensor de temperatura y humedad. Además, se dispone de otra estación meteorológica desarrollada por Setelsa para Viesgo, la cual permite conocer los datos de lluvia, no disponibles en la otra estación.

Información más detallada de cada uno de los aparatos y de cómo se realizan las medidas aparecen en el ANEXO I

5.MODELOS APLICABLES EN LAS REDES ELÉCTRICAS ACTUALES

5.1. VISIÓN Y ECUACIONES GENERALES

Como se ha mencionado en secciones anteriores, las infraestructuras eléctricas actuales necesitan operar con densidades de corriente mayores a las que están soportando. El problema reside en que existe un límite térmico que limita la potencia máxima con la que se puede trabajar de forma segura y sin dañar las propiedades del cable que se esté empleando. [10]

Existen una serie de modelos que permiten calcular esa temperatura, también definida como ampacidad, que están basados en una ecuación de equilibrio térmico, teniendo en cuenta que el calor generado en cada momento por el conductor debe ser igual al disipado por el mismo.

Para los modelos que van a ser estudiados a continuación, se necesita conocer una serie de valores de generación y cesión de calor, los cuales serán explicados y de los que se aportarán sus correspondientes fórmulas para su obtención. [1][3][4][5]

5.2. CÁLCULO DEL CALOR GENERADO Y EL CALOR CEDIDO

Para el cálculo de los valores explicados en las siguientes secciones se utilizarán una serie de datos obtenidos a partir de una estación meteorológica, en nuestro caso concreto en la estación instalada en la fachada de la escuela ETSIIT, la cual cuenta con los componentes detallados en la sección previa (4.1).

5.2.1. Cálculo del calor generado por efecto Joule

Este efecto se produce al hacer pasar un flujo de corriente a través de un conductor. Tiene en cuenta, por una parte, la propia resistencia del conductor y por otra, el llamado efecto pelicular (hay una mayor densidad de corriente en la superficie que en el centro) que ocurre en corriente alterna, teniendo mayores efectos cuanto mayor es la frecuencia de la corriente y menor la diferencia entre el radio interno y externo del conductor. No incluye por otra parte ningún tipo de efecto magnético.

De esta forma se puede formular el calor generado, teniendo en cuenta la resistencia interna y este efecto pelicular, siendo k_{sk} en la ecuación el factor de efecto pelicular, que tiene un valor de aproximadamente 1.03:

$$P_j = k_{sk} \cdot I^2 \cdot R_{dc} \quad (1)$$

El valor R_{dc} es la resistencia al paso de corriente por unidad de longitud, que depende de la resistividad del material con el que se esté tratando a la temperatura que se encuentre el mismo.

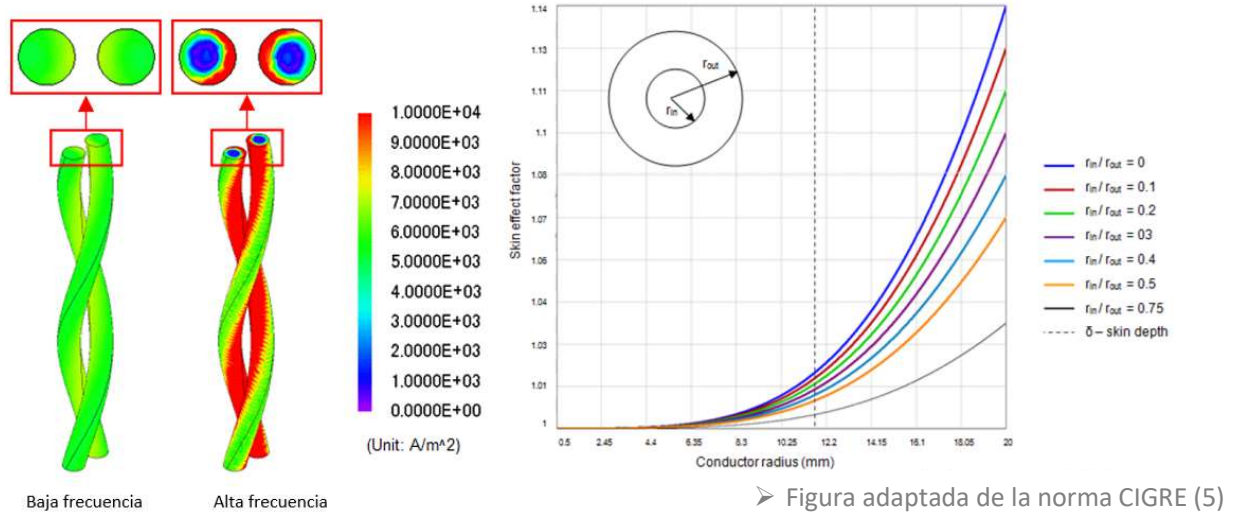


Figura 9. Variación del efecto pelicular a partir de cambios en frecuencia y en radios del conductor

El efecto de proximidad entre conductores puede despreciarse ya que normalmente la distancia de separación entre las fases de los conductores o sub-conductores es suficientemente grande como para que este efecto sea mínimo. Además, para este estudio sólo se comprobarán los efectos sobre una fase, no hay ninguna otra instalada en sus proximidades.

5.2.2. Cálculo del calor generado por efectos magnéticos

En el caso, como el del estudio, de que el núcleo del conductor sea de aluminio, el flujo magnético producido al tener un conductor con diferentes capas en forma de espiral, genera un calor en dicho núcleo P_{core} , además tenemos que tener en cuenta el calor debido a la redistribución de densidad de corrientes en las capas de los cables no ferrosos P_{redis} , conocido como inducción mutua. Estos efectos se consideran para conductores concretos, aunque en algunos casos pueden considerarse despreciables.

$$P_M = P_{core} + P_{redis} \quad (2)$$

Como se comentaba previamente, estos efectos solo son relevantes en conductores con núcleo de aluminio con varias capas de este material siendo atravesadas por altas densidades de corriente, si este número de capas es par el efecto se cancela por sí sólo.

5.2.3. Cálculo del calor generado por radiación solar

El calor por unidad de longitud que es adquirido por el conductor a partir de la radiación solar P_s depende directamente del diámetro del mismo D , la absorptividad de su superficie α_s y la intensidad global de radiación I_T tal y como se indica en la siguiente ecuación:

$$P_s = \alpha_s \cdot I_T \cdot D \quad (3)$$

Por un lado, el valor de α_s varía entre 0.2 y 0.9 dependiendo de cuanto sea y de la atmósfera que lo rodea. Es un valor difícil de obtener de forma precisa, normalmente se calcula la emisividad del material por métodos más sencillos y después, se supone el valor de la absorptividad algo mayor que este número (entre 0.1-0.2 décimas más).

Para medir por otro lado la radiación solar, existen aparatos de medida muy fiables y relativamente poco costosos. Se pueden realizar medidas durante un periodo de tiempo concreto, aunque hay que tener en cuenta que los valores obtenidos pueden variar bastante dependiendo del punto de la línea donde se realicen, la radiación que devuelve el suelo...

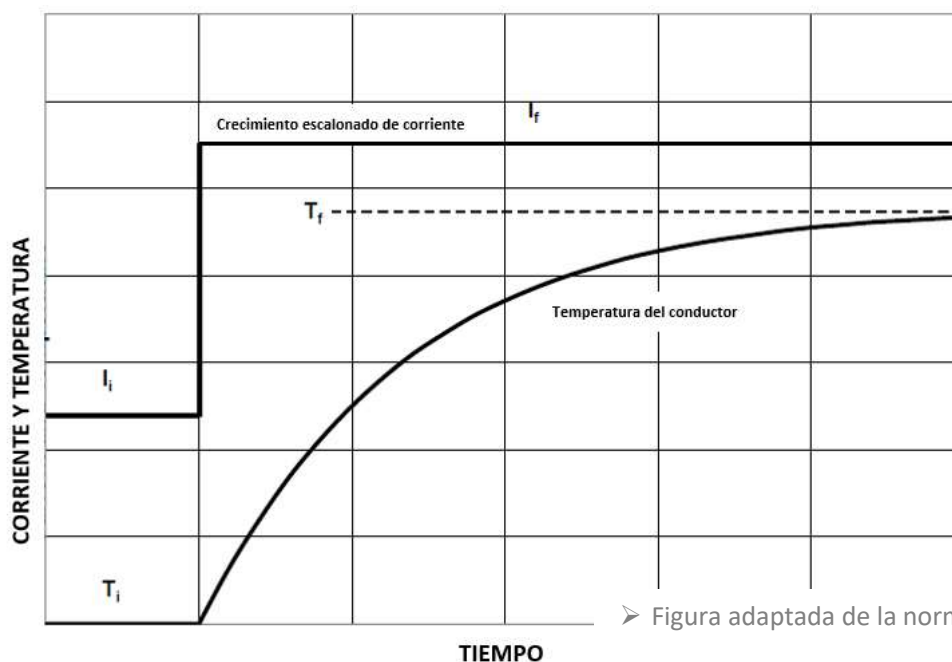
Además de esto hay que tener en cuenta que el valor al que se ha hecho referencia previamente I_T es un compendio, por un lado, de la radiación solar directa que llega al conductor I_B , de la radiación difusa del cielo sobre una superficie horizontal I_d y por último de la radiación que llega al suelo y es reflejada de nuevo hacia el conductor F . En este caso, para simplificar los cálculos se tomará como despreciable el valor de la radiación difusa, considerando en las simulaciones la radiación directa del sol y la reflejada por el suelo.

5.2.4. Distribución de temperatura en un conductor

La temperatura en el conductor es una variable que depende de las siguientes propiedades, siendo las dos primeras propiedades físicas características del conductor:

- Propiedades del material conductor (Primando ante todas, la conductividad eléctrica).
- Diámetro del conductor.
- Condiciones de superficie del conductor (principalmente emisividad y absorptividad).
- Condiciones meteorológicas (temperatura del aire, radiación solar, velocidad y dirección del viento...).
- Corriente eléctrica que atraviesa el conductor.

Esta temperatura está sometida a constantes cambios respondiendo a las variaciones de corriente, si consideramos las condiciones meteorológicas como constantes y generamos un aumento en la corriente que atraviesa el conductor, como se puede ver en la figura 10, obtenemos un aumento gradual de la temperatura del mismo:



➤ Figura adaptada de la norma de IEE (3)

Figura 10. Aumento de la temperatura ante cambios de corriente

En el mismo instante en que se produce el aumento de la corriente, se produce un desequilibrio térmico, el calor que se genera ahora ya no puede ser evacuado por efectos de convección o radiación por lo que se almacena en el conductor aumentando su temperatura.

➤ Figura adaptada del artículo Industriambiente (1)

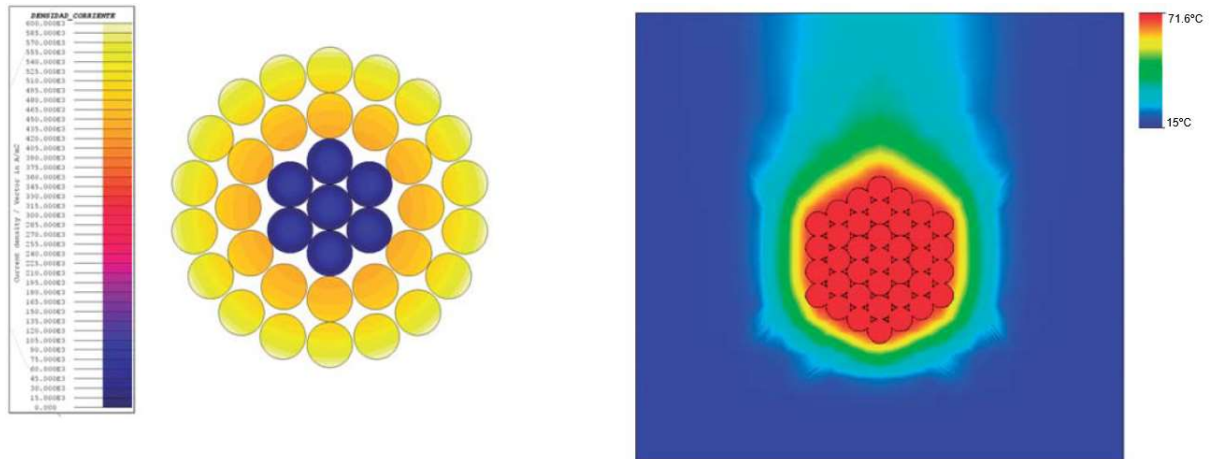


Figura 11. Distribución radial de densidad de corriente y temperatura en un conductor (simulación por el método de elementos finitos)

El calor que se va almacenando en el centro del conductor, tiene que ser transferido al resto del mismo y a la atmósfera que lo rodea, generando una variación de temperatura radial, que será mayor cuanto más diferencia exista entre la temperatura de la atmósfera que rodea el cable y la temperatura del mismo.

Esta transmisión de energía por radiación queda descrita a partir de las leyes de Stefan-Boltzmann:

$$q_r = 17.8 D_o \varepsilon \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \text{ W/m} \quad (4)$$

Siendo T_s la temperatura superficial del conductor, D_o el diámetro del mismo, T_a la temperatura ambiental y ε el valor de la emisividad.

Muy poca de la temperatura que se genera dentro del conductor, se transmite de forma axial, incluso con buenas condiciones de convección forzada con velocidades de viento relativamente altas, este efecto apenas se produce. Por lo tanto, se puede considerar que las variaciones de temperatura en el conductor se producen únicamente de forma radial.

5.2.5. Cálculo del calor cedido por convección

La pérdida de calor por convección, es el factor más importante a tener en cuenta a la hora de enfriar en conductor y está principalmente formada por dos tipos de convección, natural o forzada, que dependen básicamente de las condiciones meteorológicas a las que se exponga el cable (si hay altas velocidades de viento estaríamos hablando por ejemplo de convección forzada). Por lo tanto, hay que formular dos tipos de ecuaciones, una para cada tipo de situación, estando ambas relacionadas con el valor del número de Reynolds:

$$Re = \frac{D_o \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \quad (5)$$

Siendo D_o el diámetro del conductor ρ_f la densidad del aire, V_w la velocidad del viento en ese instante y μ_f la viscosidad dinámica del aire. Una expresión válida para calcular la viscosidad dinámica hasta los 300°C es la expuesta a continuación:

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

Se puede formular una ecuación general para los dos casos a partir de la cual se pueda calcular el calor que pierde el conductor gracias a este proceso de convección, es una ecuación que depende del número de Nusselt (adimensional), valor que se obtendrá de diferente manera si estamos ante un caso de convección forzada o convección natural.

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot N_u \quad (7)$$

Siendo λ_f el valor de la conductividad térmica del aire, T_s y T_a las temperaturas de la superficie del conductor y el ambiente

respectivamente y N_u el valor de Nusselt a calcular. Para obtener el valor de λ_f necesitamos obtener el valor de T_f (Temperatura del aire que está en contacto con el conductor) para lo cual sabemos lo siguiente:

$$T_f = 0.5 \cdot (T_s + T_a) \quad (8)$$

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \quad (9)$$

Convección natural

La convección natural o convección libre ocurre en casos en los que la velocidad del viento es nula o muy pequeña como para generar algún tipo de cambio térmico extra en el conductor. Para este caso, el aire que rodea el conductor se calienta, al estar éste a una temperatura superior a la del ambiente que lo rodea. Este proceso es continuo por lo que el aire una vez caliente se mueve, elevándose y dejando su espacio a nuevo aire a una temperatura menor. Este proceso se realiza de forma lenta y no supone apenas pérdidas de calor resaltables, a no ser que la temperatura ambiente y la del conductor sean realmente muy distantes.

Para este caso, se necesita conocer los números de Grashof y Prandtl para poder obtener el correspondiente valor de Nusselt, siguiendo la ecuación, los valores de A y m pueden obtenerse a partir de la tabla a continuación que los relaciona la cantidad correspondiente el producto de estos valores de Grashof y Prandtl:

$$Nu_{nat} = A \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad (10)$$

Serie de valores de Gr·Pr		A	m
Desde	Hasta		
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. Valores de los coeficientes A y m para el cálculo del valor de Nusselt en convección natural

Convección forzada

La convección forzada ocurre en el caso contrario al anterior, cuando existe una velocidad de viento suficientemente alta y depende tanto de esta velocidad como de la dirección del viento con respecto del cable. De esta forma, el aire en movimiento pasa por el cable conductor llevándose parte del calor que este emite, y reduciendo más su temperatura que en el caso de convección natural al realizarse el proceso de una manera más rápida. En casos de altas velocidades de viento la convección natural puede incluso despreciarse. (El caso de convección natural, se equipara a la forzada con velocidades de viento menores a 0.5m/s).

Para el cálculo del valor de Nusselt en el caso de convección forzada, tenemos que tener en cuenta, como se ha mencionado previamente, la dirección del viento con respecto al conductor; se puede distinguir por tanto dos casos, el primero en el que el aire sea perpendicular al conductor y el segundo en el que forme un ángulo cualquiera θ que se tendrá en cuenta en las ecuaciones correspondientes.

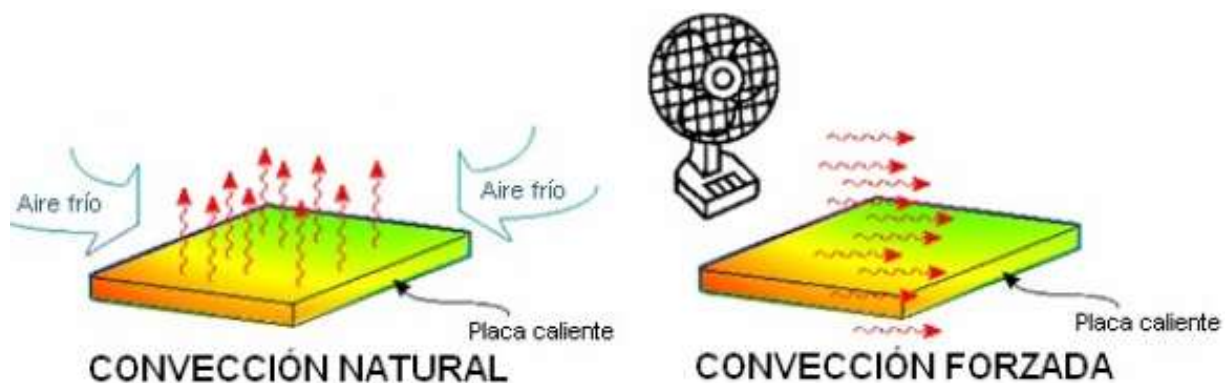


Figura 12. Diferencia entre convección forzada y natural

➤ Figura obtenida de la página <https://transferenciadecalorunefapuntofijo.wordpress.com>

Para el primer caso en que la dirección sea particular tenemos que:

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n \quad (11)$$

En la tabla 3 se pueden obtener los valores de los coeficientes B y n que aparecen en la ecuación y que dependen del número de Reynolds y la

aspereza de la superficie del conductor, $R_s = d/[2 \cdot (D - d)]$, siendo d el diámetro interno del conductor y D el externo.

Conductor Liso			Conductor Trenzado $R_s < 0.05$			Conductor Trenzado $R_s > 0.05$		
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	n
35 – 5.000	0,583	0,471	100-2.650	0,641	0,471	100-2.650	0,641	0,471
5.000-50.000	0,148	0,633	2.650-50.000	0,178	0,633	2.650-50.000	0,048	0,800
50.000-200.000	0,0208	0,814						

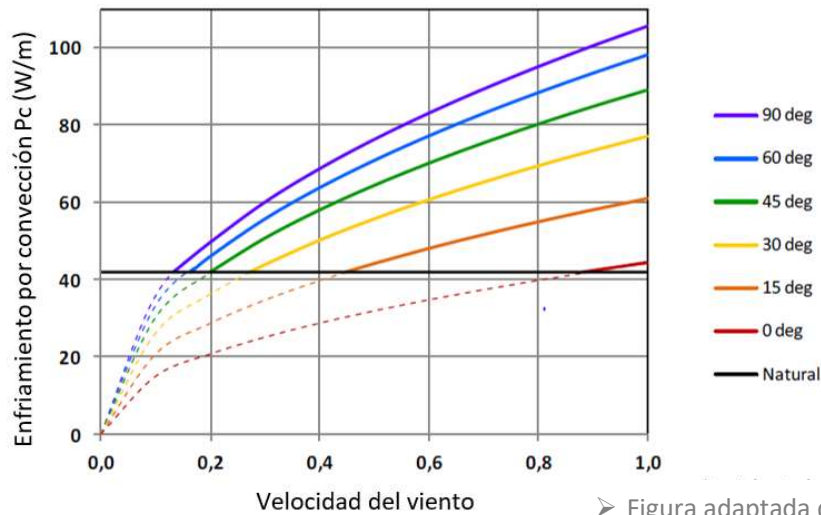
Tabla 3. Coeficientes necesarios para el cálculo del número de Nusselt en convección forzada

Además de este caso, existe como se ha mencionado, aquel en que el viento no sea perpendicular al conductor, sino que forme un ángulo cualquiera con el mismo. Para estos casos y siempre que se cumpla que $Re < 4000$ se puede calcular el número de Nusselt correspondiente a partir del valor de Nu_{90} , suponiendo por tanto que ese aire en movimiento sí fuese perpendicular, a partir de la siguiente ecuación:

- Para conductores lisos: $\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90}} = (\sin^2(\delta) + 0.0169 \cos^2(\delta))^{0.225}$
- Para conductores trenzados y $\delta \leq 24^\circ$: $\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90}} = 0.42 + 0.68 (\sin(\delta))^{1.08}$
- Para conductores trenzados y $\delta > 24^\circ$: $\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90}} = 0.42 + 0.58 (\sin(\delta))^{0.90}$

Se puede ver a partir de estas ecuaciones que el efecto de enfriamiento que se consigue con estas direcciones de viento no llega ni a la mitad de lo que se conseguiría con un viento perpendicular.

Añadir también que pueden producirse errores en los cálculos ya que no se está tomando en cuenta la convección turbulenta, en la que la velocidad del aire es alta pero que no sigue ninguna de estas ecuaciones expuestas, siendo muy difícil de definir y más en las condiciones en las que se realizara el estudio, con condiciones externas completamente no controladas.



➤ Figura adaptada de la norma CIGRE (5)

Figura 13. Enfriamiento por convección debido a vientos con distintas velocidades y direcciones

5.2.6. Cálculo del calor cedido por radiación

La cantidad neta de calor cedida por un conductor debido a efectos de radiación es la energía total radiactiva que se emite desde su superficie, que puede ser dividido en dos componentes principales, el calor radiado al suelo y los alrededores y el radiado directamente al cielo, de esta forma se puede expresar la radiación gracias a la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$Pr = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{C-g} \cdot \varepsilon_s \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4] + \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{C-sky} \cdot \varepsilon_s \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4] \quad (12)$$

Siendo D el diámetro exterior del conductor σ_B el valor de la constante de Stefan-Boltzmann ($5.6697 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), ε_s es la emisividad de la superficie del conductor, T_s su temperatura, T_g la temperatura del suelo que rodea el conductor, T_{sky} es la temperatura de la atmósfera que rodea

el conductor, F_{c-g} la fracción de energía radiada desde el conductor hacia el suelo y F_{c-sky} la fracción de energía radiada desde el conductor hacia la atmósfera circundante.

Para simplificar se pueden considerar las dos temperaturas T_g y T_{sky} igual a la temperatura ambiente T_a la cual es mucho más fácil de medir, por lo que la ecuación anterior quedaría de la forma siguiente:

$$Pr = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_s \cdot (F_{c-g} + F_{c-sky}) [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (13)$$

Por otra parte, el valor de $(F_{c-g} + F_{c-sky})$ es el compendio de la energía radiada al suelo y a la atmósfera por el cable, lo cual supone prácticamente la totalidad de la radiación del conductor (anteriormente se especifica que se desprecia la radiación difusa) y puede igualarse a la unidad por lo que:

$$Pr = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_s \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (14)$$

La emisividad del conductor utilizado puede ser medida, pero normalmente se toman valores de entre 0.5-0.9, a no ser que hayan pasado por tratamientos en su superficie.

Como se puede apreciar en la formula final en la que se puede calcular el valor total del calor radiado, este es mayor cuanto mayor sean las temperaturas del conductor. Aun así, la cantidad de calor cedido por efectos de radiación es mucho menor al cedido por efectos de convección en las mismas condiciones, por lo que el impacto térmico del calor radiado es limitado y en algunos casos puede incluso llegar a despreciarse. (En este estudio, como se verá más adelante la radiación cedida por el cable sí hay que tenerla en cuenta para las simulaciones).

5.3. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE TÉRMICO

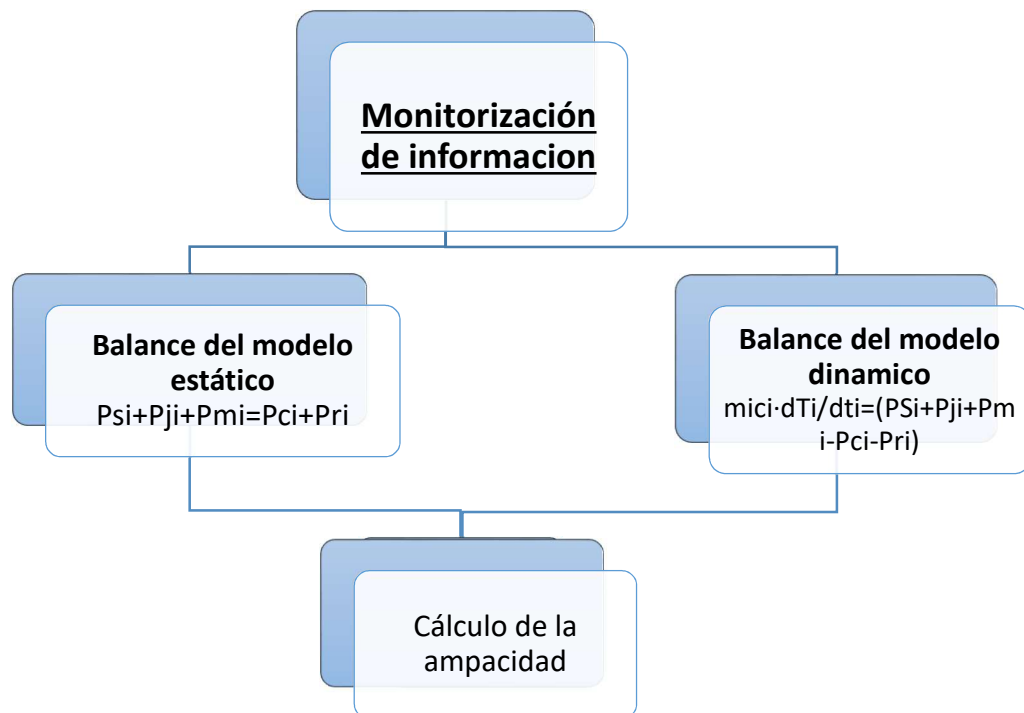


Figura 14. Métodos de cálculo del balance térmico de un conductor

Los dos modelos están basados, como se explicó anteriormente, en un balance térmico, pero existen diferencias en la forma en la que estiman el valor de la ampacidad.

5.3.1. Método estático

Este modelo estático no tiene en cuenta la inercia térmica del material conductor, por lo que no puede modelar valores intermedios de los que se obtienen a partir de la estación de medidas. Esto genera picos térmicos en el conductor que en realidad no existen.

Para el cálculo de la ampacidad por este modelo se considerará la corriente eléctrica, la temperatura del conductor, y las diferentes condiciones meteorológicas como constantes a lo largo del tiempo, por lo que es un cálculo mucho más inexacto que el dinámico, pero mas simple.

Considerando todos estos parámetros, el calor que es suministrado al conductor a partir del efecto Joule y la radiación solar, es igual al calor disipado gracias a efectos de convección y radiación del cable con la atmósfera que lo rodea. Incluyendo en la ecuación la cantidad de calor cedido por efectos magnéticos y de evaporación, obtendremos la siguiente ecuación (aparece en la Figura 14):

$$P_s + P_j + P_m + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (15)$$

Donde P_s es el calor absorbido por radiación solar, P_j es el debido al efecto Joule, P_m es el calor generado a partir de efectos magnéticos, P_i es el calor por efecto corona, P_c es el calor cedido por efectos de convección, P_r el calor cedido por radiación y por ultimo P_w las perdidas por efectos de evaporación.

En esta ecuación, han aparecido dos términos que no venían especificados en la figura 14, la ganancia de calor debido al efecto corona y la cesión de calor debido a evaporación. En el primero de los casos, este efecto es importante en condiciones de alta humedad y velocidad del viento, pero si se compara con el resto de aportaciones de calor puede considerarse despreciable. Para el segundo de los efectos debido a la evaporación, su aportación suele ser también despreciada ya que es raro que el cable este húmedo en su totalidad y en las mismas condiciones, y además es muy difícil medir la cantidad agua evaporada por lo que la ecuación general a utilizar será la siguiente:

$$P_s + P_j + P_m = P_c + P_r \quad (16)$$

5.3.2. Método dinámico

El método dinámico no tiene el problema mencionado para el caso estático, ya que sí es capaz de generar valores intermedios entre dos valores dados, por lo que las desviaciones son menores, y la estimación térmica es más precisa.

En este caso para el cálculo del calor, se tendría en cuenta las variaciones de la temperatura por lo que las ecuaciones de este modelo serían de la forma:

$$P_s + P_j + P_m = P_c + P_r + m \cdot C_p \cdot \frac{dT_{avg}}{dt} \quad (17)$$

Siendo el valor de la variación de la temperatura a lo largo del tiempo el correspondiente a la ecuación:

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{1}{m \cdot C_p} [R(T_{avg})I^2 + P_s + P_m - P_c - P_r] \quad (18)$$

Para este caso se calcula la ampacidad del conductor en cuestión, a partir de valores de corriente eléctrica y condiciones meteorológicas que van variando a lo largo del tiempo. Al ser este modelo mucho más preciso será el utilizado para los siguientes apartados y cálculos de este trabajo. De esta forma, los datos reales se compararán con los resultados obtenidos a partir de este método.

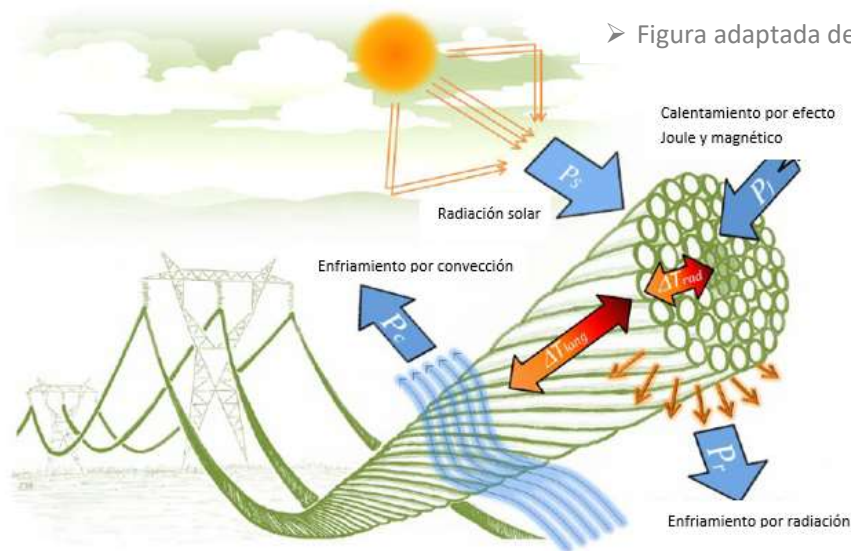


Figura 15. Pérdidas y ganancias térmicas en el conductor

6.DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

6.1. MODELO DE INVENTOR

Como se puntualizó en el comienzo de este trabajo, la parte práctica del mismo conllevaba por un lado la simulación y obtención de resultados y por otra la creación de un modelo en 3D a partir del programa de ingeniería gráfica.

Este modelo 3D servirá para tener mejores referencias del puesto sobre el que se realizará el estudio, siendo mucho más manejable y visual que las fotografías que se puedan tomar del mismo.

El proceso de documentación para el modelaje se apoyó en técnicas empíricas, realizadas basándose por una parte en una serie de fotografías tomadas del puesto, y, por otro de las mediciones realizadas. Con los croquis convenientemente acotados, se realizó el modelo 3D, del que pueden apreciarse distintas perspectivas en la Figura 16 y Figura 17.

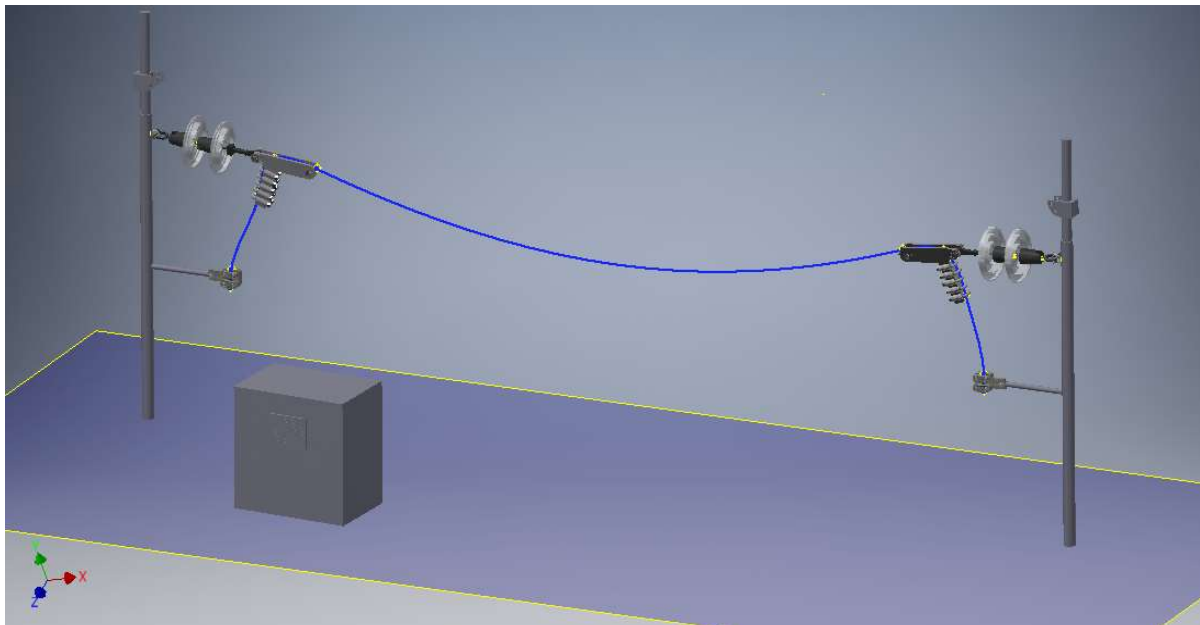


Figura 16. Visión global del modelo INVENTOR

En este modelo 3D se han realizado una serie de simplificaciones, como por ejemplo los postes donde se encuentran acoplados algunos aparatos de medida, o el grosor del cable sometido a estudio, que en el modelo aparece más pequeño de lo que es en realidad.

A pesar de estos factores, como se trata de una maqueta y no de una reproducción exacta, la función que debe cumplir, como es la de permitir una mejor visión global de la instalación se sigue llevando a cabo correctamente, por lo que el prototipo se considera adecuado.

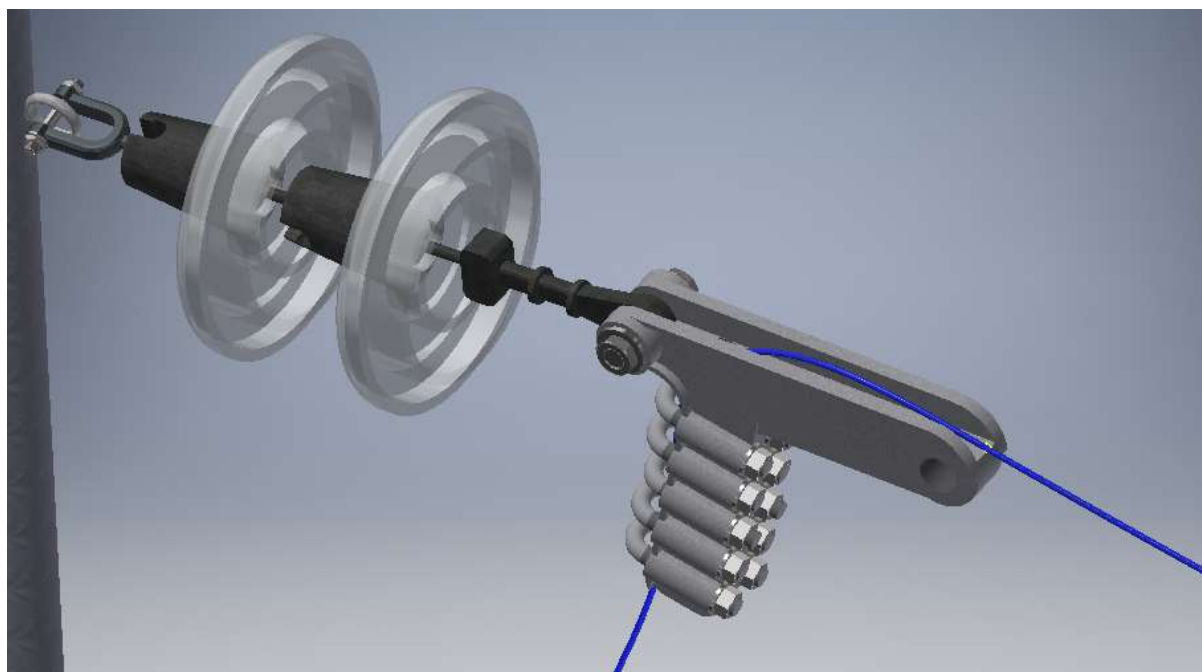


Figura 17. Visión en detalle del modelo INVENTOR

6.2. MODELO CON ANSYS

Se utilizará el software ANSYS Workbench para poder realizar la simulación computacional del sistema bajo diferentes condiciones de lluvia, viento e intensidad de corriente atravesando el cable a estudiar. Este programa puede realizar análisis térmico, electromagnético y de fluidos por lo que se podrán unir los resultados de los mismos de forma que se obtenga como resultado la temperatura final del cable y su variación térmica bajo diferentes condiciones climatológicas.

El análisis que hay que realizar tiene una serie de pasos diferenciados que hace falta seguir para poder obtener unos resultados suficientemente precisos, la definición de la geometría, el mallado del modelo y el análisis del mismo. [21]

En este caso la geometría del modelo a definir es muy sencilla, únicamente un cable con una longitud y un diámetro determinados sobre el que después se creará un volumen de control para realizar la simulación de fluidos.

La fase del mallado se caracteriza por no tener una solución única, ya se pueden aplicar diferentes tipos y eficiencias según la clase de cuerpo sobre la que se quiera simular.

El objetivo del mallado es dividir el modelo de estudio en pequeñas celdas de una manera suficientemente eficiente como para que los resultados del análisis sobre el mismo sean precisos.

En este caso, hay que tener en cuenta también el tipo de mallado y cuan fino o grueso es, ya que según esto la simulación tardará mayor o menor tiempo en llevarse a cabo, e igualmente los resultados serán más o menos precisos. Es por esto que el mallado es uno de los puntos decisivos, conseguir un buen mallado dará la posibilidad de obtener buenos resultados con un tiempo de simulación adecuado.

Durante el análisis, se tratarán de obtener las variaciones térmicas del cable según las diferentes condiciones y después se procurará de unir estos resultados para poder ver una variación térmica global y compararla con los datos reales medidos sobre el cable.

Una vez definidos los pasos a llevar a cabo, se realizará la descripción detallada de cada uno de ellos.

6.2.1. Generación de la geometría

La herramienta que se utilizará para realizar el modelo es propia del ANSYS Workbench, es el denominado DesignModeler. Este software, es muy sencillo de manejar y en él se puede definir el cuerpo a estudiar, el cual es muy simple, sin necesidad de utilizar ninguna otra herramienta.

Si la geometría a definir fuese muy compleja, la plataforma de diseño de la que consta ANSYS puede quedarse corta en comparación con otros programas de diseño como puede ser la plataforma CAD, ya que ANSYS es un programa dedicado a la simulación, pero no al diseño de estructuras complejas como tal.

Para empezar, como se van a realizar distintos tipos de análisis, se necesitan dos tipos de geometrías para realizarlos. Por un lado, para el análisis eléctrico y térmico del modelo, se necesitará únicamente la geometría del cable simple, por lo que se define el diámetro medido (0.0217m) con anterioridad y después se extruye la longitud del cable (3.75m), ambas operaciones realizadas en el módulo DesignModeler.

Por otro lado, para el estudio de fluidos, se necesita generar un volumen de control alrededor del cable estudiado para poder tener definidas la entrada y salida del fluido, como serán las gotas de agua.

Para poder generar este volumen de control, duplicamos la geometría que ya está disponible, es decir, el cable simple. Una vez hecho esto, se genera otro boceto donde se crea un rectángulo rodeando una de las caras del cable y después se extruye, pero bajo una serie de características.

Por un lado, se elige extrusión no de adicción de material, sino *'add frozen'*, lo que permite crear un segundo cuerpo sin fusionarse con el cable inicial de forma que posteriormente se pueda trabajar con ambas geometrías. Además, esta opción permite a los cuerpos no ser completamente independientes, sino que pueden existir intercambios térmicos entre ellos, que es lo que interesa en este estudio.

Además de la creación de este segundo cuerpo, se pasa a realizar una operación booleana, en la que se cortará el espacio que le corresponde al cable, de forma que los flujos interactúen con dicho espacio. Se crea por tanto un cuerpo a parte, único, en el que se introducirán las gotas de lluvia y el aire.

Este segundo cuerpo queda definido como se puede ver a continuación en la figura 18, donde se aprecia el espacio que ha dejado el cable a estudiar. Se utilizará, como ya se ha hecho referencia, únicamente para el estudio de fluidos (ANSYS Fluent).

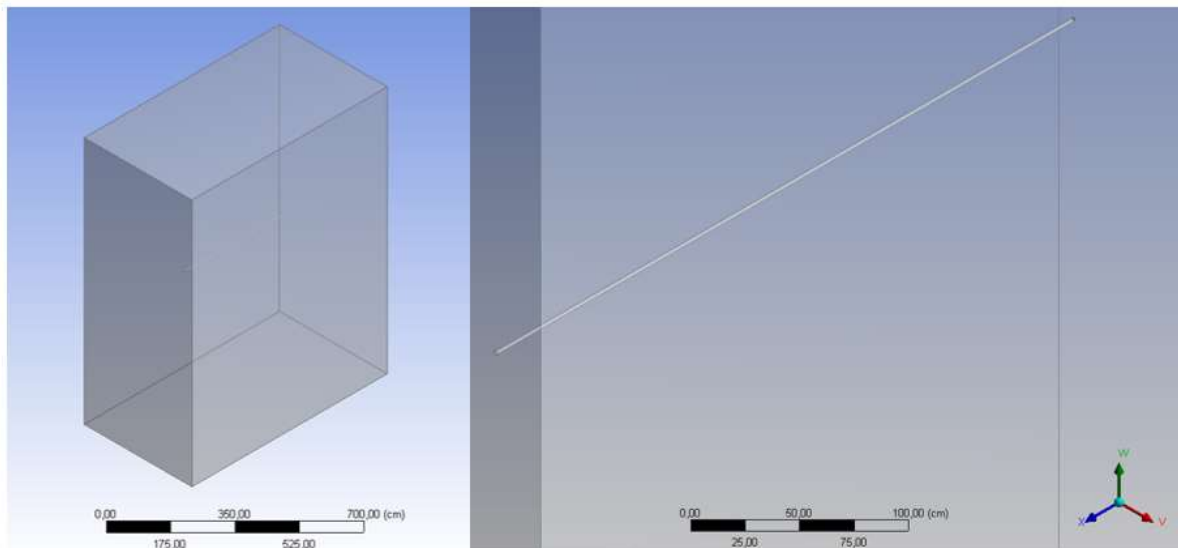


Figura 18. Visualización del volumen de control rodeando el cuerpo estudiado

6.2.2. Tipos de mallado

En el caso que nos ocupa donde hay que realizar una simulación con dos fluidos como son el agua de lluvia y el aire, las exigencias para el mallado a la hora de realizar la simulación CFD (simulación de fluidos) son mayores, dependiendo del tipo escogido y para una misma situación se pueden obtener resultados diferentes, por lo que hay que tener muy en cuenta las características a definir en el mallado, para su generación [8].

A continuación, se explicará en que se basa el método del mallado para tener una mejor comprensión del proceso y sus resultados.

Si se dispone de una función matemática y se pretende calcular cual es el área que ocupa frente a otra o frente alguno de los ejes coordenados, se realiza una integral, que puede ser calculada de manera analítica o mediante aproximaciones en los casos más complejos. En este segundo caso se aplican técnicas de aproximación numérica como las que se pueden ver en la Figura 19.

Con los denominados métodos de integración numérica, se utilizan geometrías sencillas para aproximar áreas irregulares, dependiendo del tamaño del paso que se defina para estas geometrías el resultado obtenido será más o menos preciso.

Obra colocada bajo licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.5 License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/)

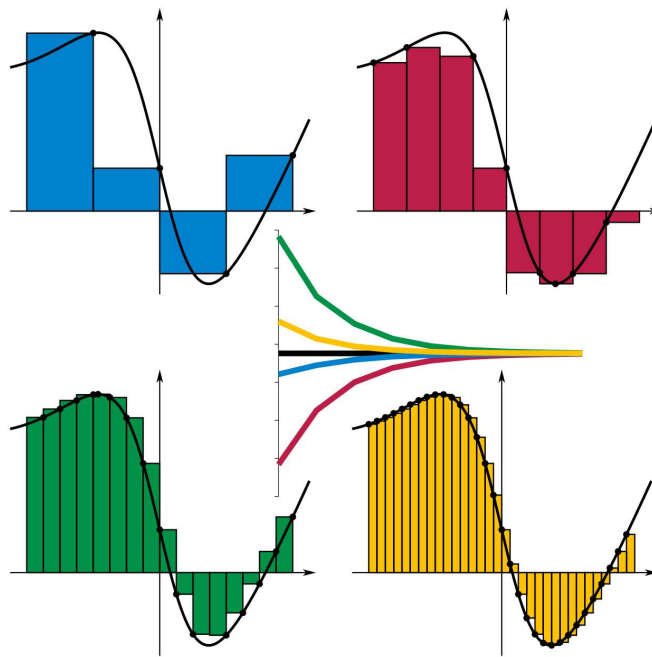


Figura 19. Integración numérica para aproximación del área bajo la curva

El mallado que se pretende realizar funciona de la misma manera, siendo la función en nuestro caso el volumen de control o el cable en sí, que interactuará con fluidos, aire y agua, y será sometido a una corriente y a una serie de condiciones térmicas. [24] [25]

Este volumen de control será dividido en un número determinado de pequeños elementos y nodos, número que dependerá de las características a aplicar en la generación de la malla e influirá

considerablemente a la hora de llevar a cabo la resolución completa del modelo. Estos pequeños elementos deberán cumplir también con las ecuaciones que rigen el fenómeno completo.

A partir del software de simulación ANSYS, se pueden emplear distintos tipos de elementos para realizar la malla del cuerpo a estudiar, de esta manera el mallado se puede adaptar a cualquier contorno de los sólidos del dominio. Estos elementos pueden clasificarse dentro de estas cuatro tipologías: Hexaedro, prisma, pirámide y tetraedro, siendo esta ultima la que implica menor precisión ya que está formada por un menor número de nodos.

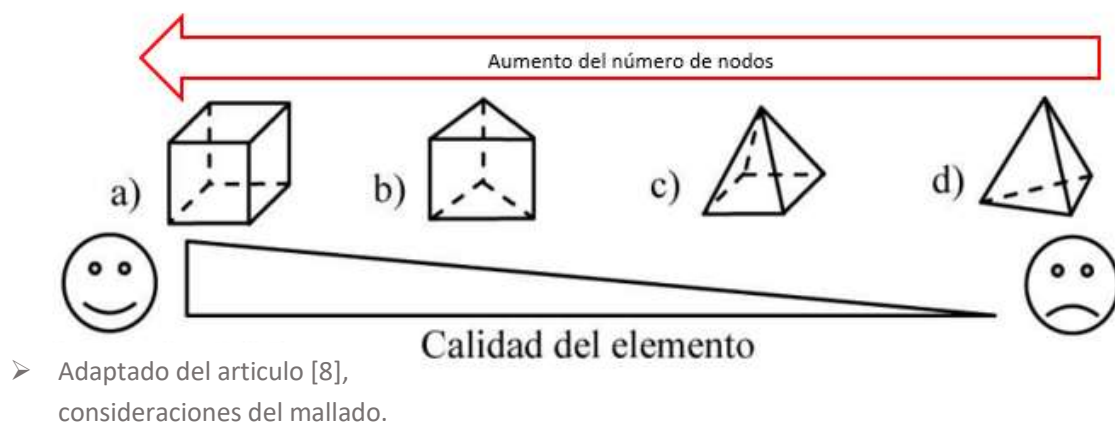


Figura 20. Tipología de elementos en un mallado

Como se puede apreciar a partir de la figura 20, la principal diferencia de los elementos es la cantidad de nodos presentes en los mismos. En la siguiente tabla se puede apreciar esta distinción:

FORMA DEL ELEMENTO	NODO POR VOLUMEN DE CONTROL
Tetraedro	4
Pirámide	5
Cuña o prisma	6
Hexaedro	8

Tabla 4. Numero de nodos según el tipo de elemento en el mallado

Cuando en una malla predominan los hexaedros se puede hablar de una malla 'ordenada', que se caracteriza por tener una conectividad regular, la cual puede expresarse como una matriz tridimensional cuando

se realiza la simulación y se hace uso de la memoria del ordenador, por lo que necesita unos recursos de memoria menores que en el caso contrario.

Si se trata de una malla 'desordenada' es decir una que no siga un patrón establecido, entonces se necesitará una tabla de las conexiones para conocer cuáles son los elementos adyacentes al punto que se estudie en cada momento concreto y por tanto requerirá un mayor gasto computacional, ya que se tendrá que comprobar para cada paso de elemento cuales son las conexiones cercanas. [8]

El mallado en ANSYS se puede realizar de forma automática, o de forma manual, aplicando cambios a las características que aparecen de forma predeterminada para poder afinarlo. El proceso para la obtención del mallado para el cable y los volúmenes de control, que son los cuerpos que se van a utilizar en el estudio como ya se ha especificado, se detalla en la siguiente sección.

6.2.3. Generación del mallado

El tipo de mallado se define principalmente por el tamaño de la relevancia, el tamaño de los elementos, la aproximación, etc. Estos parámetros indican la posibilidad de generar un mallado del cuerpo y su calidad.

Como se ha mencionado previamente este punto es uno de los más importantes a la hora de obtener resultados precisos para el estudio, dependiendo de la calidad del mismo se consumirán más o menos recursos, por lo que se tratará de realizar un uso óptimo de los mismos, ahorrando tiempo y devolviendo una solución que sea precisa y pueda compararse con los datos reales.

Este proceso comienza con la generación del mallado que parece que se adaptará mejor al cuerpo. Dentro del apartado "meshing" al entrar en cualquiera de los módulos que se utilizarán para los siguientes análisis, se selecciona el método 'Curvate' a partir del cual los bordes y la dimensión de las caras se determinarán a partir del ángulo normal de curvatura. Es

por esto que se pueden obtener mallados más finos a partir de la variación de este ángulo, y es por tanto un buen método para casos de cantos redondeados y cables.

Las características básicas que se utilizarán para este mallado son las que vienen por defecto, por lo que se espera un resultado de calidad media:

Details of "Mesh"			
Defaults			
Physics Preference	CFD		
Solver Preference	Fluent		
Relevance	10		
Sizing			
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature		
Relevance Center	Coarse		
Initial Size Seed	Active Assembly		
Smoothing	Low		
Transition	Slow		
Span Angle Center	Coarse		
Curvature Normal Angle	Default (68,8960 °)		
Proximity Accuracy	0,5		
		Inflation	
		Use Automatic Inflation	None
		Inflation Option	Smooth Transition
		Transition Ratio	0,272
		Maximum Layers	5
		Growth Rate	1,2
		Inflation Algorithm	Pre

Figura 21. Características elegidas para el mallado, método ‘Curvature’

A partir de estas características se obtiene un resultado bastante correcto como se puede apreciar en la Figura 22, donde se ve al ampliar la geometría, una densidad de mallado mayor en la parte del volumen de control donde se sitúa el cable, como es de esperar, de forma que los resultados en esta zona sean mucho mejores.

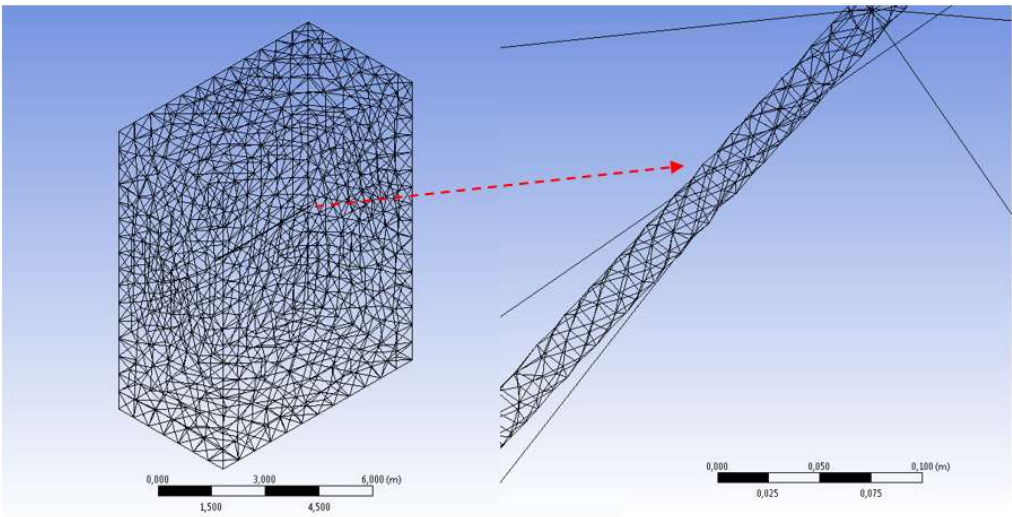


Figura 22. Mallado obtenido con el método ‘curvature’

Finalmente se puede determinar el número de nodos y elementos que conforman esta geometría, los cuales son los siguientes:

<u>Número de Nodos</u>	53.663
<u>Número de Elementos</u>	312.887

Tabla 5. Numero de nodos y elementos, método 'curvature'

Prosiguiendo con el estudio del mallado, se pasará a un estudio del método 'proximity' para comprobar si es más o menos acertado que en la prueba anterior. En este caso, el método controla la resolución de la malla dependiendo del número de regiones que existan, de forma que donde haya una mayor concentración de caras, esquinas o similar, habrá una densidad mayor de nodos.

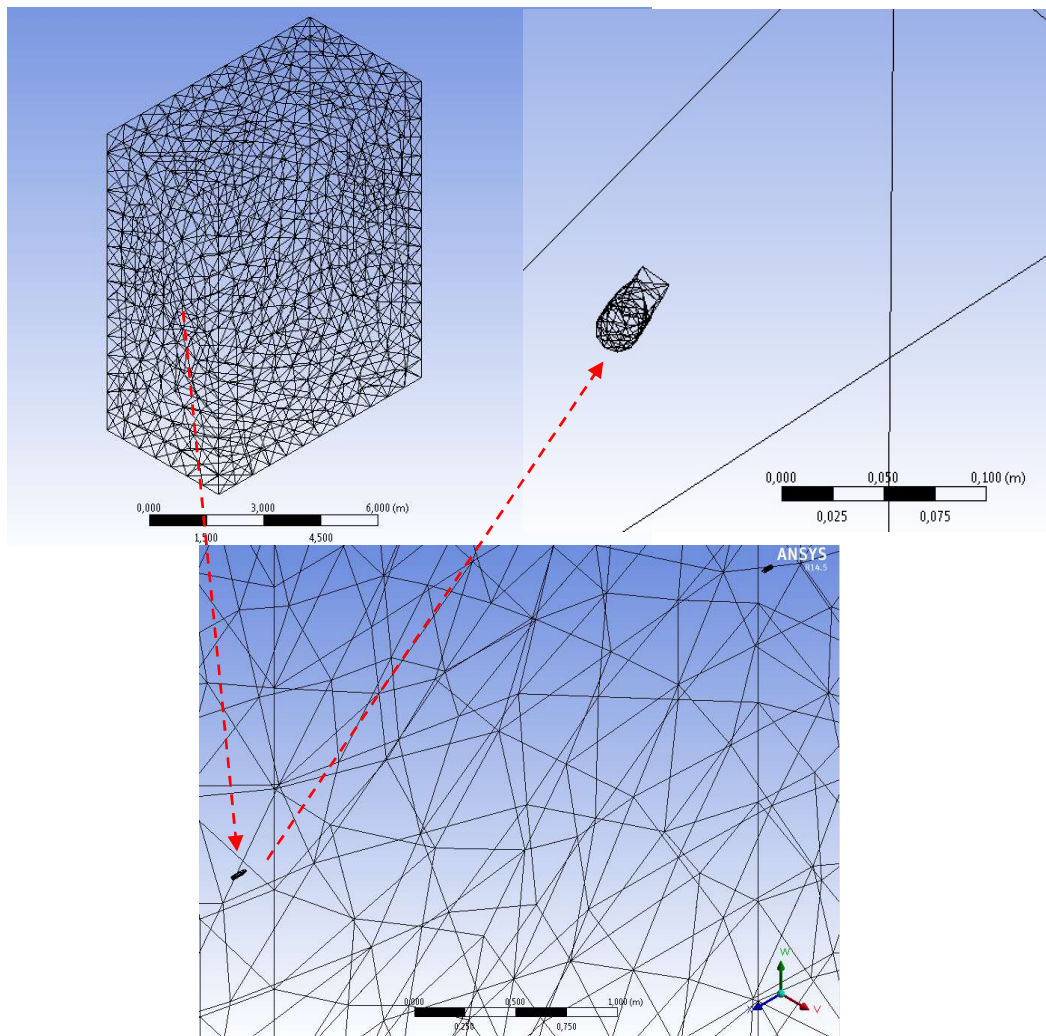


Figura 23. Mallado obtenido con el método 'proximity'

Las características utilizadas para llevar a cabo el proceso son las mismas que en el caso anterior con el método 'curvature' ya que se trata de los indicadores que producen un mallado por defecto y por tanto de calidad media.

Se puede ver en la figura 23 que el mallado no se realiza correctamente, como se ha descrito anteriormente, el método se basa en la concentración de regiones para aumentar en número de nodos, lo cual en el caso que ocupa y siendo un cable simple no funciona, solo genera elementos cercanos a la parte final e inicial del cable, pero no en el resto del mismo por lo que no es adecuado. Esta mala definición puede comprobarse también viendo el número de nodos y elementos finales.

<u>Número de Nodos</u>	17.104
<u>Número de Elementos</u>	98.665

Tabla 6. Numero de nodos y elementos, método 'proximity'

Tras estos resultados se pasa a realizar una última prueba a partir del método 'proximity and curvature' el cual engloba las ventajas de los dos anteriores y por lo tanto debería ser un resultado en el que la geometría quede mejor definida. De nuevo las características son las mismas que las indicadas para el primer método para conseguir unos resultados medios.

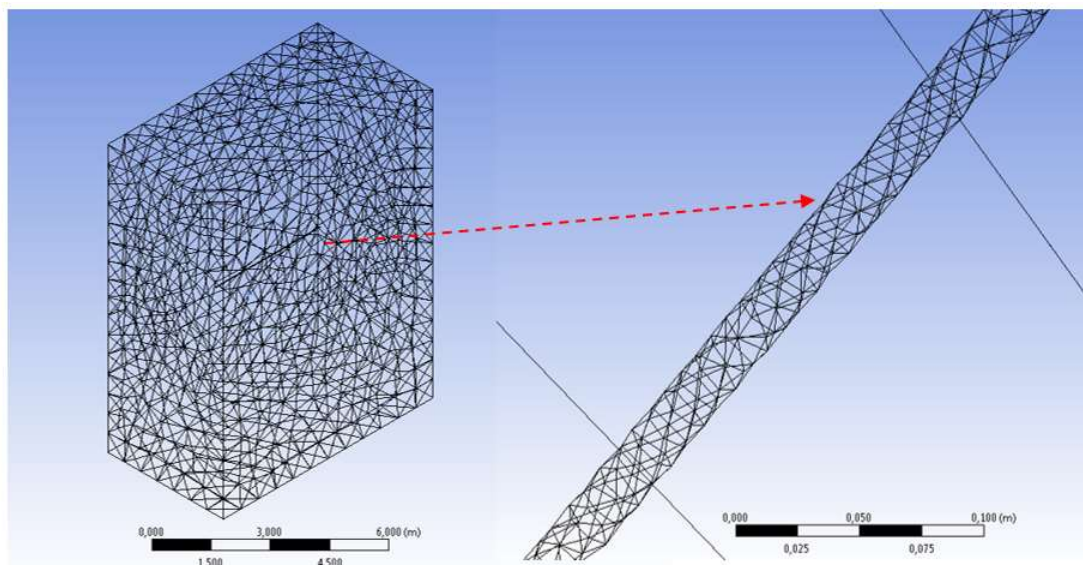


Figura 24. Mallado obtenido con el método 'proximity and curvature'

<u>Número de Nodos</u>	55.818
<u>Número de Elementos</u>	325.483

Tabla 7. Numero de nodos y elementos, método 'proximity and curvature'

Se puede ver una mejora con respecto al primer método usado, con mayor número de nodos y elementos, por lo que se tomará este método como base para realizar una serie de ajustes en las características y obtener así el mallado óptimo para la geometría a estudiar.

Para comenzar, se puede variar el tamaño de los elementos que conforman el mallado y su separación en el desplegable *sizing*, será aquí donde se realizaran los cambios más significativos para terminar con este proceso.

Primero, se varían las características *relevance center* y *relevance*, las cuales indican cuan separados estarán los elementos tanto en el eje X como en el eje Y, ambas se cambian de una calidad basta a una media, no hace falta llegar a definir las como de calidad alta ya que la geometría a estudiar es bastante simple, por lo que generaría demasiados elementos, que sólo supondrían un retraso a la hora de obtener los resultados.

Por otro lado, se cambia el valor del indicador "*transition*" de forma que ahora la transición entre elementos no se produzca de manera brusca, sino de la forma más continua posible. Por último, se cambia el valor de "*span angle*" que controla el ángulo existente entre los elementos, el cual es más acentuado en zonas curvas, y se define como fino, de forma que ahora los ángulos entre elementos se encontrarán entre 36°-12°. [26]

Todas estas características quedan plasmadas en la siguiente figura, estando resaltadas las mencionadas previamente ya que son las modificadas.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
☐ Relevance	10
[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
☐ Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
☐ Transition	Slow
☐ Span Angle Center	Fine
☐ Curvature Normal Angle	Default (16,860 °)
☐ Proximity Accuracy	0,5
[-] Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
☐ Transition Ratio	0,272
☐ Maximum Layers	5
☐ Growth Rate	1,2

Figura 25. Características modificadas para la obtención del mallado

Con estos cambios obtenemos un mallado final mucho más denso en general que en los casos anteriores, y, además, ampliando el volumen de control se vuelve a apreciar un mallado más fino en la zona del cable.

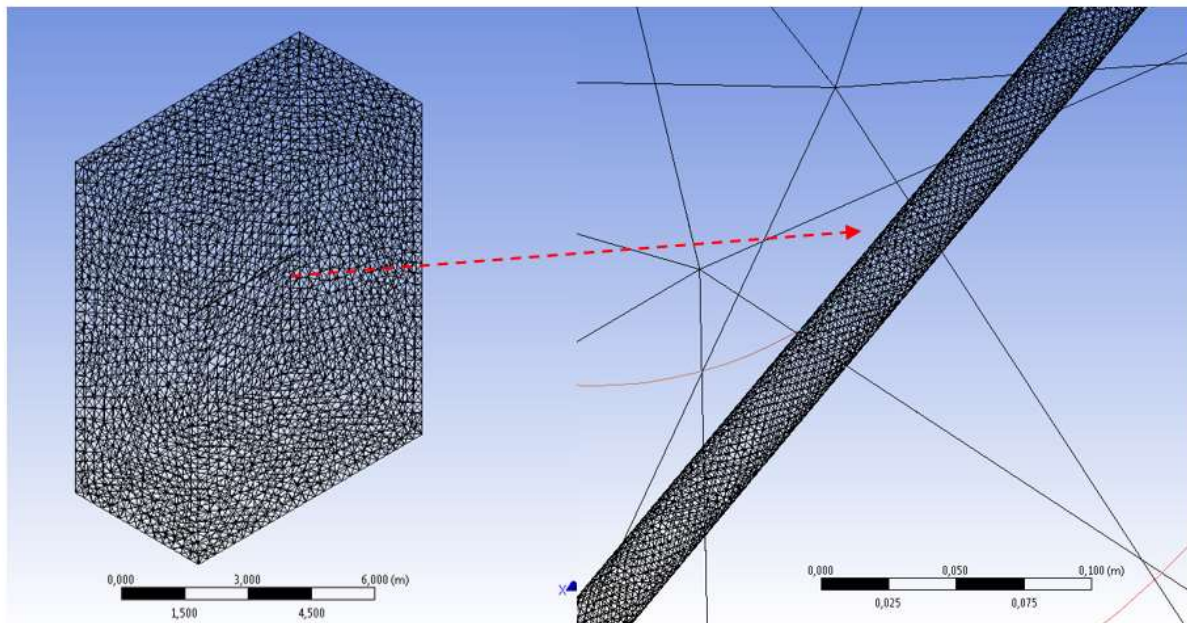


Figura 26. Visualización final del mallado a utilizar en el estudio

Este será por tanto el mallado que se utilizará en todos los futuros análisis que se realicen sobre el cuerpo, teniendo la siguiente cantidad de elementos y nodos:

<u>Número de Nodos</u>	299.287
<u>Número de Elementos</u>	1.696.709

Tabla 8. Numero de nodos y elementos del mallado final

6.2.4. Análisis

Los análisis que se realizarán a continuación están basados en el calor producido debido a la corriente que atraviesa el cable, al transmitido por convección o radiación al ambiente y al intercambio térmico debido a la presencia de fluidos en contacto con el cuerpo (agua de lluvia). [23][22]

Análisis termoelectrico

Para el análisis termoelectrico, en principio se trató de realizar el análisis en ANSYS a partir del módulo termoelectrico, pero se producían muchos más problemas a la hora de realizar la simulación y obtener resultados lógicos, por lo que finalmente se realizará en dos fases diferenciadas.

Primero se procederá con un estudio eléctrico, en el que se obtenga la generación interna de calor del cable debido al paso de corriente, usándose posteriormente este dato en un segundo análisis térmico en el que se incluirán también efectos de enfriamiento y calentamiento por convección y radiación.

- *PARÁMETROS A DEFINIR EN EL ANALISIS ELÉCTRICO*

Para este primer paso del análisis, definimos las propiedades eléctricas del material, como es su resistencia al paso de corriente. Se concreta también la temperatura inicial y final del cable gracias a los datos reales medidos, y se hace pasar una corriente por el mismo, para comprobar cuál es la generación interna de calor del cable.

Los datos que se han utilizado para la obtención de este valor son los siguientes:

Tomando como dato la resistencia por unidad de longitud de la Tabla 1, calculamos la resistencia total del cable, que será:

$$R = 0.0688 \frac{\Omega}{Km} * \frac{1}{1000} \frac{m}{Km} * 3.75m = 258 \times 10^{-6} \Omega$$

A partir de los datos que se han obtenido en la instalación meteorológica, se pueden conocer los valores de temperatura del cable cuando este no está siendo atravesado por corriente, así como la temperatura a la que llega cuando pasa una corriente de aproximadamente 680 A.

Se toman los siguientes datos, que se introducirán en el modelo de simulación para conocer el valor de generación interna de calor del cable.

PT100_cu	PT100_ce	Corriente
53,77	45,76	683,7
53,61	45,59	682,8
53,05	44,92	682,6
52,92	44,6	684
53,4	45,15	683,2
53,17	44,76	682,6
53,66	45,74	682,7
53,03	45,24	683,3
52,16	44,31	683,8
51,91	44,05	683,3
51,55	43,73	685,1
51,48	43,59	685,4
51,48	43,6	685,2
51,35	43,45	683,5
51,35	43,58	682,2
51,33	43,63	682,5
51,68	43,84	681,7
52,18	44,17	685,2
55,26	47,46	679,8
55,43	47,79	679,9
55,2	47,74	676,4
54,88	47,42	676,8
55,11	48,02	678
54,84	47,97	677,9
54,6	47,43	678,9
55,01	47,55	678,8
55,59	48,36	676,2
53,4559375	45,6725	681,89375

Tabla 9. Valores tomados para la simulación eléctrica

Para la corriente se ha tomado un valor medio de los datos en donde existía un valor suficientemente alto, como se puede ver, unos 680A.

Con respecto a la temperatura final del conductor, en la tabla se pueden apreciar los valores medidos por los dos sensores pt100 instalados en el cable. Su valor varía ya que los mismos sensores, además de la presencia de la esfera de aluminio anodizado también instalada en el cable a estudiar, generan variaciones en la medida, por lo que se tomara un valor medio entre los datos de ambos aparatos de medida, 50°C.

La simulación comienza por tanto con el cable a una temperatura de 14°C y termina con 50°C, considerándose la corriente constante y la temperatura del entorno de 18°C ($T_{ambiente}$ también constante). Para el tiempo de simulación se dará algo más de dos horas (8000 s) para comprobar que los valores son constantes, considerando a partir del análisis de datos reales, que, en apenas 20 minutos, desde que la corriente pasa de prácticamente ser nula a 680A, el cable se encuentra ya a su temperatura máxima.

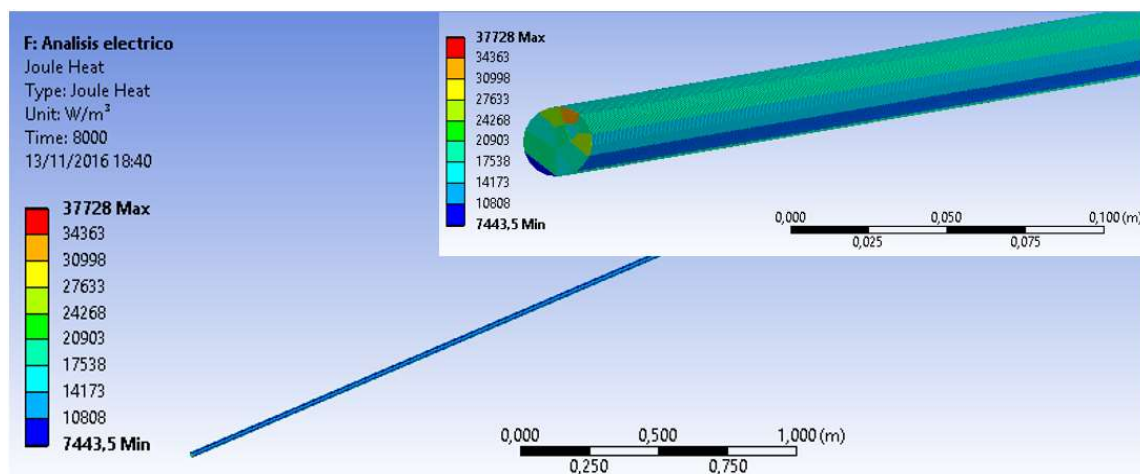


Figura 27. Datos obtenidos a partir de la simulación eléctrica.

Como se puede ver en la escala de la figura 27, se obtienen unos valores de entre 7440 W/m³ y 37728 W/m³, aunque este último valor sea debido a picos; al hacer zoom sobre el cuerpo se aprecia que la mayor parte del mismo se encuentra en la zona de la escala que implica una generación interna de unos 20000 W/m³, por lo que será este el valor tomado para realizar el resto de los análisis.

- *PARÁMETROS A DEFINIR EN EL ANALISIS ELÉCTRICO*

En esta segunda parte del análisis, una vez se conoce el valor del calor interno generado, se introducen los conceptos de convección y radiación.

Con respecto a la convección, se realizarán varias pruebas con varios valores para comprobar cómo afecta la existencia o no de viento y su intensidad en la reducción de temperatura del cable, los resultados de las mismas se encuentran en la siguiente sección (Resultados).

Con respecto a la radiación que afecta el cable, existe tanto la incidente del sol, la radiación incidente del suelo, que es un reflejo de la primera, y la radiación del cable hacia la atmósfera. (No se tendrá en cuenta la radiación propia de la superficie terrestre, adicional a la energía reflejada y proveniente del sol).

Para la radiación propia del cable hacia la atmósfera, se tendrá que definir un valor de emisividad del cable que se tomara como 0.6 (el 60% con referencia a lo que radiaría un cuerpo negro).

El caso presenta por tanto dos tipos de radiación que afectan incrementando la temperatura del cable y la propia emisividad del mismo que provoca un enfriamiento del material, en mayor o menor medida dependiendo de la temperatura del ambiente.

Para poder definir el valor de la radiación incidente, se trató de generar un volumen de control de forma que la cara superior del mismo generara un flujo de 168W/m² y la cara inferior uno de 30W/m², ambas en dirección al cable simulando las radiaciones reales, pero se producían errores a la hora de obtener resultados, el volumen de control acumulaba la mayor parte del calor y por tanto de la temperatura mientras que la temperatura del cable caía a unos 23°C incluso incluyendo la generación interna de calor, por lo que viendo que estos resultados no eran lógicos, este modelo quedo descartado.

Finalmente, para simular estas radiaciones, se añade un flujo de 198W/m^2 general aplicado sobre la totalidad del cuerpo, de forma que estén incluidas tanto la solar incidente como la reflejada por la superficie. La utilización de estos valores de 198 W/m^2 en el mecanismo de radiación se explica en el ANEXO II. Los resultados correspondientes a cambios en estos valores también aparecen en la sección próxima.

Análisis de fluidos

- *ELECCIÓN DEL MODELO PARA LA SIMULACIÓN DE LA LLUVIA*

El caso sobre el que hay que realizar el estudio está conformado por dos tipos de fluidos, como ya se ha mencionado previamente, por un lado, el agua de lluvia y por otro el aire de la atmósfera que está rodeando el cable.

Se trata por tanto un caso de fluidos multifase, siendo la fase primaria el aire en estado gaseoso y la secundaria el agua de lluvia en estado líquido.

ANSYS tiene diferentes formas de tratar los estudios de flujos multifase, primero se tiene que definir cuál es el tipo de caso a estudiar. Usando la teoría que puede encontrarse en ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, [21] se puede determinar que el caso a estudiar encaja con el tipo 'Droplet flow', que es aquel en el que existe un fluido discreto que se encuentra en forma de gotas en un gas continuo, como en este caso es el aire junto con las gotas de lluvia.

Para comenzar a realizar el estudio hay que conocer la forma en la que ambas fases interactúan entre sí, para elegir el método que mejor convenga en el caso concreto del estudio.

Para cualquiera de los métodos disponibles en ANSYS, existen dos tipos de aproximaciones que se pueden aplicar para esta clase de estudios, por un lado, el método Euler-Euler y por otro Euler-LaGrange.

En la primera de las aproximaciones Euler-Euler, se estudian las fases de forma diferente, la fase fluida se estudia de forma continua, usando las ecuaciones de Navier-Stokes. La fase dispersa se estudia generando un gran número de partículas o burbujas sobre el campo de flujo previamente generado, este flujo disperso podrá intercambiar tanto masa como energía con la fase líquida. Es una aproximación que se usa y resulta más sencilla si se consideran despreciables las interacciones entre partículas, lo que implica que el flujo disperso ocupe un volumen muy pequeño con respecto al flujo fluido.

La segunda de las aproximaciones, Euler-LaGrange, trata a los flujos de forma que cada fase ocupa un volumen concreto, de esta forma, un espacio ocupado por una de las fases no puede ser ocupado por la otra. Se define el espacio y el tiempo como funciones continuas y se describen 'fracciones de volumen' para cada una de las fases. Esta segunda aproximación será la elegida para realizar los análisis, ya que sí se quiere tener en cuenta la interacción que pueda existir entre las partículas de agua y las distintas partículas que componen el aire.

Como se indica en la teoría y acorde con el régimen de flujos que se ha seleccionado, el modelo que mejor se aproxima a este caso es el denominado 'Mixture Model' o modelo mixto. También podría aplicarse el modelo Euler, pero implica más complejidad y un gasto computacional mayor, por lo que se obviará a no ser que los resultados obtenidos no sean suficientemente precisos.

Como descripción final del modelo utilizado, el modelo mixto puede utilizarse en casos como en el del estudio, donde las distintas fases tienen velocidades diferentes, pero asumiendo un equilibrio local.

Hay que tener en cuenta que para este modelo solo una de las fases fluidas puede definirse como gas compresible ideal, en el caso de necesitar varias fases de este tipo habría que cambiar el modelo a aplicar. No hay limitación usando fluidos compresibles por lo que en este caso con una fase fluida y otra en forma de gas no existe problema.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

7.1. ANÁLISIS TÉRMICO

Para el análisis térmico, se realizarán una serie de comparaciones para comprobar cómo afectan las diferentes condiciones climatológicas, sobre todo el efecto del viento a la temperatura del cable.

Primero se disponen los efectos de radiación entrante, la emisividad que se fijó en un 0,6 y se simula con un valor de convección de $5\text{W/m}^2\text{°C}$.

Con estos valores se obtiene una temperatura externa del cable de aproximadamente 51°C , (es ligeramente mayor en el interior lo que es lógico teniendo en cuenta que es la capa más externa la que intercambia calor con el ambiente) lo cual es un valor muy cercano a los valores medidos por las sondas pt100. A partir de aquí, se realizarán cambios para comprobar cómo varía esta temperatura.

Si no se tiene en cuenta el valor de la radiación del propio cable a la atmósfera, se obtiene una temperatura final de 80°C , lo que implica un aumento de casi 30°C con respecto a los resultados obtenidos previamente. Esto se debe a que la diferencia de temperatura entre el cable y el entorno es bastante grande, por lo que el calor que es emitido por el cable a partir del mecanismo de radiación es considerable. Hay casos en los que el efecto de la radiación del cable es limitado (Se puntualizó en la sección 5.2 que en algunos casos se desprecia), pero en este estudio concreto, y como se puede observar por los resultados obtenidos, este mecanismo no se puede obviar.

Por otro lado, el valor de flujo radiativo de 198W/m^2 es el correspondiente a la radiación que incidirá en el cable en un día despejado, pero también hay que considerar que, si el día es nublado, esta mayor cantidad de nubes podrá absorber mayor cantidad de radiación incidente del sol y por lo tanto, este valor de radiación sobre el

cable será menor. Se ha simulado un caso en el que este parámetro se fija en 185W/m^2 , obteniendo una temperatura final del cable de aproximadamente $49,5^\circ\text{C}$. No es un cambio muy significativo teniendo en cuenta que en condiciones normales esta temperatura es de 51°C según la simulación, pero ya implica una reducción que junto con otras variables sí podría llegar a ser importante, si se trata por ejemplo de un día nublado y con un porcentaje de humedad mayor, factor cuyo efecto sobre la temperatura se verá más adelante, la reducción de temperatura ya puede ser bastante mayor.

Para el caso de la convección, hay que tener en cuenta, no solo la velocidad del viento para saber si se trata de un caso de convección natural o forzada, sino también la dirección de este viento, ya que como se ha explicado en secciones previas, el viento perpendicular al cable será el que más pueda afectar a su temperatura.

En la siguiente tabla aparecen una serie de valores que puede tomar la constante de convección ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$) según la velocidad del viento, posteriormente se realizarán más análisis con la dirección del mismo.

Se considera que para valores de viento de 0.5 m/s se trata de convección natural por lo que el coeficiente de convección está entre 0 y 10 W/m^2 , después comienzan mecanismos de convección forzada.

V [m/s]	0.0	2.23	3.25	4.46	6.70	8.93	11.16	13.4
h_c [W/m ² °C]	10	17.6	22.2	25.7	34.1	42.4	50.6	58.5

Tabla 10. Valores de coeficiente convectivo con respecto a la velocidad del viento

Para las simulaciones previas, se había considerado por tanto un caso de convección natural, en donde la velocidad del viento fuese nula o prácticamente nula, pero si esta empieza a incrementar y se introduce en la simulación, la temperatura del conductor varía bastante.

Realizando las simulaciones correspondientes, se obtiene una distribución de temperatura como la que aparece en la figura 28, en la

que el interior del cable está a una temperatura algo mayor que en la parte externa, aunque considerando el grosor del mismo y las condiciones a las que se le está sometiendo, las variaciones entre ambos puntos no son muy grandes.

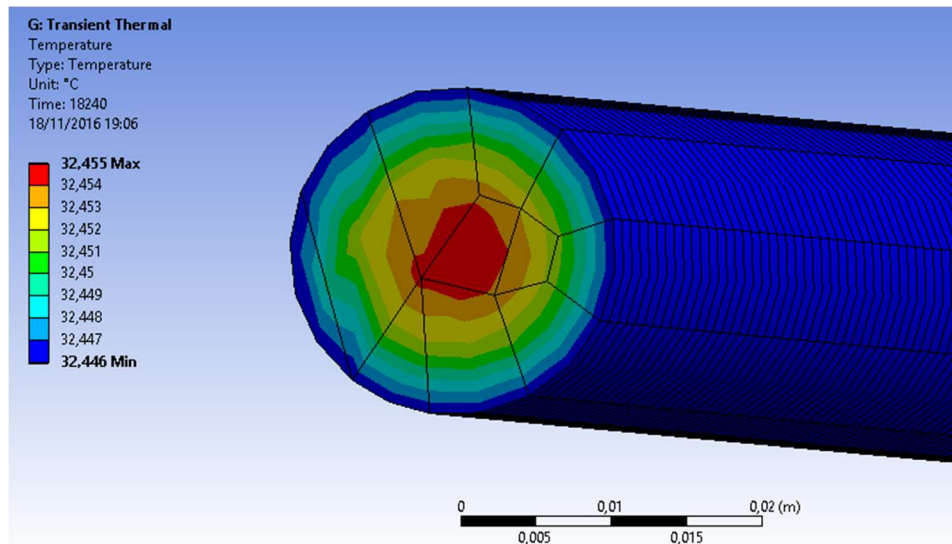


Figura 28. Distribución de temperaturas en el interior del cable

Introduciendo en la simulación los valores de la tabla anterior como constantes convectivas en cada caso, se puede ver como la temperatura del conductor se reduce considerablemente, considerándose el resto de variables constantes. Los mayores cambios se aprecian al principio, cuando se aumenta el valor del coeficiente convectivo desde los $10\text{W/m}^2\text{°C}$, ya que implica un paso de convección natural a convección forzada, donde el calor que emana el cable es 'arrastrado' por el viento.

Los cambios de temperatura correspondientes a los últimos valores convectivos son muy parecidos, ya que existe un límite térmico, teniendo en cuenta la temperatura del ambiente que rodea el cable, de forma que no se puede "eliminar" más calor proveniente del mismo.

En las siguientes gráficas se puede ver cómo varía la temperatura a lo largo del tiempo con los diferentes coeficientes, cómo se puede apreciar, la temperatura final puede incluso llegar a reducirse a la mitad, lo cual implica que podría admitir una transmisión de potencia bastante mayor sin que esta genere problemas térmicos.

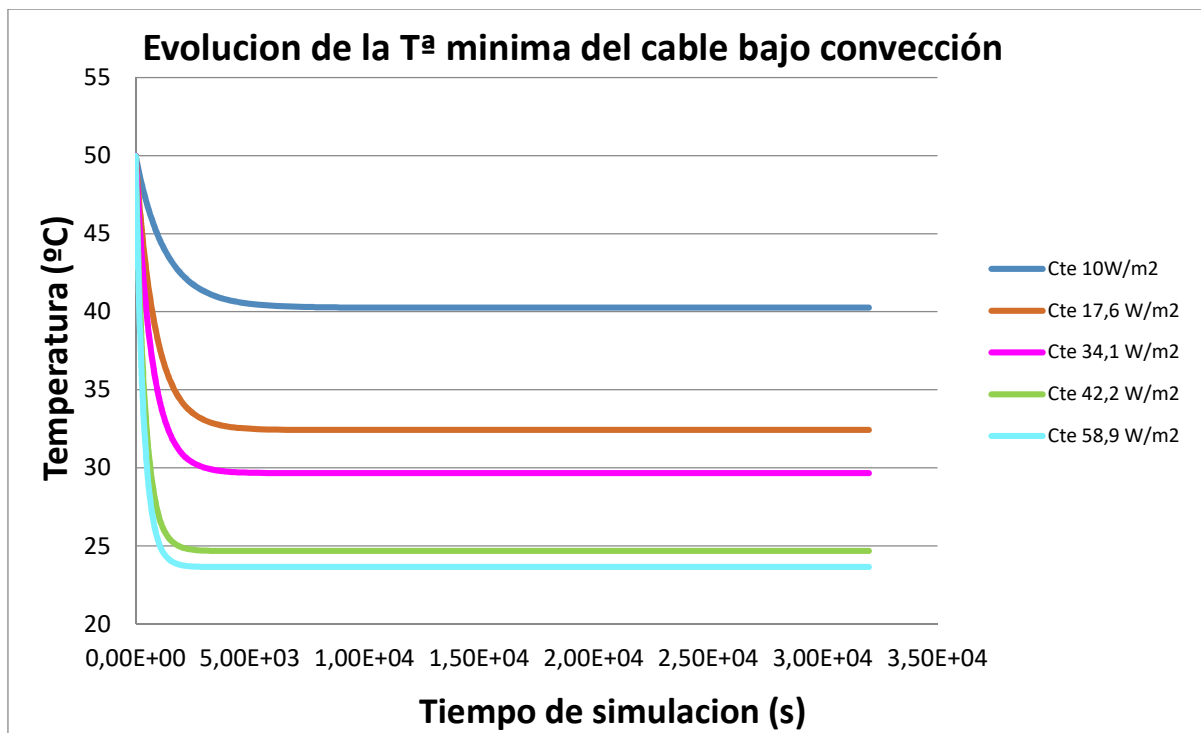


Figura 29. Gráfico, variación de la temperatura con distintos coeficientes convectivos

Para el caso de las temperaturas máximas que se pueden encontrar en el conductor, los valores y las variaciones de las mismas realizando cambios en la constante de convección del sistema, son prácticamente los mismos y siguen el mismo patrón que en la gráfica de las temperaturas mínimas. En todos estos valores se ha considerado que el viento es perpendicular al cable por lo que el efecto de enfriamiento que genera sobre es él es el máximo posible.

Si se toma ahora como constante uno de los valores convectivos (en este caso se tomará el de 17,6 W/m²) se puede variar la dirección de aplicación del viento y ver como varía la temperatura con respecto a esta variable.

En el análisis térmico no se puede generar el efecto del viento con diferentes direcciones ya que siempre se toma, como ya se ha mencionado, el viento existente como máximo y por lo tanto perpendicular al cuerpo. Para poder simular este caso, hay que utilizar el módulo de análisis de fluidos en el que se podrá descomponer el viento según los diferentes grados de aplicación.

7.2. **ANÁLISIS DE FLUIDOS**

Direcciones del viento

Para poder simular la influencia del ángulo de incidencia del viento sobre el cable, se utiliza el módulo de fluidos "Fluent". Una vez definido el cuerpo y el volumen de control, se incluye en el modelo la posibilidad de que se puedan realizar intercambios térmicos, (la ecuación de la energía), además de esto, se incluye también la radiación solar para poder tener resultados térmicos cercanos a los que ya se obtuvieron en el módulo térmico y que sean por tanto más cercanos al caso real.

Se definen como condiciones de contorno, dos de las caras del volumen de control como entradas del tipo "velocity inlet" de forma se introduzcan los componentes correspondientes del viento por cada una de las entradas, siempre considerando una velocidad absoluta de 2.23m/s (la correspondiente al valor de constante de convección definido previamente como constante).

El resto de las caras del volumen de control se definirán como salida, de forma que todo el flujo que entra por las caras de entrada salga de una manera u otra por el resto de las caras.

Una vez definido el flujo entrante, se definen de nuevo las características del cable, que es de acero y aluminio (se varía la resistencia para que concuerde con la de este caso), y se activan los métodos de transmisión térmica de convección, con una constante convectiva, como se comentó de 17,6 W/m², y una emisividad del cable de 0,6, siendo la temperatura del ambiente de 18°C (en el programa de simulación aparecerán los resultados en kelvins ya que se trabaja con esta unidad de temperatura).

Se realizan seis casos, uno con la velocidad completamente perpendicular al cable y por tanto de componente "X" en su totalidad, posteriormente, se simulan ángulos de 70°, 50°, 30°, 15° y 0° para comprobar las variaciones, obteniéndose los siguientes resultados:

Ángulo	Límite de temperaturas (K)		Temperatura (k)	Temperatura (C)
90	314	299	306,5	33,5
70	314	300	307	34
50	314	300	307	34
30	315	300	307,5	34,5
15	316	300	308	35
0	317	301	309	36

Tabla 11. Datos de variación térmica con la dirección del viento

Hay que tener en cuenta sobre los resultados de la simulación, que se están procesando casos más simples que los que pueden aparecer en casos reales. Sin ir más lejos, no se está considerando la componente vertical del viento, sino simplemente el ángulo de ataque del mismo con respecto del plano en el que está el cable (Z-X), por lo que las variaciones térmicas incluyendo este factor pueden ser algo diferentes, pero con todo, se puede ver como la dirección del viento sí es un factor a considerar y que genera bastante fluctuación en la temperatura, para realizar el modelo dinámico de ampacidad habría que considerar gracias a las anemoveletas el ángulo de ataque e incluirlo en los algoritmos de optimización de la ampacidad de la línea.

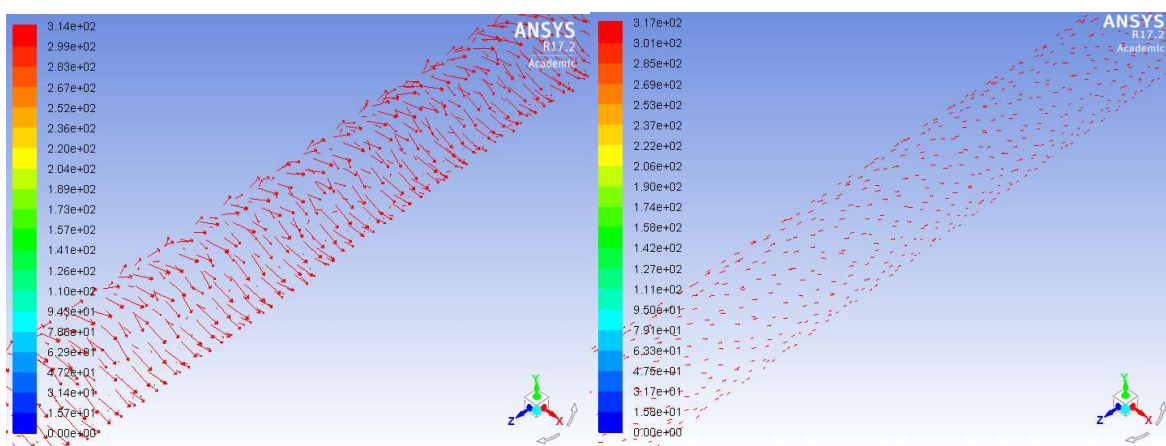


Figura 30. Variación de la intensidad de los vectores (viento) con el ángulo de ataque

Como se puede apreciar en la Figura 30, dependiendo del ángulo del viento, los vectores que representan al mismo y que lo rodean serán de mayor o menor intensidad.

La figura se corresponde con la simulación de los casos extremos en los que el viento sea perpendicular al cable, situación en la que se obtiene la mayor refrigeración como es lógico, y cuando el viento es paralelo al eje del cable, situación en la que el choque propiamente dicho entre el viento y el cable es mínimo y por lo tanto la cantidad de calor arrastrada es mínima.

Esta situación queda reflejada en la figura 31, la cual muestra una gráfica obtenida a partir de la tabla 11, y que refleja la variación de la temperatura con los diferentes ángulos que va tomando el viento.

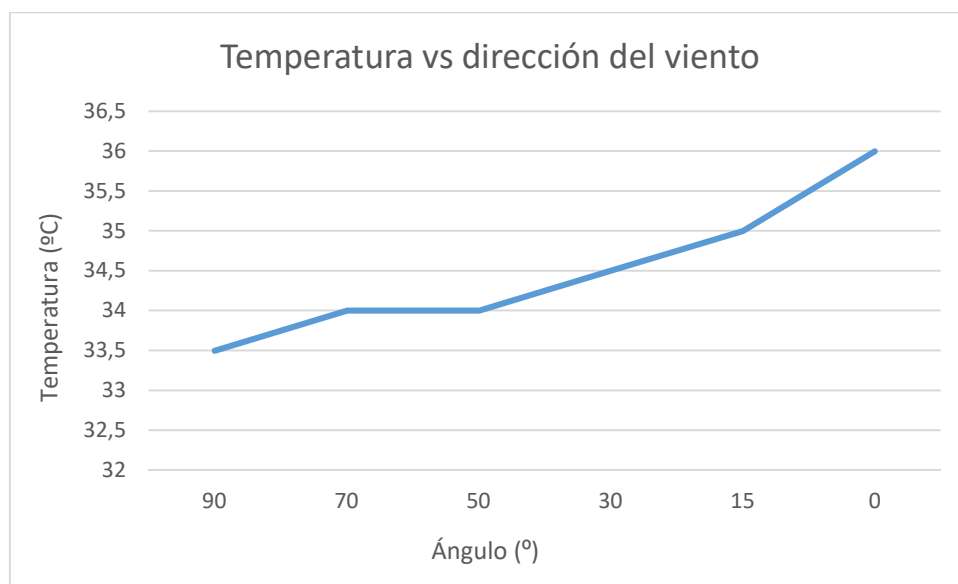


Figura 31. Gráfico de variación térmica con respecto al ángulo del viento.

Humedad

Para el estudio de la humedad, se fijarán unos valores base en los que se toma como constante convectiva un valor de $10\text{W/m}^2\text{°C}$, por lo tanto, se supone que la presencia del viento es despreciable, se fijará en un valor de $0,5\text{ m/s}$, para que no afecte a los posibles cambios que puedan generar los diferentes valores de humedad a simular, una emisividad del cable de $0,6$ y por último una radiación solar de 198 W/m^2 .

De nuevo, se cambian las propiedades del material para que se correspondan con el cable a estudiar.

A partir de los datos que se han podido obtener de la instalación en la fachada del edificio ETSIIT, se fijan unos valores iniciales sobre los que simular. Se han tomado 3 casos base con distinto grado de humedad y en los que no interviene la lluvia para comprobar mediante la simulación que las características fijadas simulan el caso real correctamente.

Los datos de dichos casos se presentan en el ANEXO III y se toman por tanto únicamente como base, ya que en los mismos intervienen diferentes tipos de variables de distintas formas, y para una mejor visualización de los resultados se realizarán cambios más controlados.

A partir de los promedios de la temperatura ambiente y la humedad en cada caso simulado, se obtiene la razón de humedad o razón de mezcla, que se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla. Para la simulación hay que tener correctamente definidos los términos razón de humedad y humedad absoluta.

La humedad absoluta, denominada también densidad del vapor de agua, es la relación entre la masa de vapor de agua y el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua; este es un valor que se consigue medir en la estación de medida, pero que no hay que introducir como tal en ANSYS, sino que hay que utilizar la gráfica psicométrica para obtener el valor de la razón de humedad. Una vez definidos estos valores correctamente, se pasa a la simulación de diferentes grados de humedad bajo la misma temperatura, para comprobar las variaciones térmicas que estos cambios provocan en el cable.

Para las simulaciones, se ha activado la ecuación de la energía para los intercambios térmicos, se define de nuevo la radiación solar para estar en las condiciones más próximas a las reales. Además, como a lo largo de los diferentes casos no se superarán los 3 m/s de velocidad de viento (en los datos recogidos, la velocidad del viento no suele pasar de este valor en condiciones normales), se considera que el flujo no llegará a ser turbulento, por lo que se definirá un modelo de flujo laminar en el que las

partículas seguirán trayectorias ordenadas, siguiendo líneas de corriente, de esta forma se requerirá menor gasto computacional y las simulaciones requerirán menos tiempo para llevarse a cabo.

Para definir la razón de humedad, se activa el modelo de especies de ANSYS, en el que se considera una composición de nitrógeno, oxígeno y vapor de agua para el aire, las fracciones másicas de los dos primeros componentes se fijan en 0.754 y 0.231 respectivamente y la de la humedad dependerá de cada caso, obteniéndose como ya se ha explicado, a partir del gráfico psicrométrico. Por último, se definen las conductividades térmicas de cada uno de estos componentes y se dispone un tiempo de simulación de 8 horas para obtener resultados estables.

Los datos obtenidos de los diferentes casos se resumen en la siguiente tabla y pueden visualizarse en el gráfico de la Figura 32. Como se puede ver, se toman distintos valores como constantes convectivas a medida que aumenta la velocidad del viento, pero, aun así, son casos muy simplificados y controlados por lo que hay que considerar un factor de error con respecto de datos reales que se hayan podido tomar en la instalación bajo unas condiciones climatológicas parecidas.

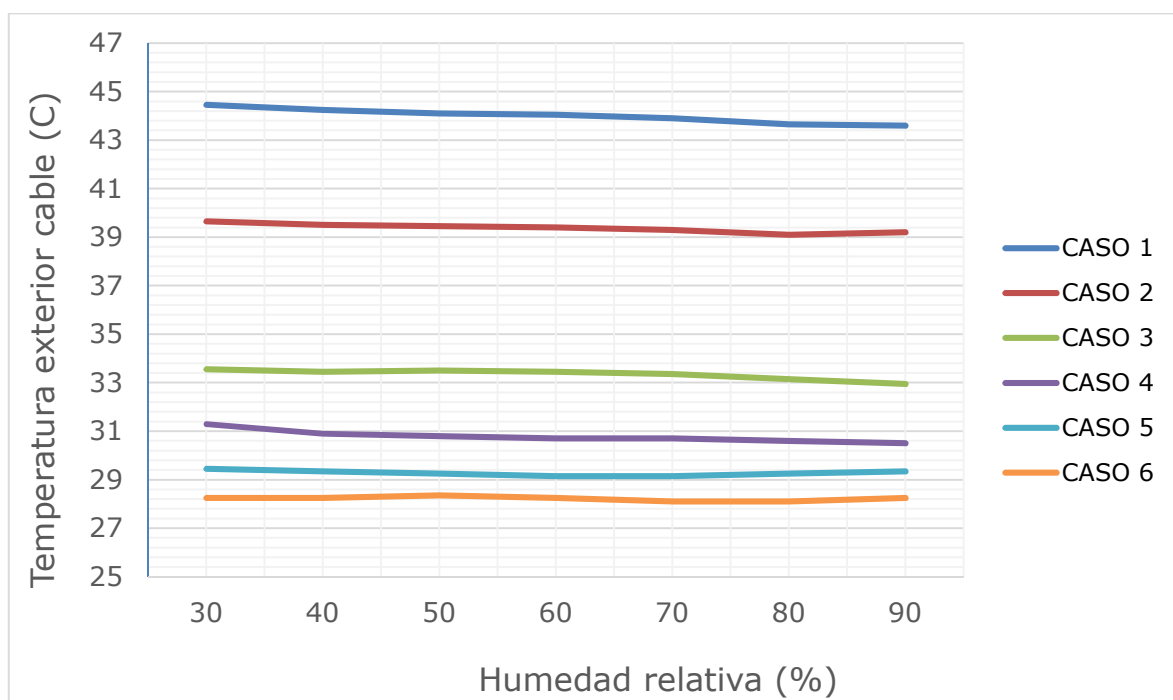


Figura 32. variación térmica con variaciones de la humedad

	T. ambiente(C)	H.R (%)	Razón humedad	Viento (m/s)	Cte Convectiva	Tª cable (C)
CASO 1	18	30	0,005	0,5	10	44,45
		40	0,0065	0,5	10	44,25
		50	0,0085	0,5	10	44,1
		60	0,01	0,5	10	44,05
		70	0,011	0,5	10	43,9
		80	0,014	0,5	10	43,65
		90	0,0152	0,5	10	43,6
CASO 2	18	30	0,005	1	12	39,65
		40	0,0065	1	12	39,5
		50	0,0085	1	12	39,45
		60	0,01	1	12	39,4
		70	0,011	1	12	39,3
		80	0,014	1	12	39,1
		90	0,0152	1	12	39,2
CASO 3	18	30	0,005	1,5	16	33,55
		40	0,0065	1,5	16	33,45
		50	0,0085	1,5	16	33,5
		60	0,01	1,5	16	33,45
		70	0,011	1,5	16	33,35
		80	0,014	1,5	16	33,15
		90	0,0152	1,5	16	32,95
CASO 4	18	30	0,005	2	17,5	31,3
		40	0,0065	2	17,5	30,9
		50	0,0085	2	17,5	30,8
		60	0,01	2	17,5	30,7
		70	0,011	2	17,5	30,7
		80	0,014	2	17,5	30,6
		90	0,0152	2	17,5	30,5
CASO 5	18	30	0,005	2,5	19,5	29,45
		40	0,0065	2,5	19,5	29,35
		50	0,0085	2,5	19,5	29,25
		60	0,01	2,5	19,5	29,15
		70	0,011	2,5	19,5	29,15
		80	0,014	2,5	19,5	29,25
		90	0,0152	2,5	19,5	29,35
CASO 6	18	30	0,005	3	21	28,25
		40	0,0065	3	21	28,25
		50	0,0085	3	21	28,35
		60	0,01	3	21	28,25
		70	0,011	3	21	28,1
		80	0,014	3	21	28,1
		90	0,0152	3	21	28,25

Tabla 12. Resultados de la simulación con humedad

Como se puede apreciar, tanto en el gráfico como en la tabla, las variaciones que puede llegar a provocar el hecho de que la humedad sea mayor, son apreciables cuando la velocidad del viento es pequeña, en estos casos se pueden ver variaciones de casi un grado cuando la humedad es muy baja y cuando esta es muy alta (30% - 90%).

Cuando existe un viento de 2.5 m/s aproximadamente, o con valores superiores a este dato, las variaciones de temperatura del cable con respecto a distintos datos de humedad no son apreciables. Esto puede deberse a que ya existe una gran reducción en la temperatura debido únicamente al mecanismo de convección, ya que vientos más intensos implican constantes convectivas mayores, lo que implica a su vez una mayor reducción de temperatura como quedó plasmado en la figura 29.

Puede suponerse por tanto que sólo habría que tener en cuenta las variaciones térmicas de la humedad en casos donde la velocidad del viento es despreciable o muy baja.

Lluvia

Para la simulación de la lluvia se tiene en cuenta como ya se ha especificado en el apartado 6.2 que se trata de dos fluidos interactuando con el cable, tratándose por tanto de un modelo multifase.

El proceso de definición en este caso comienza seleccionando uno de los fluidos como fase primaria, en este caso el flujo primario será el aire, mientras que el flujo secundario será el agua de lluvia. Ambos fluidos se encuentran definidos en la biblioteca de materiales de ANSYS, por lo que se tomarán para el estudio los datos de densidades y viscosidades que aparecen en la misma.

Como en este caso el flujo secundario son gotas, partículas en estado fluido, se definen como no granulares y también se escoge el diámetro de las mismas, el cual se tomará como un diámetro estándar de las gotas de lluvia, ya que los aparatos de medida de los que se disponen no son tan precisos como para tener estas medidas.

Se ha escogido por tanto que las gotas de lluvia tienen un tamaño promedio de 2mm (suelen encontrarse en rangos de entre 0.1 y 5mm, pero las de 2mm son las más estables).

Una vez se tienen definidas las fases, se pasa a los ajustes de concentración de la fase secundaria (gotas) en el área. Es importante definir esta concentración ya que de ella dependerá la transferencia de masa y energía por lo que influirá en los parámetros que se desean conocer.

Se vuelve a introducir el diámetro mencionado previamente y se incluye el valor de la tensión superficial, esta característica es importante ya que sino los resultados finales no se aproximarían tanto a la realidad como deberían.

Con esta definición de parámetros y añadiendo la generación de calor en el cable y la radiación solar se procede a la comprobación del modelo de simulación con datos reales medidos en la instalación, para estudiar si en este modelo se ajusta más el modelo de flujo laminar o turbulento. (Los datos que se usan para esta parte del estudio se encuentran en el ANEXO III).

Se trata por tanto de dos casos con características diferentes, ambos con lluvia, y en el que el cable se encuentra a 19 y 17 grados aproximada y respectivamente. Simulando estos casos suponiendo un flujo laminar, se obtiene una temperatura del cable de 23.9 y 22.1°C, por otro lado, si se supone flujo turbulento, las temperaturas del cable serán en cada caso de 18.1 y 16.7°C, siendo este último modelo de simulación el que más se aproxima a los resultados reales, será el que se tome para realizar el resto de simulaciones controladas.

Se puede ver también que el modelo de simulación turbulenta se aproxima mucho más al caso real, cuando la velocidad del viento es mayor, lo cual es lógico ya que es entonces cuando las partículas de agua

y viento tomarán trayectorias más caóticas y con este modelo, este comportamiento está mucho mejor definido.

Hay que tener en cuenta que la velocidad de las gotas de agua depende de su tamaño, además de esta velocidad estará la velocidad del aire, que se definirá de forma independiente. Se simularán 3 casos para cada temperatura, con diferentes intensidades de lluvia, realizándose simulaciones a 3 temperaturas diferentes, con velocidades de viento para ver los cambios térmicos sobre el cable:

Tª externa (C)	Viento (m/s)	Cte Conveccion	Diametro gotas (mm)	Velocidad gotas (m/s)	Densidad lluvia (mm/min)	Tª cable (C)
10	0,5	10	1	1	0,05	31,1
10	1,5	14	1	1	0,05	20,85
10	2,5	18	1	1	0,05	17,13
10	3,5	22	1	1	0,05	17,5
10	4,5	26	1	1	0,05	15,79
10	5,5	30	1	1	0,05	16,38
10	0,5	10	2	2	0,2	33,05
10	1,5	14	2	2	0,2	20,95
10	2,5	18	2	2	0,2	16,45
10	3,5	22	2	2	0,2	16,96
10	4,5	26	2	2	0,2	15,81
10	5,5	30	2	2	0,2	16,23
10	0,5	10	4	2,5	0,3	25,75
10	1,5	14	4	2,5	0,3	20,1
10	2,5	18	4	2,5	0,3	15,95
10	3,5	22	4	2,5	0,3	17,1
10	4,5	26	4	2,5	0,3	15,7
10	5,5	30	4	2,5	0,3	14,82
14	0,5	10	1	1	0,05	35
14	1,5	14	1	1	0,05	24,65
14	2,5	18	1	1	0,05	20,95
14	3,5	22	1	1	0,05	21,45
14	4,5	26	1	1	0,05	19,65
14	5,5	30	1	1	0,05	20,25
14	0,5	10	2	2	0,2	36,75
14	1,5	14	2	2	0,2	26,75
14	2,5	18	2	2	0,2	20,3
14	3,5	22	2	2	0,2	20,7
14	4,5	26	2	2	0,2	19,7
14	5,5	30	2	2	0,2	20,1

14	0,5	10	4	2,5	0,3	29,55
14	1,5	14	4	2,5	0,3	23,95
14	2,5	18	4	2,5	0,3	19,3
14	3,5	22	4	2,5	0,3	21,15
14	4,5	26	4	2,5	0,3	19,6
14	5,5	30	4	2,5	0,3	19,2
18	0,5	10	1	1	0,05	38,7
18	1,5	14	1	1	0,05	28,5
18	2,5	18	1	1	0,05	24,85
18	3,5	22	1	1	0,05	25,25
18	4,5	26	1	1	0,05	23,5
18	5,5	30	1	1	0,05	24,05
18	0,5	10	2	2	0,2	37,78
18	1,5	14	2	2	0,2	28,6
18	2,5	18	2	2	0,2	24,15
18	3,5	22	2	2	0,2	24,65
18	4,5	26	2	2	0,2	23,55
18	5,5	30	2	2	0,2	23,95
18	0,5	10	4	2,5	0,3	33,25
18	1,5	14	4	2,5	0,3	27,8
18	2,5	18	4	2,5	0,3	23,1
18	3,5	22	4	2,5	0,3	25,05
18	4,5	26	4	2,5	0,3	23,5
18	5,5	30	4	2,5	0,3	22,6

Tabla 13. Resultados de las simulaciones con lluvia

Estos resultados pueden verse mejor a partir de gráficos, se presentan a continuación tres gráficos correspondientes a las tres temperaturas diferentes simuladas, dentro de las cuales se tienen en cuenta cambios en la densidad de la lluvia, su velocidad y la velocidad del viento con su correspondiente variación de constante convectiva.

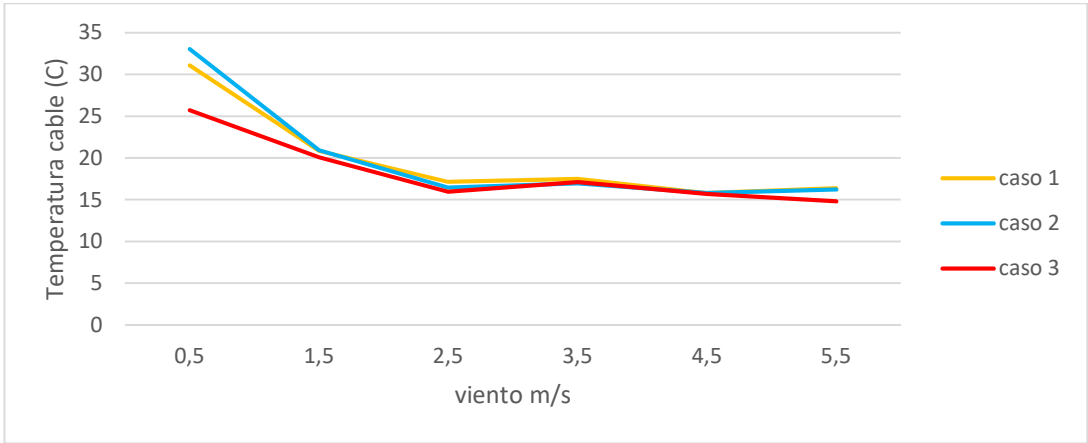


Figura 33. Gráfico de la 1era simulación de temperatura con lluvia (10°C)

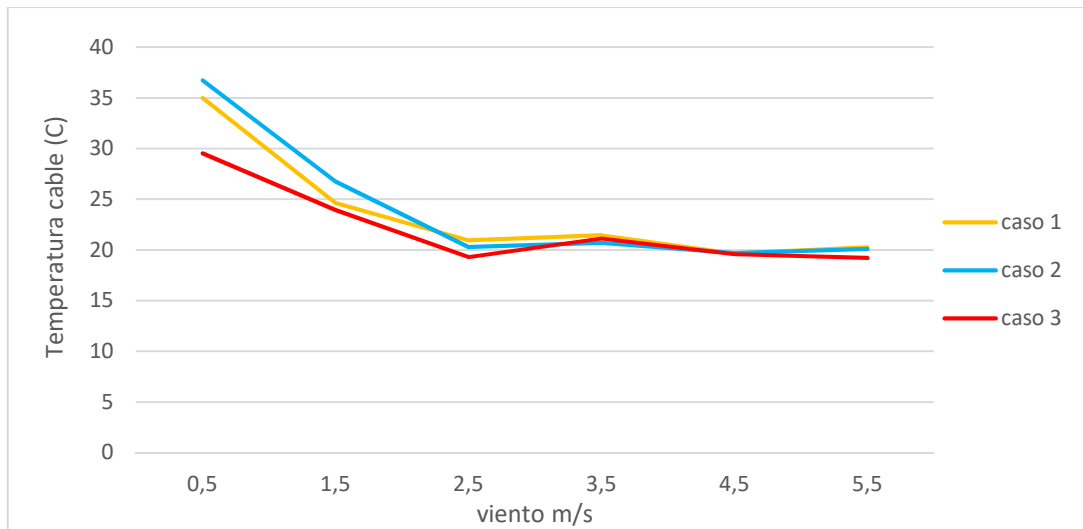


Figura 34. Gráfico de la 2da simulación de temperatura con lluvia (14°C)

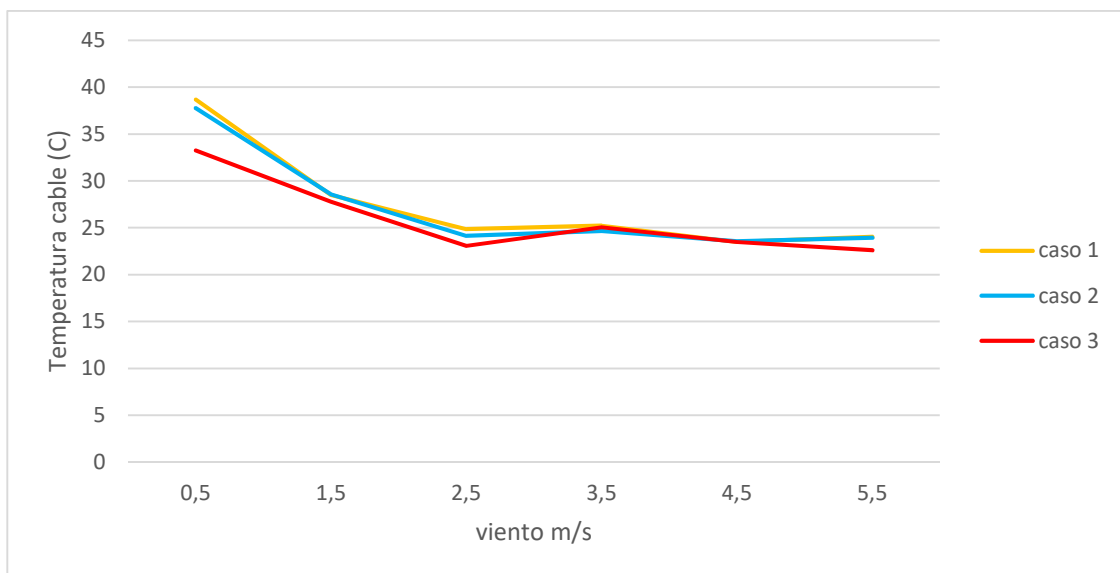


Figura 35. Gráfico de la 3ra simulación de temperatura con lluvia. (18°C)

En los casos simulados, se puede ver que con mayores lluvias los descensos de temperatura en el cable son ligeramente mayores, aunque de forma global se aprecia que una lluvia más intensa no implica descensos de temperatura muy diferentes a los que genera una lluvia ligera, se ve el mismo patrón de cambios.

Cuando se supone una lluvia de unos 2mm de diámetro, las temperaturas sin viento son ligeramente mayores que en caso anterior con lluvias más finas, aunque después, con vientos mayores las temperaturas del cable en ambos casos son prácticamente iguales.

En los tres gráficos se puede apreciar un punto, donde la temperatura del cable en vez de continuar disminuyendo, aumenta. Esto puede deberse a que se trata con velocidades de viento mayores, por lo que las partículas empiezan a adquirir comportamientos turbulentos. Puede deberse por tanto a un mayor número de choques entre partículas, aunque después el modelo se estabiliza y continúa descendiendo la temperatura del cable.

7.3. **ANÁLISIS EN CONJUNTO**

A continuación, se realizarán las simulaciones de 6 casos, teniendo en cuenta para cada una de ellas, distintos valores de las variables estudiadas previamente para poder tener una mejor visión de los cambios que las mismas pueden generar de forma conjunta. Estos casos simulan posibles condiciones climatológicas afectando a las líneas de transmisión a lo largo del año.

Caso 1					
Temperatura exterior (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Dirección viento	Lluvia (mm/min)	Temperatura cable (°C)
9,5	85	4	70	0.3	15,02
Caso 2					
Temperatura exterior (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Dirección viento	Lluvia (mm/min)	Temperatura cable (°C)
13	90	2	55	0.2	19,25
Caso 3					
Temperatura exterior (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Dirección viento	Lluvia (mm/min)	Temperatura cable (°C)
21,5	76	1,5	80	0	43,35
Caso 4					
Temperatura exterior (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Dirección viento	Lluvia (mm/min)	Temperatura cable (°C)
6,5	70	7	40	0	16,8
Caso 5					
Temperatura exterior (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Dirección viento	Lluvia (mm/min)	Temperatura cable (°C)
18	60	3,5	90	0.2	24,45
Caso 6					
Temperatura exterior (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Dirección viento	Lluvia (mm/min)	Temperatura cable (°C)
25	40	1	72	0	49,25

Tabla 14. Resultados ante variaciones de las variables en conjunto

8. COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES

Como se ha podido ver a lo largo de la sección de resultados, las condiciones climáticas definitivamente generan cambios muy visibles sobre la ampacidad de las líneas.

Como se esperaba gracias a la lectura de artículos dentro de esta misma área, las condiciones que más pueden llegar a afectar esta temperatura son por un lado la lluvia y por otro el viento, siendo este último el factor más importante a tener en cuenta, no sólo por su intensidad sino por la dirección del mismo con respecto del cable a estudiar.

Poder establecer un modelo dinámico de ampacidad permitiría una gran mejora con respecto a la potencia que podrían llegar a transportar las líneas de tensión, sobre todo en condiciones climáticas ligeramente adversas, con vientos y lluvias moderadas, las cuales reducirían varias decenas de grados el límite térmico establecido actualmente.

Por supuesto hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos no son completamente reales ya que las simulaciones se han realizado bajo condiciones muy específicas, suponiendo, por ejemplo, valores de viento o temperatura exterior constantes durante horas cuando en la realidad estos valores están sujetos a variaciones continuas. Con todo, los resultados muestran la relación general de dichos factores con la ampacidad de los cables.

Asimismo, para las simulaciones se ha establecido una generación interna de calor que se ha supuesto contante y está basada en los datos de la instalación meteorológica de la ETSIIT, la cual se ve atravesada por aproximadamente 680A, pero este valor tendría que ser calculado de forma individual para cada caso a estudiar, además, como en los casos reales las líneas se ven atravesadas por corrientes variables, este valor también sería una variable, y no una constante como se ha supuesto a lo largo de las simulaciones llevadas a cabo en este estudio.

Como conclusión, si se consiguiesen instalar estaciones meteorológicas de forma que se tuviesen datos de las mismas de forma suficientemente rápida y teniendo información más precisa sobre cómo estos factores climáticos afectan a la temperatura límite, se podría crear un modelo dinámico que ayudase a la mejora de las líneas, permitiendo además una mejor introducción y establecimiento de las diferentes energías renovables a la red eléctrica. Esto implicaría además una menor pérdida de potencia con respecto a los valores actuales y, en resumen, conllevaría un aumento de la eficiencia de las líneas.

9. LÍNEAS FUTURAS

Este proyecto de calibración dinámico de las líneas de transmisión se puede utilizar sobre todo y como ya se mencionó al principio del trabajo para la integración de las energías renovables en la red eléctrica. Esto es básicamente lo que se lleva a cabo en el proyecto Dynelec, el cuál puede servir para ver las líneas futuras de estudio con respecto a este área.

En este proyecto, ya se han instalado sondas y sensores, su tecnología está instalada sobre un total de 167km para obtener información y poder realizar los estudios pertinentes, esto permite evaluar la nueva tecnología desarrollada en condiciones reales de trabajo [1].

En este momento se está estudiando la posibilidad de cambiar el modelo de estaciones meteorológicas debido a los problemas que ha generado. (Algunas averías han generado la pérdida de datos muy valiosos para el proyecto).

Debido a esta situación, se ha fijado como objetivo futuro la investigación de otro tipo de estaciones meteorológicas cuyos sensores estén en lo alto de las torres de alta tensión. También se ha pensado en eliminar un foco de problemas que es la comunicación vía GPRS sustituyéndola por comunicación vía fibra óptica, la cual está instalada ya en muchas líneas.

Con este control y estudio se permitirá monitorizar en tiempo real la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas de distribución, optimizando la operación del sistema y aumentando la capacidad de integración de las energías renovables, reduciendo la necesidad de reforzar o construir nuevas infraestructuras y, por tanto, su impacto en el medio ambiente[16]

Con los diferentes estudios realizados, se conseguirá mejorar los algoritmos predictivos que permiten estimar a futuro el estado de la red, así como algoritmos que optimizan la capacidad de detección de incidencias, lo que supone una importante mejora en la toma de decisiones operativas y, como consecuencia, un incremento en la calidad del suministro proporcionado a los consumidores.

Además, se podrán desarrollar e integrar nuevos sensores y dispositivos de comunicación remota, que monitorizan las variables climáticas en múltiples puntos de la red y la modernizan, avanzando hacia el necesario modelo de desarrollo de las redes inteligentes y adaptando la capacidad real de las líneas en cada momento. Esto puede suponer además un punto de partida para la aplicación de este sistema a gran escala, así como su exportación a otras regiones y países.

10. NORMATIVA APLICABLE

Como el proyecto se basa en líneas de alta tensión, hay que tener en cuenta la normativa aplicable en esta área, ya que hay que cumplirla para la instalación de las estaciones meteorológicas, así como para la instalación de futuras tecnologías.

La normativa que se relaciona con el proyecto es el Real Decreto 223/2008, del 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.

Este decreto regula y actualiza las condiciones técnicas, las cuales son una garantía de seguridad y mantiene al día instrucciones técnicas de cualquier tipo de línea eléctrica de alta tensión, las cuales varían mucho debido a la introducción de nuevas tecnologías, así como nuevos materiales que puedan resultar beneficiosos.

Dos leyes básicas se aplican a las instalaciones contempladas en el reglamento: con carácter sectorial, la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, y con carácter horizontal, pero especialmente en materia de seguridad, la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.

Así, por ejemplo, el artículo 3 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, confiere a la Administración General del Estado la competencia para establecer los requisitos mínimos de calidad y seguridad que han de regir el suministro de energía eléctrica, así como la de autorizar las instalaciones eléctricas cuando su aprovechamiento afecte a más de una comunidad autónoma o el transporte o distribución salga del ámbito territorial de una de ellas.

Por lo demás, el artículo 51.1 de dicha Ley 54/1997, de 27 de noviembre, se remite a lo previsto en la citada Ley 21/1992, de 16 de julio, respecto de las normas técnicas de seguridad y calidad industriales que hayan de cumplir las instalaciones de producción, transporte y distribución de energía eléctrica, las destinadas a su recepción por los usuarios, los equipos de consumo, así como los elementos técnicos y materiales para las instalaciones eléctricas.

El mismo artículo 51, en su apartado 3, indica, igualmente, que, sin perjuicio de las restantes autorizaciones reguladas por la Ley, a los efectos considerados en este artículo, la construcción, ampliación o modificación de instalaciones eléctricas requerirá autorización administrativa, según disponga la reglamentación correspondiente.

Por su parte, la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, dedica su título III a la seguridad y calidad industriales y, más concretamente, el

capítulo I de dicho título a la seguridad industrial, definiéndola y determinando sus objetivos.

El artículo 12 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, se refiere, específicamente, a los reglamentos de seguridad, los cuales deberán establecer los requisitos de seguridad de las instalaciones, los procedimientos de conformidad con las mismas, las responsabilidades de los titulares y las condiciones de equipamiento, medios y capacidad técnica que deben reunir los agentes intervinientes en las distintas fases en relación con las instalaciones, así como la posibilidad de su control mediante inspecciones periódicas.

De acuerdo con el apartado 5 del citado artículo 12, los reglamentos de seguridad de ámbito estatal se aprobarán por el Gobierno de la Nación, sin perjuicio de que las comunidades autónomas puedan introducir requisitos adicionales sobre las mismas materias, cuando se trate de instalaciones radicadas en su territorio.

En su artículo 15, la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, define las características y requisitos que deben reunir los organismos de control, como entidades encargadas de llevar a cabo las inspecciones reglamentarias.

Además, en su título V, esa misma norma recoge el régimen de infracciones y sanciones en materia de industria y, en particular, sobre cuestiones relacionadas con la seguridad de las instalaciones.

De acuerdo con este marco legal, mediante el real decreto mencionado previamente al principio de la sección se aprueba un conjunto normativo que, en línea con otros vigentes en materia de seguridad industrial, adopta la forma de un reglamento que contiene las disposiciones técnicas y administrativas generales, así como unas instrucciones técnicas complementarias (denominadas ITC-LAT) que desarrollan y concretan las previsiones del primero para materias específicas.

Se declaran de obligado cumplimiento una serie de normas relativas, especialmente, al diseño de materiales y equipos. Dado que dichas normas proceden en su mayor parte de las normas europeas EN e internacionales IEC, se consigue rápidamente disponer de soluciones técnicas en sintonía con lo aplicado en los países más avanzados y que reflejan un alto grado de consenso en el sector.

Se presupondrá la conformidad de los equipos y materiales con las normas y especificaciones técnicas aplicables cuando éstos dispongan de marcas o certificados de conformidad emitidos por un organismo cualificado, independiente y acreditado para tal fin, según los procedimientos establecidos en el Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial.

Las empresas de transporte y distribución de energía eléctrica se responsabilizarán de la ejecución, mantenimiento y verificación de las líneas de su propiedad.

Para la ejecución de las líneas eléctricas de alta tensión que no sean propiedad de empresas de transporte y distribución de energía eléctrica, se introducen las figuras de instalador y empresa instaladora autorizada, que hasta la aparición de este decreto no habían sido reguladas, estableciendo 2 categorías, según se pretenda ejecutar líneas aéreas y subterráneas con tensión nominal hasta 30 kV o de más de 30 kV. Se exige que el titular contrate el mantenimiento de la línea, a fin de garantizar el debido estado de conservación y funcionamiento de la misma. Complementariamente, se prevé la inspección periódica de las instalaciones, cada tres años, como mínimo, por organismos de control.

Finalmente, se encarga al centro directivo competente en materia de seguridad industrial del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, la elaboración de una guía, como ayuda a los distintos agentes afectados, para la mejor comprensión de las prescripciones reglamentarias.

El real decreto constituye una norma reglamentaria sobre seguridad industrial en instalaciones energéticas que, de acuerdo con lo establecido en la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, y Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, se dicta al amparo de lo dispuesto en las reglas 13.^a y 25.^a del artículo 149.1 de la Constitución Española, que atribuyen al Estado las competencias exclusivas sobre bases y coordinación de la planificación general de la actividad económica y sobre bases del régimen minero y energético, respectivamente.

Por último, en el real decreto se hace referencia en la sección de accidentes que para efectos estadísticos y con objeto de determinar las posibles causas, como para disponer las eventuales correcciones en la reglamentación, se debe poseer de los datos sistematizados de los accidentes más significativos. Para ello, cuando se produzca un accidente o una anomalía en el funcionamiento, imputable a la línea, que ocasione víctimas, daños a terceros o situaciones objetivas de riesgo potencial, el propietario de la línea deberá redactar un informe que recoja los aspectos esenciales del mismo. En un tiempo no superior a tres meses, deberán remitir a los órganos competentes del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y de las comunidades autónomas, copia de todos los informes realizados.

En resumen, el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión tiene por objeto lo siguiente:

- Proteger a las personas y la integridad y funcionalidad de los bienes que pueden resultar afectados por las mismas.
- Regularización del suministro de energía eléctrica.
- Normalización del material eléctrico.
- Facilitar en los proyectos el posible aumento de cargas en el futuro.
- Se considerará que las instalaciones realizadas de conformidad con las prescripciones mencionadas proporcionan las condiciones de seguridad

El reglamento se aplica en líneas eléctricas de alta tensión a 50 Hz de frecuencia. Aquellas líneas en las que se prevea utilizar otros sistemas de transporte, como corriente continua, deberán ser objeto de una justificación especial por parte del proyectista, el cual deberá adaptar las prescripciones y principios básicos de este reglamento a las peculiaridades del sistema propuesto.

10.1. COMPARACION DE LA NORMATIVA IEEE Y CIGRE

En las líneas de alta tensión, los estándares del comportamiento térmico y el método para realizar las correctas medidas sobre las mismas se basan en las normas IEEE y CIGRE (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y en francés Conseil International des Grands Reseaux Electriques, CIGRE), siendo estas ligeramente diferentes, por lo que se puntualizarán sus discrepancias.

En ambas normativas se tiene en cuenta que se pueden realizar los estudios de forma estática o dinámica, dependiendo de cómo se considere la temperatura a lo largo del tiempo, y en ambos se han formulado los algoritmos de cálculo a partir de balances térmicos. Las principales similitudes y diferencias que se pueden encontrar entre ambos métodos son los siguientes:

- Ambos métodos consideran las condiciones meteorológicas, incluyendo la velocidad del viento y su dirección, la temperatura ambiente y la radiación solar, pero usan diferentes enfoques para realizar el balance térmico.
- El calor proveniente del sol es calculado considerando su posición dependiendo de la hora y del día del año en el caso de la norma IEEE. Por otra parte, el algoritmo de CIGRE es más complejo, incluyendo la dirección y radiación difusa y reflejada.

- En la normativa CIGRE, el enfriamiento por convección se ha enfocado a partir de la utilización de las correlaciones de Morgan, las cuales se basan a su vez en el número de Nusselt. Por otro lado, IEEE utiliza las correlaciones McAdams las cuales se basan en el número de Reynolds.

Están diferencias en los algoritmos de cálculo de la temperatura son sobre todo apreciables en los casos en los que la influencia de la radiación es apreciable, es decir, durante el día. Estas diferencias se deben por tanto a la forma de calcular el calor proveniente de la radiación solar, por lo que los cálculos a partir de los algoritmos de CIGRE son ligeramente más altos. Además, en ambos casos existe una sobreestimación de la temperatura en el caso de que no exista radiación.

Con todo, los datos obtenidos a partir de los algoritmos en cualquiera de los dos casos son estimaciones correctas. [4]

11. BIBLIOGRAFÍA

11.1. ARTÍCULOS

- [1] Proyecto Dynelec "Calibrado dinámico de líneas para la integración de energías renovables" → Industriambiente, septiembre 2013
- [2] Pytlak, P., Musilek, P., Lozowski, E.; Precipitation-based conductor cooling model for dynamic thermal rating systems. IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2009. DOI: 10.1109/EPEC.2009.5420710
- [3] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature relationship of bare overhead conductors (Revision of IEEE Std 738-2006/ Incorporates IEEE Std 738-2012/Cor 1-2013, Octubre 2012)
- [4] Arroyo, A., Castro, P., Martinez, R., Manana, M., Madrazo, A., Lecuna, R., & Gonzalez, A. (2015). Comparison between

IEEE and CIGRE thermal behaviour standards and measured temperature on a 132-kV overhead power line. *Energies*, 8(12), 13660-13671.

- [5] Iglesias, J., Watt, G., Douglass, D., Morgan, V., Stephen, R., Bertinat, M., & Bakic, K. *Guide for thermal rating calculations of overhead lines*. (Cigré diciembre 2014)
- [6] Villamizar, N. *Avances tecnológicos desde la revolución industrial*. San Cristobal 2015
- [7] Descripción de redes inteligentes (Smart Grids) y su aplicación en los sistemas de distribución eléctrica (Marco Vinicio Herrera García, Enero 2013)
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5542>
- [8] Elsitdié, C., Gerardo, L., & Carrillo Sánchez, J. M. (2011). Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional.
- [9] Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311.
- [10] Suárez, C. G., Otero, A. F., & Lorenzo, A. F. Comparación de métodos de cálculo de la ampacidad en conductores aéreos tipo ACSR.

11.2. **SITIOS WEB**

- [11] Artículo " Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía la tecnología y la política climática" https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_es.pdf
- [12] www.greenpeace.org Evolución del cambio climático y las energías renovables en España y en el mundo.

- [13] www.aeeolica.org Asociación Eólica Española
- [14] <http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-1432-Breve-historia-electricidad> Revista técnica industrial, Octubre 2004
- [15] Propiedades de conductores de aluminio
http://www.trefilcable.com/?section=Energ%EDa&page=Energia_producos_conductores_aluminio&idpage=4249&idcontent=4201&lang=es
- [16] <https://ecosectores.com> y <http://www.energias-renovables.com/> (Proyecto Dynelec)

11.3. LIBROS Y MANUALES

- [17] Inteligencia de la red eléctrica, Mario Hernández, Universidad de las palmas de gran canaria
- [18] Smart Grids y la evolución de la red eléctrica, Observatorio industrial del sector de la electrónica, tecnologías de la información y telecomunicaciones, (Mayo 2010)
- [19] Las nuevas redes inteligentes y la operación del sistema, Red eléctrica de España, Alberto Carbajo Josa
- [20] Smart grids redes eléctricas inteligentes, Energía y sociedad, España, Marzo 2010
- [21] ANSYS Fluent Theory Guide release (2013)
- [22] ANSYS Fluent 14.0: Users Guide
- [23] ANSYS System Coupling User's guide
- [24] ANSYS Meshing user's guide
- [25] Bartrons Casademont, J. Estudio hidrodinámico por CFD del casco de una lancha motora. Facultad de náutica de Barcelona. Junio 2014.

- [26] ANSYS global mesh control 14.5 release

11.4.NORMATIVA

- [27] IEEE Std 738-2012: IEEE Standard for Calculation the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors; IEEE Standard Association: Washington, U.S.A. 23 December 2013.
- [28] International Council on Large Electric Systems, CIGRE. Guide for Thermal Rating Calculation of Overhead Lines; Technical Brochure 601; CIGRE: Paris, France, December 2014.
- [29] Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, y sus instrucciones técnicas complementarias ITCLAT 01 a 09.

ANEXOS

12. ANEXO I

COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN DE MEDICIÓN

- 1 conductor LARL 455 (Condor): Se trata de un cable aéreo desnudo formado por 54 cables de aluminio y 7 cables de acero, dispuestos como se puede ver en la figura.

Modificando el diámetro de los hilos, la relación de los hilos en el caso de los cables de aluminio-acero como este y el número de capa, se obtiene toda una variedad de diseños que permiten responder a los requisitos de cada línea, tanto a nivel de capacidad de transporte y de los parámetros eléctricos asociados, como en lo referido a las características mecánicas impuestas por el trazado.

- 2 bobinados toroidales, cada una de ellas está formado por un hilo conductor por el que circula corriente, el cual es enrollado alrededor de un soporte toroidal, y generando un transformador toroidal cuya relación de tensiones y corrientes viene dada por el número de vueltas de dicho hilo conductor (N2) siendo el valor de espiras del primario siempre igual a la unidad (El cable a estudiar en este caso).

- 1 variador.

- 1 pirómetro laser para la medida de temperatura por infrarrojos: El funcionamiento de este tipo de termómetros se basa en la radiación infrarroja. En base a este principio, el termómetro lo que mide es la energía que posee la radiación del cuerpo a medir (todo cuerpo por encima de 0°K emitirá una energía en forma de radiación) y posteriormente mediante un empleo de circuitos electrónicos de adaptación de señales se obtiene la medición su temperatura. La cadena de medición está formada por la señal de radio frecuencia o laser, el sistema de lentes, filtros y el medidor de radiación.

- 1 datalogger Campbell CR800: El CR800 es un pequeño registrador de datos, diseñado para operaciones autónomas en entornos duros y remotos. Está diseñado para instalaciones más bien pequeñas donde no se usa un número de sensores muy elevado. Cada CR800 lee la entrada de los sensores, luego transmite los datos a través de un periférico de comunicación. La mayoría de los sensores y dispositivos de telecomunicación son compatibles. Se pueden configurar varios dispositivos CR800 como una red o bien se pueden utilizar de forma individual. Este medidor puede tomar datos cuando el cable se encuentra a temperaturas de entre -25 y 85°C, y realiza medidas con un rango de error del 0.06%, por lo que se trata de un sistema muy preciso.

Imagen obtenida de la página <https://www.campbellsci.es/lp02>



Figura 36. Datalogger CR800

- 1 esfera de aluminio anodizado adosada al cable: Es una esfera también utilizada para la medición de la temperatura del cable, a parte de las mediciones que se realizan gracias a los sensores pt100. Por su geometría y disposición, hay que tener en cuenta los cambios que genera en el cable (mas convección en la zona al haber más superficie de contacto, aunque sea mínimo).



Figura 37. Esfera de aluminio anodizado

- 2 sondas de temperatura pt100: Un Pt100 es un sensor de temperatura. Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. Se trata por tanto de un tipo particular de RTD (Dispositivo Termo Resistivo)

Obra colocada bajo licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.5 License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/)



Figura 38. Sondas de tipo pt100

- 1 transformador para medida de corriente.
- 1 datalogger Setelsa: Se trata de otro registrador de datos, independiente del CR800, a partir de este registrador obtendremos los valores de la lluvia en la estación, el resto de medidas (temperatura del cable, intensidad y dirección del viento, humedad...) se tomarán del otro dispositivo CR800, ya que toma medidas más exactas, para el estudio teniendo en cuenta las dos bases de información, la recogida en Setelsa lleva unos 9 minutos de adelanto con respecto a la Campbell
- 1 Equipo informático.
- 1 sensor de temperatura y humedad ambiental

- 1 anemoveleta ultrasónica windsonic: es un anemómetro ultrasónico de dos dimensiones que mide la velocidad y dirección del viento. Es una alternativa a los anemómetros y veletas convencionales con partes móviles y mecánicas.

Este sensor transmite los datos por RS232, que directamente pueden leer nuestros dataloggers Campbell Scientific modelos CR300, CR800, CR850, CR1000 y CR3000. (En este caso y como ya se ha especificado es un datalogger tipo CR800).

Esta clase de medidores, son de bajo mantenimiento al no tener partes móviles que son las más críticas, además, permite detectar velocidades de viento mucho menores (de unos 0.01m/s) a las detectadas por los medidores convencionales.

Obra colocada bajo licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.5 License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/)



Figura 39. Anemoveleta ultrasónica

- 1 sensor meteorológico todo en uno (anemoveleta ultrasónica, piranómetro, temperatura, humedad, pluviómetro de scattering).

- 2 piranómetros: Cada uno de ellos es un instrumento para medir la radiación solar a una superficie plana, en otras palabras, es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en un cuerpo de 180°.

La termopila, formada por sectores blancos y negros, es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre los 300 y los 50000nm. y tiene una respuesta casi perfecta al coseno del ángulo de incidencia.

La cúpula de cristal limita la respuesta al rango de 300 a 2800nm. preservando un campo de visión de 180 grados, además de proteger la termopila de la convección. Las bandas negras del sensor (termopila) absorben la radiación solar que se transforma en calor. Este calor fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, proporcionando una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente.

Obra colocada bajo licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.5 License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/)



Figura 40. Imagen de un piranómetro

13. ANEXO II

BALANCE RADIATIVO TERRESTRE

Para poder conocer cuál es el valor de la radiación solar que realmente llega a la superficie terrestre y por otro lado la que esta misma superficie refleja de nuevo a la atmósfera se han realizado una serie de estudios y medidas que se reflejan en este anexo. [9]

Primeramente, hay que conocer qué es y cuál es el valor de la constante solar. Se trata de la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie. Este valor puede ser medido por satélites y es de aproximadamente 1368 W/m².

Aunque esta radiación no es constante, sino que sufre fluctuaciones a lo largo del año debido a los distintos ciclos de actividad solares, se tomara el valor anterior como constante para poder proseguir con el estudio.

Tomando como dato de partida los 1360 W/m² que ha emitido la superficie solar, se considerarán una serie de pérdidas que provocan que la radiación real que incide en la superficie será mucho menor.

Por una parte, hay que tener en cuenta el hecho de que no toda la superficie terrestre puede interceptar la energía procedente del sol, solamente hay que contabilizar el hemisferio terrestre de cara al sol. Después, hay que tener en cuenta los mecanismos de absorción, reflexión y dispersión difusa de la atmósfera.

- Teniendo en cuenta que la Tierra no es un disco plano, sino que es una esfera, y como ya se ha mencionado previamente, no toda la superficie terrestre recibe esta radiación solar a la vez, pero sí emite radiación toda la superficie terrestre. Además, debido a esta esfericidad, los rayos inciden con diferentes inclinaciones lo que varía la cantidad de energía que será reflejada de nuevo a la atmósfera por la superficie. Por todos estos factores, se ha calculado (y medido

como posteriormente se puntualiza) que la radiación incidente es de aproximadamente 342 W/m^2 .

- Con respecto a los mecanismos naturales mencionados, se ha medido el impacto de los mismos. Aproximadamente el 23% de la energía entrante es reflejada (unos 77 W/m^2) de nuevo hacia el espacio debido al efecto de las nubes, polvo en suspensión, aerosoles etc.

Un 19.5% de la energía restante es absorbido por la atmósfera (unos 67 W/m^2), ya sea por el vapor de agua, el ozono o el polvo.

Por lo tanto, obtenemos un valor de 198 W/m^2 que llegan a la superficie terrestre, de los cuales casi el 85% es absorbido y el resto es de nuevo reflejado a la atmósfera y posteriormente al espacio por la superficie terrestre.

Obra colocada bajo licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.5 License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/)

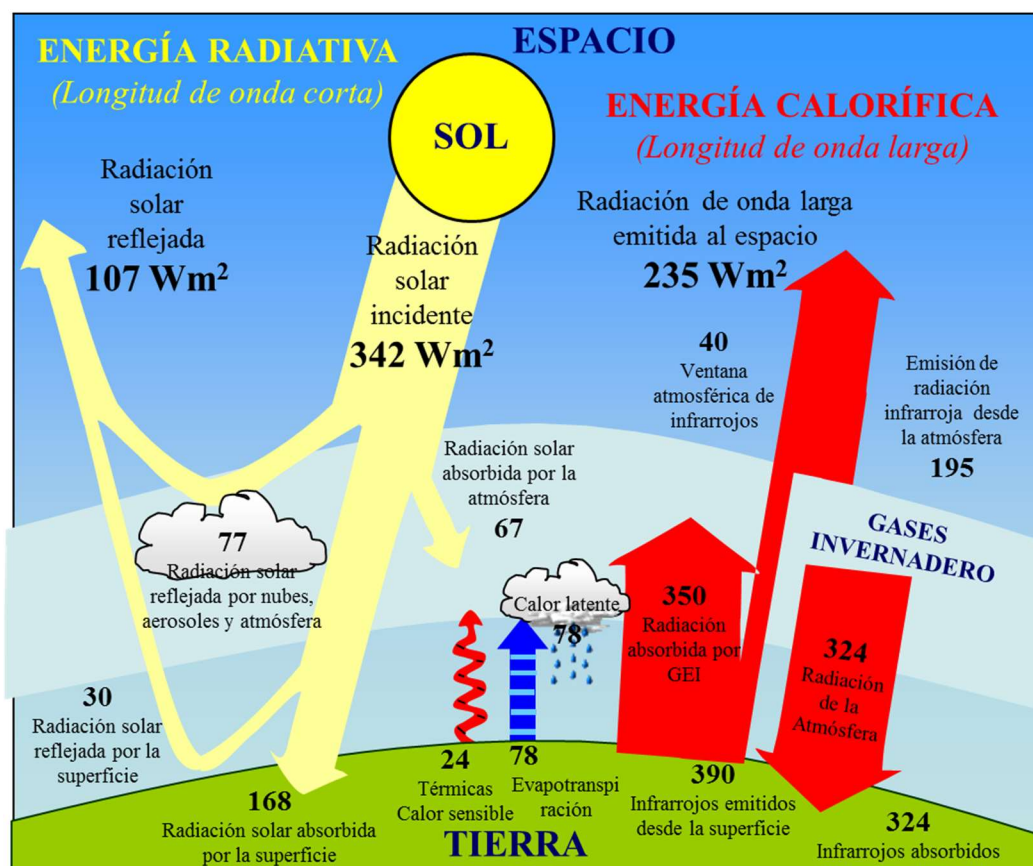


Figura 41. Balance radiativo terrestre

Como se puede ver en la figura, además de estos valores, tenemos la radiación proveniente de la propia superficie terrestre (además de la energía solar que se refleja). Este valor no será tenido en cuenta para este estudio.

En las siguientes tablas se pueden ver una serie de medidas realizadas para comprobar que estos datos son correctos. Estos datos se han tomado de distintas fuentes como son ISCCP-FD, NRA, ERA-40. [9]

El albedo no es otra cosa que la reflexión de la radiación solar, que procede tanto de las nubes como de la difusión atmosférica y de la superficie terrestre.

Todas las tablas se encuentran en unidades de W/m², o porcentajes (viene concretado en tal caso). Existen dos medidas, unas realizadas desde la superficie y otras realizadas desde el océano, como son ligeramente diferentes se determina la radiación solar haciendo un promedio, teniendo en cuenta el volumen que ocupan ambos espacios.

Los datos correspondientes a estas tablas se tomaron en el periodo de febrero de 1985 a abril de 1989.

Global	Radiación entrante	Radiación reflejada	Albedo (%)
ISCCP-FD	341.8	105.9	31.0
NRA	341.9	115.6	33.8
ERA-40	342.5	106.0	31.0
Superficie (tierra)			
SCCP-FD	330.9	113.8	34.4
NRA	330.7	116.4	35.2
ERA-40	330.3	110.0	33.3
Océano			
SCCP-FD	345.9	102.9	29.7
NRA	346.0	115.4	33.3
ERA-40	346.9	104.6	30.2

Tabla 15. Medida de la radiación solar total, que llega a la atmósfera.

Además de estas mediciones, se han tomado otras de la radiación que realmente alcanza la superficie terrestre, cuanta es absorbida y cuanta es reflejada.

Estas mediciones volvieron a realizarse en periodos posteriores y se han mantenido prácticamente iguales por lo que se basará la simulación del estudio en los valores previamente detallados, tomando como radiación que llega al cable de 168 W/m² y la reflejada por el suelo, también incidente en el cable de 30 W/m².

Global	Radiación solar total	Radiación absorbida	Radiación reflejada
ISCCP-FD	164.9	70.9	24.0
NRA	161.9	64.4	45.2
ERA-40	155.8	80.7	23.1
Superficie (tierra)			
ISCCP-FD	147.2	69.9	42.9
NRA	155.2	59.1	68.9
ERA-40	134.3	86.0	42.9
Océano			
ISCCP-FD	171.5	71.4	17.0
NRA	164.3	66.3	36.7
ERA-40	163.5	76.0	15.9

Tabla 16. Radiación total que llega a la superficie terrestre

14. ANEXO III

DATOS UTILIZADOS PARA LA BASE DE LA SIMULACION

➔ Datos utilizados para el caso de la simulación de la humedad

fecha	PT100_cu	PT100_ce	corriente	humedad	vel_ultra	T. ambiente
5-11-16 7:31	20,89	20,81	546,2	94,1	1,328333	13,89
5-11-16 7:32	20,8	20,72	547,7	94,2	1,246667	13,87
5-11-16 7:33	20,82	20,71	548,2	94,2	1,090833	13,85
5-11-16 7:34	20,96	20,88	547,3	94,3	1,06	13,83
5-11-16 7:35	20,86	20,78	546,8	94,4	1,758333	13,82
5-11-16 7:36	20,43	20,31	547,1	94,5	1,7175	13,83
5-11-16 7:37	19,92	19,76	547,4	94,6	3,241667	13,81
5-11-16 7:38	19,32	19,13	546,3	94,3	3,5475	13,82
5-11-16 7:39	18,92	18,56	546,2	94	3,520833	13,8
5-11-16 7:40	18,76	18,42	546,5	94,1	2,568333	13,78
5-11-16 7:41	18,62	18,28	548,8	94	3,386667	13,75
5-11-16 7:42	18,43	18,07	548,9	94	2,350833	13,68
5-11-16 7:43	18,53	18,23	547,2	94,1	1,428333	13,66
5-11-16 7:44	18,65	18,42	546,4	93,9	2,1825	13,65
PROMEDIOS	19,68833333		547,1	94,18	2,09855547	13,7946667
Razón humedad	0,0115					

Tabla 17. Caso real 1 para la simulación de la humedad

fecha	PT100_cu	PT100_ce	corriente	humedad	vel_ultra	T. ambiente
15-6-16 11:14	54,9	46,09	680,9	58,72	1,930833	18,84
15-6-16 11:13	54,85	45,77	681,5	59,6	2,57	18,66
15-6-16 11:12	54,95	45,87	683	58,35	2,576667	18,62
15-6-16 11:11	55,49	46,37	682,7	58,11	2,7175	18,69
15-6-16 11:10	56,12	46,96	681,6	57,96	2,484166	18,75
15-6-16 11:09	56,28	47,26	680,8	55,46	2,113333	18,87
15-6-16 11:08	56,96	48,26	681,2	54,65	2,629167	19,24
15-6-16 11:07	57,11	48,44	680,5	57,7	1,640833	19,31
15-6-16 11:06	56,74	48,1	680,1	57,69	1,664167	19,22
15-6-16 11:05	56,24	47,78	679,4	56,01	1,5225	19,12
15-6-16 11:04	56,15	48	677,9	56,9	2,095	19,31
15-6-16 11:03	55,85	47,64	676,3	56,41	1,55	19,3
15-6-16 11:02	55,91	47,49	677,5	57,04	1,656667	19,24
15-6-16 11:01	55,79	47,22	678	58,24	1,771667	19
15-6-16 11:00	55,65	47,13	680,5	57,05	1,885833	18,89
PROMEDIOS	51,551875		680,35625	57,42875	2,00317706	19,006875
Razón humedad	0,0092					

Tabla 18. Caso real 2 para la simulación de la humedad

fecha	PT100_cu	PT100_ce	corriente	humedad	vel_ultra	T. ambiente
15-6-16 9:45	45,25	41,84	678,6	68,26	0,7766667	17,83
15-6-16 9:44	45,13	41,9	676,6	68,96	1,600833	17,9
15-6-16 9:43	45,63	42,25	676,8	67,76	1,515	17,91
15-6-16 9:42	45,63	42,19	676	68,72	1,165	17,9
15-6-16 9:41	44,96	41,54	676,7	70,3	0,9066667	17,77
15-6-16 9:40	43,68	40,65	677,2	71,52	1,071667	17,77
15-6-16 9:39	42,86	39,81	677,3	72,73	0,9691667	17,7
15-6-16 9:38	42,25	39,21	677	74,08	0,9458334	17,62
15-6-16 9:37	41,7	38,86	677,4	73,53	1,151667	17,53
15-6-16 9:36	40,7	38,22	679,5	75,14	1,083333	17,48
15-6-16 9:35	38,76	36,49	680,3	76,92	0,5058333	17,27
15-6-16 9:34	36,3	34,24	681,9	76,13	0,6541667	17,07
15-6-16 9:33	34,61	32,75	683,5	75,54	1,481667	17,05
15-6-16 9:32	33,24	31,62	684	75,27	1,590833	17,07
15-6-16 9:31	31,81	30,37	686,9	75,5	1,6975	17,12
15-6-16 9:30	29,74	28,44	688,9	75,48	1,020833	17,05
PROMEDIOS	38,8321875		679,9125	72,865	1,13354166	17,5025
Razón humedad	0,011					

Tabla 19. Caso real 3 para la simulación de la humedad

➔ Datos utilizados para el caso de la simulación de la lluvia

fecha	corriente	Tª exterior	humedad	viento (m/s)	direccion (º)	lluvia (mm)	temperatura cable (C)
5-11-16 9:48	543,2	12,54	87,7	3,5	230,313	0,2	18,55
5-11-16 9:49	543,9	12,54	87,7	3,0675	248,2421	0	18,67
5-11-16 9:50	544	12,51	87,5	3,024167	247,1163	0,2	18,74
5-11-16 9:51	543,5	12,48	87	4,571667	261,5781	0	18,865
5-11-16 9:52	542,8	12,5	86,5	3,001666	230,0603	0,2	18,87
5-11-16 9:53	542,3	12,53	86,7	2,960833	253,5324	0,2	19,055
5-11-16 9:54	542,1	12,5	86,7	3,9375	254,5992	0,2	19,2
5-11-16 9:55	541,6	12,48	86,4	3,865	246,1227	0,2	19,145
5-11-16 9:56	542	12,43	85,7	3,74	261,7894	0,2	19,05
5-11-16 9:57	542	12,4	84,9	3,0575	245,0371	0,4	19,055
5-11-16 9:58	539,6	12,41	84,7	4,3375	250,5207	0,4	19,155
5-11-16 9:59	540,8	12,42	84,7	4,144166	251,8979	0,2	19,16

Tabla 20. Caso real 1 para la simulación de la lluvia

fecha	corriente	Tª exterior	humedad	viento (m/s)	direccion (º)	lluvia (mm)	temperatura cable (C)
5-11-16 13:09	544,5	11,43	92,6	4,198333	237,8408	0,2	17,105
5-11-16 13:10	544	11,44	92,7	3,235	231,5099	0,2	17,2
5-11-16 13:11	543,5	11,43	92,6	6,349167	238,8297	0,2	17,235
5-11-16 13:12	545,4	11,44	92,4	6,495834	240,5787	0,2	16,97
5-11-16 13:13	544,7	11,49	92,3	5,690833	234,3726	0,2	16,725
5-11-16 13:14	546,1	11,51	92,2	5,8275	231,4008	0,2	16,705
5-11-16 13:15	547	11,52	92,2	5,971666	242,6688	0,2	16,72
5-11-16 13:16	546,6	11,52	92,2	5,644167	245,5217	0,2	16,745
5-11-16 13:17	546,7	11,53	92,4	4,05	243,023	0,2	16,855
5-11-16 13:18	546,4	11,53	92,5	5,645	242,504	0,4	17,09
5-11-16 13:19	546,4	11,51	92,4	5,080834	243,1123	0,2	17,195
5-11-16 13:20	544,8	11,5	92,4	5,570833	240,2203	0,2	17,125
5-11-16 13:21	545,5	11,49	92,7	2,99	239,4942	0,2	17,01

Tabla 21. Caso real 2 para la simulación de la lluvia