

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de un prototipo y validación de método de medida sin contacto de parámetros característicos de líneas eléctricas.

Development of a prototype and validation of a non-contact measurement method of characteristic parameters of power lines.

Directores:

Autor:

Ramón LECUNA TOLOSA

Dr. Mario MAÑANA CANTELI

Dr. Pablo CASTRO ALONSO

Esta tesis cumple con los requisitos para conseguir el grado de Doctor en Ingeniería Industrial: Tecnologías de Diseño y Producción Industrial.

en la Escuela de Doctorado de la Universidad de Cantabria

Grupo de Tecnologías Electroenergéticas Avanzadas

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

12 de octubre de 2017



Declaración de autoría

D. Mario Mañana Canteli y D. Pablo Castro Alonso declaran que esta tesis titulada «Desarrollo de un prototipo y validación de método de medida sin contacto de parámetros característicos de líneas eléctricas.» presentada por D. Ramón LECUNA TOLOSA para optar al grado de Doctor, ha sido realizada bajo nuestra dirección. Consideramos que dicho trabajo se encuentra terminado y reúne los requisitos para su presentación como Memoria de Doctorado al objeto de poder optar al Grado de Doctor por la Universidad de Cantabria.

Y para que conste y surta los efectos oportunos, firmamos la presente declaración en Santander.

Fecha: 12 de octubre de 2017.

Firmado:

Dr. Mario MAÑANA CANTELI

Dr. Pablo CASTRO ALONSO

«Todo lleva su tiempo...nueve mujeres no pueden hacer un niño en un mes...»

Anónimo.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Resumen

ETS de Ingenieros Industriales y Telecomunicación

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Doctor en Ingeniería Industrial: Tecnologías de Diseño y Producción Industrial.

Desarrollo de un prototipo y validación de método de medida sin contacto de parámetros característicos de líneas eléctricas.

Por Ramón LECUNA TOLOSA

La capacidad de evacuación de una línea eléctrica depende de sus parámetros característicos tanto de explotación como ambientales y por tanto es crucial su conocimiento de cara a una gestión eficiente de la misma. Para conseguir esto se utilizan distintos métodos de medida que prevén en cada instante la intensidad máxima admisible (ampacidad) en una línea.

En esta tesis se presenta un prototipo de línea eléctrica donde se estudian los efectos de los parámetros característicos que afectan a la gestión dinámica de la misma.

Se ha utilizado un modelo numérico para el diseño de este prototipo y ha sido validado por un modelo analítico del estado del conductor basado en el estándar CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems) y que ha sido contrastado con datos en campo.

Además, se valida un método de medida de temperatura directo y sin contacto objeto de patente con la referencia ES 2 542 043 A1 por el grupo de investigación en Tecnologías Electro-energéticas Avanzadas (GTEA). Dicho método minimiza los riesgos por la presencia de alta tensión en las partes activas de las líneas y facilita las operaciones de mantenimiento de las instalaciones en explotación.

En último lugar, apoyado en la metodología expresada en la patente ES 2 569 431 B1 se concluye que se podría llegar a obtener el margen de ampacidad de los conductores directamente a través de este innovador sistema de medida directa sin contacto.

Agradecimientos

Estas líneas desean expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de uno u otro modo han contribuido a que esta tesis sea una realidad.

Lo primero es el equipo....

Hay un equipo en la planta «menos dos» de la Escuela Politécnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones de Santander, engrasado a la perfección y que ha sido mi equipo desde el momento que aparecí y que es capaz de ganar cualquier partido, mucho os debo, y desde lo que me toca, todo os lo agradezco...

Agradecimiento sumo a Isabel Carriles Ripoll, secretaria del Departamento, por su paciencia...muchacha, ha sido mucha paciencia...y gracias...muchas gracias le doy.

Gracias a mis directores, Pablo Castro Alonso y Mario Mañana Canteli por la operación de rescate, sin cuya ayuda hubiera sido imposible haber retomado este camino hasta llevarlo a buen fin. Nunca hubiera sido posible esto sin vosotros.

El único secreto que tiene haber llegado a destino es, constancia, trabajo y fé en el futuro.

Hay una cita que dice que...“Dale tiempo, nueve mujeres no pueden hacer un niño en un mes”, es importante e imprescindible controlar y asumir los tiempos.

Gracias a todos aquellos que, desde mi olvido, no han sido citados expresamente, pero han colaborado a llevar a buen puerto esta tesis. Ellos saben quiénes son.

No quisiera acabar esta lista de agradecimientos sin recordar a los que ya no están aquí conmigo, mis padres y mi hermano, los llevo grabados a fuego en mi mente, y sin duda para mi han sido un excelente ejemplo de vida....

Índice general

Declaración de autoría	III
Resumen	VII
Agradecimientos	IX
Índice general	XI
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XVII
Lista de símbolos	XIX
1. Introducción de la tesis	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo de la tesis	4
1.3. Estructura de la tesis	6
2. Estado del arte	7
2.1. Introducción	7
2.2. Normativa afectada.	10
2.3. Patentes	10
2.3.1. Reglamento Electrotécnico de Líneas Aéreas de Alta Tensión	11
Cumplimiento de las distancias de seguridad	13
2.4. Métodos de medida de temperatura de los conductores en líneas eléctricas	14
2.5. Método de medida de temperatura sin contacto	20
3. Metodología e instrumentación	23
3.1. Metodología	23
3.1.1. Introducción	23
3.1.2. Características del conductor.	24
3.1.3. Análisis térmico de los conductores según el modelo numérico	24
3.1.4. Implementación del prototipo para ensayos	27
Descripción general	27
Localización de las instalaciones	29
Esquema eléctrico del prototipo.	30
Cuadro secundario Gondola (Universidad)	32
Cuadro secundario Gondola (Grupo GTEA)	32
Cuadro secundario AZOTEA	32

3.1.5.	Análisis térmico según el modelo analítico	32
3.2.	Instrumentación.	34
3.2.1.	Introducción.	34
3.2.2.	Composición de la estación metereológica.	35
	Piranómetro para medición de la radiación solar.	35
	Sensor de humedad para medir humedad relativa.	38
	Anemómetro de ultrasonidos para medición de velocidad y dirección del viento.	39
3.2.3.	Composición del equipo de monitorización térmica del conductor.	40
	Captador de intensidad.	40
	Sensor de medida de temperatura con contacto.	41
	Sensor de medida de temperatura sin contacto.	44
	Composición del equipo de monitorización	47
	Composición del sistema inductor de alta intensidad.	49
	Composición de la estructura mecánica.	50
3.2.4.	Verificación de los equipos de medida de temperatura	54
	Equipos de medida de temperatura con contacto	54
	Calibración de la emisividad de la esfera y conductor.	55
4.	Resultados.	63
4.1.	Datos medidos para validar en el prototipo	63
4.1.1.	Procedimiento de la toma de temperaturas por contacto	63
4.2.	Análisis de los datos obtenidos por el prototipo y el modelo analítico	67
4.3.	Datos y procedimiento de toma de muestras mediante el conjunto	73
4.4.	Análisis de los resultados obtenidos por el conjunto sensor IR-esfera	77
4.4.1.	Efecto del estado de carga sobre el comportamiento del conjunto sensor IR-esfera.	79
4.4.2.	Efecto del viento sobre el conjunto sensor IR-esfera	81
4.4.3.	Efecto de la radiación solar sobre el conjunto sensor IR-esfera sonda de contacto.	84
4.4.4.	Efecto de la temperatura ambiente sobre el conjunto sensor IR esfera-sonda de contacto.	86
4.4.5.	Efecto de la temperatura de la esfera sobre el conjunto	88
4.4.6.	Efecto de la inercia térmica de la esfera sobre el conjunto	89
4.5.	Postprocesado de la señal del conjunto sensor IR esfera	91
4.5.1.	Definición de las variables explicativas.	91
	Generación de calor por efecto Joule	92
	Evacuación de calor por convección	92
	Evacuación de calor al exterior por radiación.	96
	Asignación de pesos a las variables explicativas.	97
4.5.2.	Comprobación de los parámetros extrapolando resultados	104
4.5.3.	Comprobación de la desviación de las temperaturas corregidas y el modelo analítico	105
5.	Conclusiones y líneas futuras de investigación	109
5.1.	Conclusiones	109
5.2.	Líneas futuras de investigación	111
5.2.1.	Resultados esperados y posible impacto.	112

Bibliografia

Índice de figuras

2.1. Sistema de medida sin contacto	21
3.1. Características constructivas del conductor monitorizado	24
3.2. Condiciones de contorno del modelo numérico	26
3.3. Distribución de temperaturas en el conductor y la esfera	27
3.4. Campo de velocidades de viento alrededor del conjunto cable y esfera	27
3.5. Disposición del prototipo en el exterior	28
3.6. Localización de las instalaciones	30
3.7. Esquema eléctrico del equipo de ensayo	31
3.8. Algoritmo analítico CIGRÉ para la previsión de temperatura del conductor	34
3.9. Imagen del conjunto de la estación meteorológica	36
3.10. Imagen del piranómetro ubicado en la estación meteorológica	36
3.11. Imagen del sensor de humedad y temperatura exterior ubicado en la estación meteorológica	39
3.12. Imagen de la anemoveleta de ultrasonidos ubicada en la estación meteorológica	40
3.13. Imagen del trafo de intensidad utilizado en el prototipo. (Medidas en mm)	42
3.14. Sensor de medida de contacto (sonda Pt100) utilizado en el prototipo	44
3.15. Ubicación del termómetro infrarrojo	47
3.16. Sensor de Infrarrojos	47
3.17. Autotransformador regulación 0..250V	49
3.18. Acoplamiento de trafos toroidales para generar altas intensidades	51
3.19. Torreta sujección de 1,5m de altura y 0,3m de lado	52
3.20. Composición de los apoyos y sujecciones del prototipo	54
3.21. Muestras donde se observa las zonas que han sido pintadas con Nextel	57
3.22. Medida de la temperatura de radiación de las muestras con el termómetro C300	57
3.23. Lectura de temperatura del cable nuevo	58
3.24. Lecturas de temperatura del cable usado	58
3.25. Temperaturas esfera	59
3.26. Diferencias entre la temperatura de radiación medida en la zona pintada con Nextel y la zona sin pintar	60
4.1. Fijación del sensor de contacto sobre el conductor	64
4.2. Datalogger utilizado para la recopilación de datos	65
4.3. Menú de control del datalogger	66
4.4. Distribución de casos según el offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo	68

4.5. Distribución acumulada del offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo	69
4.6. Distribución de casos según el offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo $I < 300A$	70
4.7. Distribución acumulada del offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo $I < 300A$	70
4.8. Seguimiento del tracking al prototipo	71
4.9. Programa cliente para captación de datos desde el sensor IR	74
4.10. Parametros de configuración del cabezal (sensor IR)	74
4.11. Parámetros de generación de la tabla de datos	75
4.12. Distribución de diferencias de temperatura	77
4.13. Distribución acumulada de diferencias de temperatura	78
4.14. Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la intensidad	79
4.15. Comparativa de distribuciones de casos según estados de carga del conductor	80
4.16. Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto al viento	81
4.17. Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto al viento $I = 680A$	82
4.18. Distribución de casos acumulados en distintos tramos de vientos para una $I = 680A$	83
4.19. Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la radiación solar	84
4.20. Distribución de casos acumulados en distintos tramos de radiación solar sin carga	85
4.21. Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la temperatura ambiente	86
4.22. Distribución de casos acumulados en distintos tramos de temperatura exterior con $680 \pm 5\%$ de carga	87
4.23. Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la temperatura de la esfera	88
4.24. Distribución de casos acumulados en distintos tramos de temperatura de la esfera	89
4.25. Registro de temperaturas del sensor IR y sensor de contacto durante el transcurso de un día	90
4.26. Distribución de error en la medida	101
4.27. Distribución de error acumulado en la medida	102
4.28. Dispersión de T_{sir} , T_{est} y ΔT	103
4.29. Seguimiento de temperaturas del conjunto de medida	103
4.30. Distribución acumulada de desviaciones arrojada por la función de corrección a partir de los datos aportados	105
4.31. Dispersión de T_{sir} , T_{est} y ΔT	106
4.32. Seguimiento de las temperaturas reales por la función de corrección a partir de nuevos registros	107
4.33. Comparación de acumulados entre temperatura T_t , T_c y T_{est}	107

Índice de tablas

2.1. Distancias de seguridad según el reglamento electrotécnico de líneas de media tensión	12
3.1. Principales propiedades del modelo numérico diseñado	26
3.2. Condiciones de contorno medidas directamente en el prototipo	26
3.3. Características técnicas del piranómetro	37
3.4. Sensor analógico de humedad relativa y temperatura modelo PC33 de Mitchell Instruments	38
3.5. Características del anemómetro de ultrasonidos	39
3.6. Tabla de las características de la precisión del trafo según IEC 61869	41
3.7. Características del sensor de contacto	43
3.8. Características del transductor	43
3.9. Características generales del termómetro de infrarrojos	45
3.10. Características eléctricas del termómetro de infrarrojos	46
3.11. Especificaciones de la medida del termómetro de infrarrojos	46
3.12. Características del autotransformador	48
3.13. Características transformador de aislamiento galvánico	49
3.14. Herrajes para líneas aéreas en Alta Tensión	52
3.15. Características de la calibración del simulador de Pt-100	55
3.16. Montaje del termómetro de radiación	56
3.17. Montaje de las resistencias de contacto	56
3.18. Medidas de temperatura de contacto y de radiación	59
3.19. Resultados de emisividad a la que debe ajustarse el TR	60
4.1. Distribución de frecuencias y frecuencias acumuladas	68
4.2. Distribución de frecuencias y frecuencias acumuladas intensidad <300 A	69
4.3. Distribución de diferencias y distribución acumulada entre temperaturas de contacto e infrarrojos ($T_c - T_{sir}$)	78
4.4. Distribuciones de casos ordenadas por intensidades	80
4.5. Relación entre intensidad y ($T_c - T_{sir}$)	81
4.6. Distribuciones de casos ordenados por velocidades de viento para una I=680A	83
4.7. Relación entre velocidades del viento y ($T_c - T_{sir}$)	83
4.8. Distribución de casos clasificados por índices de radiación R_s	85
4.9. Valores de casos acumulados según temperatura ambiente T_a	87
4.10. Valores de casos acumulados según la temperatura de la esfera T_{sir}	89
4.11. Tabla de coeficientes de la función de corrección propuesta	101
4.12. Tabla de valores indicativos para el coeficiente de ajuste	102
4.13. Valores de proporción de casos por desviación de temperaturas	102

4.14. Distribución de frecuencias de $(T_c - T_{sir})$ aplicando función de corrección	. 104
4.15. Valores de proporción de casos acumulados $(T_{est} - T_c)(T_t - T_c)(T_{est} - T_t)$. 106

Lista de símbolos

d	Distancia	m
q	Potencia Termica	W/m
v	Velocidad	m/s
T	Temperatura	K °C
I_{term}	Aceleración térmica	°C/s K/s
m	Masa	k
t	Tiempo	s
I	Intensidad	A
V	Tensión eléctrica	V
P	Potencia eléctrica activa	kW
S	Potencia eléctrica aparente	kV A
R	Resistencia ohmica unitaria	Ω /km
ρ	Densidad	k/m ²
ϕ	Angulo	° rad
ω	velocidad angular	rad s ⁻¹
ϵ	emisividad	
τ	transmisividad	
δ	radiación solar	W/m ²
I_c	Intensidad que atraviesa el conductor.	
R_s	Radiación solar incidente.	
T_t	Temperatura modelo analítico o teórica del conductor.	
T_c	Temperatura medida en el la superficie del conductor.	
T_{esf}	Temperatura medida al lado de la esfera.	
T_{sir}	Temperatura medida por el sensor de infrarrojos	
T_{est}	Temperatura estimada a partir de parámetros ambientales	
T_a	Temperatura ambiental	
$Offset_{T_{tms}-T_{sir}}$	Offset entre T_{tms} y T_{sir}	
$Offset_{T_{tms}-T_c}$	Offset entre T_{tms} y T_c	
I_{term}^{esf}	Inercia térmica de la esfera.	
q_c	Enfriamiento por convección.	
q_r	Enfriamiento por radiación al exterior.	
q_s	Calentamiento por radiación solar.	
q_j	Calentamiento por efecto joule.	
q_m	Calentamiento por efecto magnético.	
U_w	Velocidad del viento.	
F_w	Dirección del viento.	
EqU_w	Velocidad del viento normal al conductor de la probeta	
HR	Humedad relativa en %	
PAC	Parámetros atmosféricos característicos.	

*Dedicado a mi hija, para que no se despierte nunca sin un reto
que alcanzar. . .*

Capítulo 1

Introducción de la tesis

1.1. Introducción

Las redes de distribución de energía eléctrica están afectadas, cada vez en mayor medida, por situaciones que complican la operación de las mismas.

Dentro de los numerosos factores que las influyen se encuentra la liberalización del mercado y la cada vez más incipiente incorporación de instalaciones eléctricas renovables.

Como resultado de estos factores, las congestiones de las líneas van siendo cada vez más comunes lo que produce problemas tanto para la empresa de distribución, que no es capaz de evacuar a través de su red toda la energía generada por lo que disminuye su eficiencia, como para la empresa generadora, ya que le será solicitada la limitación de la producción y, en algunos casos, la parada total de la planta.

Estas situaciones producen una gran ineficiencia del sistema en todos los aspectos, tanto en el energético como en el medioambiental, ya que pudiéndose generar energía de manera más limpia se limita para evitar problemas en las líneas de distribución.

En cantidad de ocasiones desde la gestión de las empresas de distribución se ordena la paradas en parques eólicos por la incapacidad de drenar la energía generada, a pesar de que el recurso eólico esté presente. En muchas ocasiones se pueden observar parques eólicos en parada por la incapacidad de la red de evacuar la energía susceptible de ser generada.

Por lo tanto una solución básica es el aumento de la capacidad de las líneas de transporte y distribución. Este aumento de la capacidad puede realizarse de diversas maneras. La solución más obvia, en una primera aproximación, es la construcción de nuevas líneas eléctricas para reforzar el sistema actual. Sin embargo, esta solución está restringida por los altos costes de construcción de nuevas líneas y las dificultades legales, en cuanto a permisos para la instauración de una nueva línea.

Ante la inviabilidad de la primera propuesta, los operadores de las líneas eléctricas se centran en propuestas basadas en la modificación de las líneas existentes y/o el aumento de la capacidad de las mismas.

El aumento de la capacidad de las líneas eléctricas aéreas es uno de los ámbitos de investigación importantes en la actualidad debido al buen equilibrio existente entre los resultados que se obtienen y el coste económico que conlleva. Existen diferentes técnicas para aumentar la capacidad de las líneas, pasando de las actuaciones clásicas: métodos deterministas o probabilísticos de las condiciones meteorológicas, hasta las innovaciones más actuales en monitorización en tiempo real de los parámetros de la línea: temperatura, flecha, inclinación, tensión, y monitorización de las condiciones climáticas.

Es entonces es cuando aparece el concepto de la ampacidad, que se convierte mas en un objetivo de búsqueda «en busca de la ampacidad» que en un concepto estático.

La noción de ampacidad apareció como resultado de la investigación en el aumento de capacidad de las líneas eléctricas y se define como la cantidad máxima de corriente eléctrica que un conductor puede transmitir de forma continua antes de producirse en este algún tipo de deterioro.

La capacidad de corriente está limitada por varios factores: la estructura y diseño del conductor, las condiciones ambientales que le rodean y las condiciones de funcionamiento de la línea, y se puede utilizar como un valor estático o dinámico.

La ampacidad estática siempre asume las condiciones más restrictivas para el conductor y su entorno, ésta condición es muy conservadora y redundante en unos valores muy poco eficientes para las redes.

Por otro lado, la ampacidad dinámica considera la variabilidad de la red y sus alrededores (temperatura ambiente, la radiación solar, el viento, etc.).

Cuando se habla de la incorporación de las energías renovables a la red, cabe pensar en la buena combinación que tienen las condiciones de refrigeración gracias al recurso (viento), con el exceso de calentamiento de los conductores ante la necesidad de evacuar una cantidad de energía que rebasa el límite estático establecidos exceso de energía en los momentos que hay exceso de recurso.

Así pues, si el enfriamiento en los diferentes procesos térmicos del conductor se miden en tiempo real, se puede medir la corriente instantánea máxima (ampacidad dinámica) sin alcanzar el límite térmico del conductor.

Esta es la razón por la que la ampacidad dinámica es considerada como un parámetro de control más eficiente en la red eléctrica que la Ampacidad estática.

Los parámetros de explotación deben ser medidos o estimados por diferentes métodos (determinista o métodos probabilísticos) para calcular la ampacidad.

CIGRE (Council on Large Electric Systems) e IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) han emitido las normas en las que se reflejan los algoritmos para estimar la ampacidad y la temperatura del conductor (CIGRE: December 2014, Technical Brochure 601 [CIG12b], Guide for Thermal Rating Calculation of overhead lines. IEEE: Std 738-2012 [IEE12], IEEE Standard for Calculation the Current-Temperature relationship of Bare Overhead Conductors [IEE13].)

Todos los algoritmos (CIGRE e IEEE) se basan en el equilibrio térmico entre el calor ganado y perdido en el conductor debido a la carga y las condiciones ambientales.

Gracias a la aplicación de la tecnología de redes inteligentes cada vez es posible una mejor monitorización a tiempo real de los parámetros más característicos de la línea (carga, flecha y temperatura del conductor, radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente). (CIGRE, August 2006, Technical Brochure 299, Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings [CIG06b].)

Esta monitorización a tiempo real, permite un seguimiento más cercano y un control más exhaustivo de los criterios de seguridad en cuanto temperaturas máximas admisibles del conductor y aparata complementaria, así como las flechas máximas en líneas aéreas.

Una vez conseguida una correcta caracterización de la línea en función de las condiciones ambientales y basándose en predicciones meteorológicas fiables a corto plazo es posible indicar al operador de línea unos valores de operación dentro del rango de seguridad con cierta antelación. (CIGRE, June 2012, Technical Brochure 498, Guide for application on direct real-time monitoring systems [CIG12a].)

1.2. Objetivo de la tesis

Uno de los ejes sobre los que gira esta tesis consiste en validar un método de medida de temperatura totalmente innovador, destinado a los conductores eléctricos que conforman las líneas aéreas de alta tensión.

En la actualidad, todos los datos de temperatura disponibles aportados por los distintas estaciones de control, son obtenidos a partir de equipos de medida ubicados físicamente sobre los cables, y que transmiten sus datos de forma radioeléctrica.

Esto hace que el mantenimiento y pilotaje de estos equipos de medida sea difícil, ya que solo se puede llevar a cabo en dos ambientes, uno de estos es obligando a la gestión de descargos en las líneas eléctricas para asegurar la seguridad de los técnicos que los manipulan, siendo la otra posibilidad hacer los mantenimientos realizando trabajos en caliente.

Por esto, hace que cobre importancia la posibilidad de ensayar una sensórica que evite el contacto directo con el conductor para poder medir su temperatura, de forma que se abarate y simplifique su mantenimiento y manipulación.

Por otra parte, se ha diseñado un prototipo donde el control de la carga a la que se somete el conductor se hace de forma minuciosa, siendo este un parámetro, que en estado de explotación es prácticamente imposible de controlar, ya que está supeditado a la demanda de la red en explotación en cada momento.

Derivados de los distintos ensayos llevados a cabo, en esta tesis se aportarán los datos que el equipo de ensayo obtiene y que permiten valorar el comportamiento del conductor en distintos estados de carga y la influencia de los distintos parámetros.

Se presenta por tanto un estudio que justifica la viabilidad del método de medida propuesto para adaptarlo a las condiciones de explotación real.

Para conseguir los objetivos que justifican esta tesis, cronológicamente se han seguido los siguientes pasos:

1. En el inicio, se crea un modelo numérico que representa el estado termico del conductor en un estado normal de explotación y que servirá de ayuda para realizar un correcto diseño del prototipo. Para establecer los parámetros de configuración, el modelo se basa en la experiencia obtenida hasta la fecha con las medidas tomadas en campo.
2. A partir de los datos devueltos por el modelo numérico implementado en Ansys Fluent, se ultiman los detalles constructivos del prototipo que quedará instalado en

el exterior. Éste representa el funcionamiento de un conductor en explotación, que se podrá validar una vez mas comparándolo con datos tomados en campo.

3. En el prototipo llevado a cabo en el exterior, se monitorizan los datos característicos y se comparan con otros obtenidos en campo de forma que se pueda concluir la representatividad del modelo.
4. Llegados a este punto, se ensayará un sistema de medida de temperatura sin contacto y se propondrá una metodología para su empleo en líneas en explotación.

1.3. Estructura de la tesis

Esta tesis quedará estructurada en cinco capítulos.

- **Capítulo I: Introducción.** Recoge la presentación formal del documento; se expone de forma clara y concisa el objetivo fundamental de la tesis, así como el motivo que ha inducido a su búsqueda.
- **Capítulo II: Estado del arte.** Se refiere a la recopilación de la literatura relacionada con el tema tratado; en este caso se trata desde los diferentes tipos de medida que se llevan a cabo en el mundo del control de la ampericidad, hasta la literatura referida a los efectos del ambiente en el comportamiento térmico de los conductores. Constituyen el fundamento para el desarrollo de la tesis puesto que de su revisión se deducen las pautas básicas que soportan la experimentación en este proceso.
- **Capítulo III: Metodología e instrumentación.** Se describe en este apartado la composición de los medios técnicos utilizados para llevar a cabo las medidas que nos llevarán a las deducciones finales. Además, se describe como se lleva a cabo la preparación del modelo, y la disposición de los distintos elementos para su correcto funcionamiento.
- **Capítulo IV: Resultados.** Se aporta en este apartado los distintos resultados obtenidos a partir de los distintos modelos llevados a estudio, que nos facilitarán las conclusiones finales de la tesis.
- **Capítulo V: Conclusiones.** En este capítulo se presenta la lista de conclusiones más relevantes derivadas de las medidas llevadas a cabo en esta tesis, así como aspectos hacia los que debieran encaminarse futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

La gestión dinámica de capacidad en conductores es un tema de investigación que cuenta con una larga tradición en el campo de los sistemas eléctricos de potencia. Una búsqueda del término **ampacity**¹ en la base de datos *Web of Science* en el periodo 1970-2015 devuelve 440 referencias. Del total de referencias, 122 fueron publicadas en el periodo 1970-1999. El resto se han publicado de forma más o menos homogénea en durante los últimos 15 años.

Los resultados anteriores muestran que se trata de una temática que no solo no se considera agotada, sino que está en constante actualidad, si bien debe decirse que no puede considerarse tampoco un *hot topic*.

La búsqueda de una referencia más específica como “**dynamic line rating**” devuelve 49 referencias. En términos generales, el IEEE² figura, como institución, con prácticamente la totalidad de las referencias publicadas.

En 1943 Zucker publica un trabajo sobre el cálculo de la capacidad térmica de conductores basada en nomogramas [Zuc43]. Dicho trabajo proporciona una metodología de dimensionamiento relativamente sencilla de aplicar que presenta como mayor limitación no estar basada en ecuaciones, lo que limita su extensión a otros casos y condiciones de operación diferentes de las consideradas.

Otro de los trabajos pioneros en esta temática desde el punto de vista funcional fue el publicado por Davis en el año 1970 [Dav70], que establece la ecuación básica de equilibrio térmico en el conductor que más adelante será utilizada como referencia por documentos como la norma IEEE 738 [IEE12] o el procedimiento CIGRE TB601 [CIG12b]. A modo

¹Suele asumirse que los términos “ampacity” y “steady-state thermal rating” son equivalentes. Sin embargo, el segundo proporciona menos resultados, debido a que se trata de un término de búsqueda complejo.

²Institute of Electrical and Electronics Engineers.

de curiosidad, en el artículo de Davis se citan trabajos previos en esta temática como el de Schurig publicado en 1930 o el de Enos publicado en 1943³. Desde el punto de vista comparativa de las metodologías de cálculo de capacidad utilizando los procedimientos de IEEE y CIGRE, existen varios trabajos que comparan los resultados obtenidos con ambos métodos. Schmidt [Sch99] compara el método de CIGRE del año 1992 con la norma IEEE 738 del año 1993. Los resultados obtenidos en un caso práctico muestran diferencias en la capacidad calculada inferiores al 0,6%. Desde el punto de vista de las variables meteorológicas la radiación solar muestra las mayores diferencias, con un valor del 13,2%. En el caso de la refrigeración por convección, la diferencia es del 3,9%. Recientemente, el grupo de investigación GTEA de la Universidad de Cantabria ha publicado un trabajo [Arr+15] analizando las diferencias entre CIGRE 2014 e IEEE 2012 en términos de la probabilidad de tener una desviación inferior al 5% en la temperatura de conductor estimada con ambos modelos.

Otros trabajos interesantes publicados por Morgan incluyen el cálculo de la capacidad de conductores sometidos a corrientes de corta duración [Mor71].

En el año 1992 el grupo de trabajo WG22.12 de CIGRE publicó un artículo en la revista ELECTRA [CIG92] que ha sido utilizado desde entonces como norma de facto en el ámbito de CIGRE para el cálculo de la capacidad de conductores aéreos desnudos. El procedimiento WG22.12 tiene como características positivas lo conciso del procedimiento, que proporciona resultados muy similares a otras metodologías que requieren una mayor complejidad operativa. Dicho documento ha sido sustituido en 2014 por el procedimiento TB601 [CIG12b] que desarrolla de forma más extensa la ecuación de balance térmico del conductor, tanto en condiciones estacionarias como no estacionarias. La crítica más importante a este procedimiento tiene que ver con el hecho de que aspectos como la radiación solar se aproximan de forma muy académica, lo que resulta poco práctico desde el punto de vista aplicado.

En el año 2000 Deb publicó un libro dedicado específicamente a esta temática [Deb00]. El interés de esta publicación reside en que aporta una visión integral del problema que incluye tanto aspectos teóricos como prácticos, no solo relativos a los procedimientos de cálculo de capacidad, sino también a otros aspectos complementarios de gran interés, como son los relacionados con la predicción de capacidad.

Desde el punto de vista práctico, es posible plantear una solución intermedia entre un único rate estático y la gestión dinámica de capacidad. Heckenbergerova plantea una comparativa [HMF11] considerando las variantes siguientes:

- Un único límite estático anual.

³No se incluyen las referencias por no haber tenido acceso a los documentos originales.

- Dos límites estacionales de verano e invierno.
- Cuatro límites estaciones considerando las cuatro estaciones del año.
- Ocho límites estacionales considerando las cuatro estaciones del año y diferenciando entre el día y la noche.
- Doce límites estacionales considerando los doce meses del año.
- Veinticuatro límites estacionales considerando los doce meses del año y diferenciando entre el día y la noche.

La metodología planteada por Heckenbergerova es muy interesante porque permite mejorar las capacidades existentes en condiciones de gestión dinámica en la que puedan producirse fallos en las estaciones meteorológicas.

2.2. Normativa afectada.

Existen diferentes normativas y procedimientos armonizados relacionados directamente con el cálculo de capacidad de conductores desnudos en líneas aéreas.

- IEEE 738. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors [IEE12]. Procedimiento de cálculo de la capacidad de conductores aéreos desnudos, tanto en régimen estático como dinámico, publicado por el IEEE.
- CIGRE TB601. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines [CIG12b]. Procedimiento de cálculo de la capacidad de conductores aéreos desnudos, tanto en régimen estático como dinámico, publicado por CIGRE.
- CIGRE TB498. Guide for Application of Direct Real-Time Monitoring Systems [CIG12a]. Guía para la instalación de sistemas de monitorización de líneas en tiempo real orientados hacia la gestión dinámica de capacidad. Publicado por CIGRE.
- CIGRE TB299. Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings [CIG06b]. Guía para la definición de las condiciones ambientales a utilizar en el cálculo de la capacidad estática de un conductor aéreo desnudo.
- REAL DECRETO 223/2008, de 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.

2.3. Patentes

Desde el punto de vista industrial, hay que poner en valor a las distintas patentes que se mencionan en esta tesis y en base a las cuales se ha desarrollado parte de su temática.

- USP 8.965.698. Real-Time Thermal Line Ratings for Overhead Transmission Line. Robert Mohr, Sarantos K. Aivaliotis y Zenon Stelmak de las empresas Tigar, Ridgefield y Monroe. Esta patente, registrada en diciembre de 2010 reivindica el desarrollo de un sistema de cálculo de la capacidad dinámica de líneas basado en dos módulos principales: captura de datos (línea y meteorología) y cálculo de la capacidad.
- PCT/ES2010/070812 System and method for monitoring the ampacity of overhead power lines. Ángel Sainz Maza, Javier Mazón, Igor Albizu Flórez, Elvira Fernández Herrero de la Universidad del País Vasco. Esta patente, registrada en diciembre de 2009 reivindica la utilización de sensores de tracción mecánica para el cálculo de la

capacidad dinámica de un conductor. La idea básica de este sistema es la dependencia de la curva de la catenaria con la temperatura del conductor. La modificación de dicha curva modifica también las fuerzas sobre los puntos de amarre del conductor, cuyos valores axiales pueden ser medidos con células de carga y utilizados para la estimación de la temperatura.

- ES 2 542 043 A1 Método y sistema para la medición directa y sin contacto de la temperatura superficial en un cable. Mario Mañana, Alberto Arroyo, Pablo Castro, Alfredo Madrazo, Cristina Valli, Antonio González, Raquel Martínez, Alberto Laso, Rodrigo Domingo y Alberto Sierra de la Universidad de Cantabria. Esta solicitud de patente, realizada en julio de 2015 reivindica el desarrollo de un sistema de medida de la temperatura en cables aéreos desnudos de tipo ACSR mediante un láser infrarrojo y una masa fijada al conductor que aumenta el tamaño del spot.
- ES 2 569 431 B1 Metodología para el cálculo y predicción de la ampacidad en líneas eléctricas aéreas según la elección de los emplazamientos críticos. Mario Mañana, Alberto Arroyo, Pablo Castro, Ramón Lecuna, Rodrigo Domingo, Alberto Laso y Raquel Martínez de la Universidad de Cantabria y Antonio González, Rafael Mínguez y Ramsés Garrote de Viesgo Distribución S.L. Esta solicitud de patente reivindica el desarrollo de un sistema para el cálculo de la capacidad dinámica de conductores basado en criterios de elección de los emplazamientos críticos.

2.3.1. Reglamento Electrotécnico de Líneas Aéreas de Alta Tensión

En el Boletín Oficial del Estado Español (BOE) se publica con fecha Miércoles 19 de Marzo del 2008 el RD que contiene el nuevo Reglamento para Líneas de Alta Tensión que disposición transitoria primera, es de obligado cumplimiento en todo el estado español, expresándose de la siguiente forma.

“Disposición transitoria primera. Exigibilidad de lo dispuesto en el reglamento y sus instrucciones técnicas complementarias. 1. Lo dispuesto en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión, así como en sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a ITC-LAT 09, será de obligado cumplimiento para todas las instalaciones contempladas en su ámbito de aplicación, a partir de los dos años de la fecha de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado». Hasta entonces seguirá siendo aplicable el Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión, aprobado por Decreto 3151/1968, de 28 de noviembre. 2. No obstante, el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión,

así como en sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a ITC-LAT 09, se podrán aplicar voluntariamente desde la entrada en vigor de este real decreto, a condición de que administrativamente se disponga de los medios para atender las necesidades de los procedimientos.”

La Instrucción Técnica Complementaria ITC-LAT 07 en concreto, se refiere a las Líneas Aéreas con conductores desnudos, de forma que afecta de lleno al tipo de instalaciones a las que se refiere esta tesis en cuanto a la seguridad. En concreto, en su Instrucción Técnica Complementaria (ITC-LAT 07) en su apartado 5.2 donde se habla sobre las distancias de seguridad se definen tres tipos de distancias eléctricas.

D_{el} : Distancia de aislamiento en el aire mínima especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase y objetos a potencial de tierra en sobretensiones de frente lento o rápido. Del puede ser tanto interna, cuando se consideran distancias del conductor a la estructura de la torre, como externas, cuando se considera una distancia del conductor a un obstáculo.

D_{pp} : Distancia de aislamiento en el aire mínima especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido. D_{pp} es una distancia interna.

a_{som} : Valor mínimo de la distancia de descarga de la cadena de aisladores, definida como la distancia más corta en línea recta entre las partes en tensión y las partes puestas a tierra.

Definiendo en particular la D_{el} de la siguiente forma:

La distancia eléctrica, D_{el} , previene descargas eléctricas entre las partes en tensión y objetos a potencial de tierra, en condiciones de explotación normal de la red. Las condiciones normales incluyen operaciones de enganche, aparición de rayos y sobretensiones resultantes de faltas en la red.

TABLA 2.1: Distancias de seguridad según el reglamento electrotécnico de líneas de media tensión

Tensión más elevada de la red U_s (KV)	D_{el} (m)	$D_{pp}(m)$
123	1,00	1,15
145	1,20	1,40
170	1,30	1,50
245	1,70	2,00
420	2,80	3,20

En la tabla 2.1 están indicadas las distancias mínimas de seguridad que deben salvar las partes en tensión y partes directamente conectadas a tierra de una LAT.

Cumplimiento de las distancias de seguridad

Para poder justificar la utilidad del sistema de medida de temperatura sin contacto propuesto en esta tesis, la primera verificación que hay que tener en cuenta es que con su puesta en práctica se cumplen los requerimientos mínimos de seguridad expuestos en el Reglamento de Alta Tensión.

Es de obligado cumplimiento que todos los elementos portantes en media tensión estén eléctricamente conectados a tierra, siendo esta denominada «Tierra de herrajes o de protección».

En este caso, el soporte del sensor infrarrojos es parte de los elementos portantes, y como tal, deberá estar conectado eléctricamente a tierra.

De esta forma, será de aplicación para la ubicación del sensor IR con respecto a las partes en tensión la columna D_{el} de la tabla 2.1.

Como se puede extraer de esta tabla, se considera permitida la ubicación del sensor a una distancia mínima de 1,20m de las partes en tensión, para líneas de hasta 145 kV de tensión nominal.

En las características del sensor de infrarrojos en el apartado 3.2.4 se especifica que 1,20 m es una distancia suficiente para realizar medidas correctas de temperaturas sin contacto cuando la línea está en explotación.

2.4. Métodos de medida de temperatura de los conductores en líneas eléctricas

Existen determinadas situaciones donde es interesante medir la temperatura superficial de un cable; sin embargo por motivos de seguridad o de accesibilidad al punto de medición no es posible que exista contacto directo entre el cable y el equipo de medida.

Esto ocurre por ejemplo, cuando el cable es un conductor de una línea eléctrica o cuando el punto de medición se encuentra en un punto de difícil acceso bien por espacio o bien por las condiciones ambientales.

Actualmente, la medición de la temperatura en cables se monitoriza principalmente por sondas de contacto directo, sensores de tracción, inclinómetros o bien mediante fibra óptica. Todos estos medios de medición son de contacto directo, con los inconvenientes que ello supone.

Particularizando para las líneas eléctricas de transporte y distribución de la energía, en épocas pasadas éstas se construyeron con el objetivo de dar un servicio eléctrico a los clientes. Dicha construcción no tuvo en cuenta el posible incremento de la demanda eléctrica a lo largo de los años.

Es por ello que conforme transcurrían los años dichas líneas eléctricas vieron su carga incrementada progresivamente hasta llegar a un punto en el cual alcanzaron unos valores de carga que no podían ser sobrepasados sin poner en peligro la vida de los diferentes elementos eléctricos que las componían (transformadores, cables, etc.).

Ante este problema se podían tomar dos alternativas. La primera era la construcción de nuevos tendidos eléctricos y la segunda era optimizar las líneas existentes.

Es fácilmente entendible que la primera de las soluciones resultaba muy costosa y en algunos casos impracticable por motivos medioambientales e incluso legales. Es por esto que la búsqueda de métodos que optimizaran el uso de las redes de transporte se hacía indispensable y comenzaba a tomar vida.

Con motivo de todo esto se empezó a trabajar sobre un concepto que estando siempre ahí, en estos momentos comienza a tomar importancia, denominado ampacidad. Dicho concepto no es más que la determinación de la máxima intensidad de corriente que puede circular de manera continua por un conductor eléctrico sin que este sufra daños, estudiando en detalle la temperatura que alcanza dicho conductor.

Un ejemplo práctico desarrollado en el sistema eléctrico español se describe en [CIG98]. De esta forma la ampacidad comparada con la corriente que circule en cada momento

por el conductor nos dice el nivel de carga de una línea, que es igual a comparar la temperatura máxima que soporta el conductor con la temperatura instantánea del conductor.

De este modo, la determinación de la temperatura superficial del conductor se puede realizar bien de manera teórica o bien mediante su monitorización en tiempo real.

La primera de las opciones, y por otro lado la más sencilla, consiste en monitorizar únicamente las condiciones meteorológicas del entorno donde se encuentra emplazada la línea aérea y mediante cálculos teóricos aproximar la temperatura alcanzada en el conductor. Para ello es necesaria la colocación de una serie de estaciones meteorológicas que nos permitan monitorizar datos como el viento (velocidad y dirección), la radiación solar, la humedad, la temperatura ambiente, etc. Mediante dichas mediciones y conociendo la corriente que circula por el cable se puede determinar la temperatura que alcanza la superficie del cable.

Este método de cálculo está normalizado, siendo las principales normas a seguir [CIG92] y la [IEE12]. Este método es sencillo de implementar pero introduce una determinada incertidumbre debido a factores como el error en la medición del viento [Red94], [CIG06a], la localización de los puntos más calientes en la línea, la zona que pueda mitigar el viento, etc.

Una opción intermedia es utilizar un método que combina la monitorización en tiempo real de la temperatura ambiente y valores prefijados desfavorables para el viento y la radiación solar [CIG06b]. Las principales incertidumbres que presentan estos dos métodos son: la introducida por la medición de la velocidad del viento y la cometida en el cálculo de la temperatura del conductor.

La segunda de las opciones consiste en llevar a cabo la monitorización de la temperatura de los conductores aéreos en tiempo real. Para ello se requiere de dispositivos adicionales (generalmente instalados en el conductor) que añaden ciertas incertidumbres en las mediciones. Son estas incertidumbres y el coste de dichos dispositivos los que pueden decidir la viabilidad del uso de los mismos.

De este modo, conociendo la temperatura del conductor y los datos meteorológicos anteriormente mencionados se puede, bien comparar dicha temperatura con la máxima que soporta el conductor en cuestión, o bien, calcular la corriente que circula por el cable para posteriormente poder ser cotejada con la ampacidad en como se refleja en la referencia [FLF83].

Es por esto que surgieron multitud de métodos de monitorización, pudiéndose agrupar en dos grandes conjuntos: de medición indirecta de la temperatura y de medición directa.

Los primeros realizan una medición indirecta, es decir, miden otros parámetros que posteriormente son convertidos a valores de temperatura, mientras que los segundos miden directamente la temperatura superficial del conductor o un parámetro directo relacionado con dicha temperatura.

Existe una gran variedad de métodos indirectos de medición de la temperatura.

Un sistema comercial de medición indirecta permite calcular la temperatura en el conductor eléctrico midiendo la elongación que se produce en el mismo conforme varía su temperatura.

También se pueden encontrar métodos que utilizan la flecha existente en el conductor para medir la temperatura del conductor de manera indirecta. Dicha flecha puede ser medida de diferentes métodos:

- Mediante el procesamiento de imágenes (Sagometer).
- Utilizando equipos que miden la velocidad de propagación de una onda para calcular la elongación del cable (PLC-SAG).

Sin embargo, estos métodos de medición indirecta precisan de un contacto directo entre el cable y el equipo de medición, con los inconvenientes que ello conlleva.

El único método de medición indirecta sin contacto existente en el estado de la técnica, es el desarrollado por diferentes universidades alemanas y consistente en la monitorización de la temperatura superficial del cable mediante dispositivos de onda acústica de superficie SAW (Surface Acoustic Wave".)

El sistema está formado por un radar que emite y recibe ondas electromagnéticas de alta frecuencia y por un sensor de onda acústica de superficie instalado en el conductor (SAW). El sensor está compuesto por un cristal piezoeléctrico que responde mediante un movimiento a la onda electromagnética de entrada. Dicho cristal contiene varios elementos que convierten el movimiento en ondas electromagnéticas, las cuales son recibidas por el radar. El sistema determina la posición de estos elementos, posición que depende de la elongación asociada a la temperatura. Además, la velocidad de propagación de la onda en el cristal también depende de su temperatura. De este modo se determina el valor de la temperatura del conductor en un rango de hasta 150° con una incertidumbre de $0,5^{\circ}$.

Sin embargo, los principales inconvenientes de este sistema radican en que la corrección necesaria para medir la temperatura del conductor varía con las condiciones ambientales, haciendo difícil su implementación en campo ya que exige una re-calibración del equipo de medida para cada condición atmosférica.

Además de los inconvenientes descritos, todos los métodos indirectos existentes en el estado de la técnica presentan principalmente dos inconvenientes. El primero es la incertidumbre existente en la conversión de la unidad medida en temperatura y el segundo es la complejidad en la calibración e instalación de los dispositivos, además de que se trata de sistemas muy afectados por elementos externos, tales como el viento, que falsean sus medidas.

Por otro lado, dentro de los métodos de medición directa aparece en primer lugar el denominado "Power Donut" que fue desarrollado a principio de los 80.

El Power Donut consiste en un toroide que se monta alrededor del conductor y permite medir la corriente que circula por el conductor y la temperatura superficial del cable asociada a dicha corriente.

Además incorpora un módulo GSM/GPRS que permite enviar la información a la estación meteorológica. Haciendo uso de los datos proporcionados por el Power Donut se puede obtener el estado real del conductor y de esa manera comprobar la fiabilidad de los cálculos de los algoritmos de ampacidad.

El principal inconveniente de este sistema se basa en el tipo de comunicación, ya que problemas tanto por el mantenimiento de las tarjetas SIM como por falta de cobertura en algunas localizaciones son asociados a los módulos GSM/GPRS.

El segundo sistema de monitorización directa es el denominado Sistema de Monitorización de Temperatura (SMT) realizado por la empresa Arteche. Este sistema monitoriza la temperatura del conductor a través de un sensor de temperatura tipo Pt en contacto con el conductor.

Otro sistema de monitorización directa es el denominado DTS (Distributed Temperature Sensing). Consiste en la inserción de fibra óptica en el seno del conductor. Este método nos permite conocer la distribución de temperatura a lo largo del conductor, eliminando de este modo la incertidumbre indicada anteriormente de medidas puntuales de temperatura.

La colocación de fibra óptica en las nuevas líneas de transporte podría ser una solución, aunque de elevado coste económico. Sin embargo, la colocación de la fibra óptica en las líneas ya existentes es impracticable por motivos como pueden ser los costes de instalación, costes de parada de servicios, etc.

Sin embargo, estos métodos de medición directa precisan de un contacto directo entre el cable y el equipo de medición, con los inconvenientes que ello conlleva en cuanto a aislamiento eléctrico se refiere, hay que recordar que se está hablando de líneas eléctricas de altos voltajes.

La patente americana US8657490B2 [SPL14] describe un sistema para la medición directa, y sin contacto, de la temperatura superficial de un cable conductor eléctrico aéreo. Este sistema está formado por una abrazadera de emisividad conocida, que envuelve el cable conductor y sobre la cual se realiza la medición; y por un sensor de radiación infrarroja (IR). La misión de la abrazadera es doble: por un lado, eliminar el trenzado del cable, obteniendo así una superficie de medición plana y uniforme; y por otro lado, conocer el valor de la emisividad, parámetro crítico para la medición de la temperatura mediante IR.

Según se menciona en la patente, la abrazadera tiene un espesor comprendido entre $0,1\text{mm}$ y 5mm , lo cual supone que, considerando que el diámetro normalizado de un cable conductor aéreo oscila entre 5mm y 50mm , y valores más fáciles de encontrar son entre 25mm y 30mm considerando que la abrazadera se extiende a lo largo del cable, es decir en longitud y no en volumen, apenas se aumenta la superficie de medición sobre el que puede incidir el sensor.

Es decir, haciendo hincapié en este último punto, la patente citada pretende obtener la suficiente superficie de medición incrementando únicamente la longitud de la abrazadera, sin tener en cuenta que el ángulo de visión de los sensores infrarrojos es cónico dando lugar a una superficie circular. Por lo tanto, no es suficiente con aumentar la superficie de medición en una sola dimensión.

El valor de la superficie de medición es un parámetro muy importante, ya que el área captada por el sensor para realizar la medida debe estar siempre comprendido dentro de dicha superficie de medición, siendo directamente proporcional a:

1. la distancia a la cual se puede medir.
2. la temperatura que puede monitorizarse.

Por lo tanto, considerando todo lo explicado anteriormente, y para el rango de temperaturas de interés $0^\circ - 100^\circ$, el sistema de la patente US8657490B2 no permite monitorizar sin una incertidumbre y unos costes aceptables, la temperatura siempre que el sensor de radiación infrarroja y la abrazadera se encuentren a una distancia mayor de 1,5 metros para la tecnología existente en la actualidad. Además, factores externos (como por ejemplo condiciones climáticas, dilatación/contracción del cable...) producen desplazamientos en el cable que hacen que no sea viable la medida de la temperatura del cable de forma permanente.

Por último, dicha patente no detalla cómo realizar la medición de la temperatura, ni plantea la variación del valor de la emisividad de la superficie de la abrazadera a lo largo

del tiempo debido por ejemplo a condiciones térmicas, lo que puede provocar una deriva en las mediciones de temperatura.

Se podría concluir que los métodos de medición directa generalmente introducen una menor incertidumbre al no tener que realizar la conversión a temperatura, pero no obstante presentan dos inconvenientes principales, además de los mencionados anteriormente, como son el elevado coste de los equipos de medición y, al ser equipos montados en el conductor, las labores de mantenimiento requieren de una parada completa de la línea con su consiguiente coste económico y operativo.

2.5. Método de medida de temperatura sin contacto

Se trata de realizar la medida de la temperatura de la superficie del conductor mediante un método de medición directa y sin contacto.

El procedimiento de medida validado en esta tesis, está definido exhaustivamente en la patente con número [MCO15] no obstante al formar parte esencial de su justificación, se describe de forma somera en este apartado.

Se define como conjunto de medida a un grupo de elementos que está constituido por el cable cuya temperatura es objetivo monitorizar, la esfera que lo envuelve y un sensor de medida de temperatura directa sin contacto por infrarrojos que enfoca a la esfera.

Este método de medida permite unificar sencillez y bajo coste en el proceso de instalación, calibración, montaje y mantenimiento; así como disminuir los riesgos materiales y humanos en las operaciones, al no existir contacto directo en la realización de la medida.

El objetivo de la esfera es incrementar el área efectiva sobre el cual incide el sensor de temperatura, de esta forma se asegura en todo momento que la superficie de medición está cubriendo parte de la superficie del cuerpo.

El sensor de temperatura es un sensor destinado a la captación de radiación infrarroja proveniente de la esfera cuyas características han sido concretadas en el apartado 3.2.4

El cable cuya temperatura se desea monitorizar es un cable conductor de una línea eléctrica (tipo LA-280), la fijación del sensor de temperatura sin contacto se localiza en el apoyo, unido mecánicamente a su celosía y enfocando a la esfera.

Se debe colocar la esfera en el lugar del cable más próximo posible al amarre, minimizando así el desplazamiento que se pueda producir por fenómenos como el viento o la dilatación/contracción del cable, etc.

En la figura 2.1 muestra un esquema de una realización básica del sistema de medida, que comprende el sensor de temperatura sin contacto, el cable cuya temperatura se desea monitorizar y el denominado cuerpo de medición térmica que es la esfera.

Se puede ajustar la emisividad térmica del sensor a la del material sobre el cual se va a medir temperatura, de forma que se puede utilizar para medir sobre diferentes superficies.

Por ejemplo, en el caso de que el cable cuya temperatura se desea monitorizar sea un cable conductor de una línea eléctrica, es necesario ajustar la emisividad del sensor de temperatura sin contacto para que este pueda medir sobre superficies metálicas, dentro de un rango de temperaturas comprendido entre aproximadamente 0°C y aproximadamente

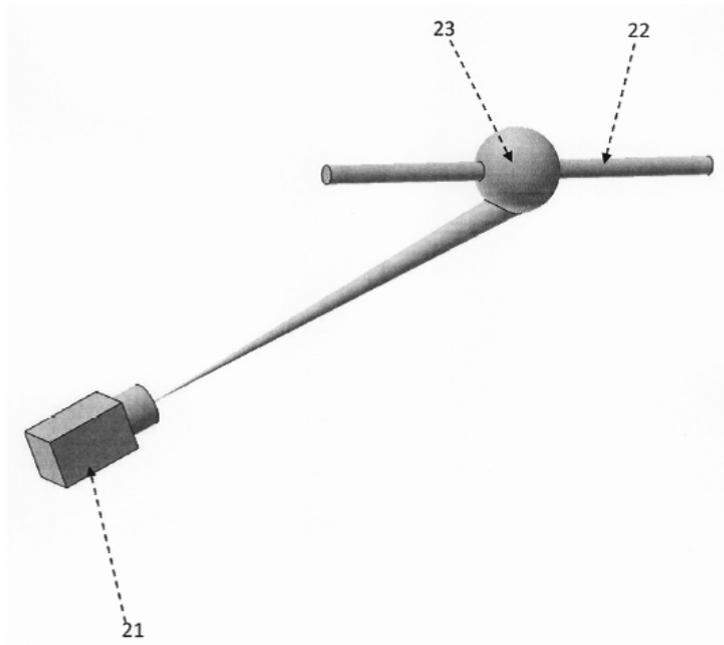


FIGURA 2.1: Sistema de medida sin contacto

$100^{\circ}C$ y con una longitud de onda comprendida entre aproximadamente $0,4\mu m$ y aproximadamente $1,5\mu m$. En cualquier caso, este tipo de sensores pueden realizar mediciones de temperatura sobre otros tipos de superficies.

Capítulo 3

Metodología e instrumentación

3.1. Metodología

3.1.1. Introducción

En este apartado se describe la metodología de construcción de un prototipo cuyo objetivo es monitorizar el comportamiento térmico de un conductor en carga.

1. En primer lugar, ha sido implementado un modelo numérico a partir del cual se ha hecho un preanálisis del comportamiento térmico del conductor y que además ha servido de herramienta para realizar un correcto diseño de la instalación.
2. Por otra parte y atendiendo a todos los datos obtenidos en el diseño, se ha construido un prototipo con las características descritas en 3.1.4 que atiende a los requerimientos y necesidades de esta tesis.
3. Realizar un análisis térmico del comportamiento del conductor según el modelo analítico definido en [CIG12b] comparando el comportamiento térmico del prototipo con los resultados aportados por este modelo analítico.

3.1.2. Características del conductor.

La tecnología de conductor utilizada en una línea condiciona su temperatura máxima admisible, de hecho y dependiendo de este parámetro, la temperatura máxima de explotación podrá cambiar desde 90°C a 250°C .

Sin embargo, la instrucción técnica ITC-LAT-07 del Real Decreto 223/2008 especifica en el apartado 2.1.2.3 que la máxima temperatura de operación en continuo no superará los 85°C y la máxima temperatura en emergencia no podrá sobrepasar los 100°C .

El conductor analizado en el prototipo es el LA-280-HAWK con las con las características incluidas en figura 3.1

Características (según Norma UNE 21018. Acero calidad A)			242-AL1/39-ST1A (LA280-HAWK)
Sección (mm ²)	Aluminio(AL1)		241,7
	Acero (ST1A)		39,4
	Total (AL1/ST1A)		281,1
Equivalente en Cobre (mm ²)			152
Diámetro (mm)	Alma		8,04
	Total		21,80
Composición	Alambres de Aluminio	Nº	26
		Diámetro (mm)	3,44
	Alambres de Acero	Nº	7
		Diámetro (mm)	2,68
Carga de Rotura (kg)			8.620
Resistencia eléctrica a 20°C - (Ohm/km)			0,1194
Peso (kg/km)	Aluminio		667,0
	Acero		310,0
	Total		977
Módulo de Elasticidad (kg/mm ²)			7.700
Coeficiente de dilatación líneas (mmx10 ⁻⁶)			18,9

FIGURA 3.1: Características constructivas del conductor monitorizado

3.1.3. Análisis térmico de los conductores según el modelo numérico

En este apartado se describe la realización de un modelo numérico del prototipo que se pretende desarrollar.

El dominio engloba el conductor, con su núcleo de acero y exterior de aluminio, una esfera de aluminio abrazada al cable en su zona central y todo ello rodeado de aire. Tiene una

longitud de 1 m de largo por 0,2 m de ancho y alto. En las caras delantera y posterior del dominio se definen condiciones periódicas por lo que se está simulando un conductor indefinidamente largo.

Los objetivos a alcanzar con este modelo son:

1. Recrear todas las condiciones eléctricas y ambientales necesarias para obtener un modelo realista del comportamiento del conductor en campo.
2. Validar los resultados de la temperatura alcanzada en el cable modelizado según las específicas condiciones ambientales comparándolas con los valores estimados por los algoritmos del método analítico.
3. Comprobar el efecto térmico que produce la esfera en el conjunto, que previsiblemente será del tipo aleta, provocando una caída de temperatura en la esfera respecto al cable.

Los fenómenos físicos simulados son los siguientes:

- Corriente alterna y campo electromagnético asociado en el conductor.
- Fenómenos de transmisión de calor por conducción dentro del conductor y esfera, convección, tanto natural como forzada con el aire que rodea a los sólidos y radiación solar y enfriamiento por radiación a la atmósfera.

Por lo que se puede decir que todos los mecanismos de ganancia y pérdida de calor en el sistema están incorporados en el modelo numérico.

Para poder incluir todos los principios físicos citados, el modelo se ha realizado con ANSYS Workbench© v.18 mediante un sistema de físicas acopladas. De esta manera primero se resuelve el campo electromagnético mediante el software Maxwell© y luego se traslada la información de los W/m³ generados en el interior de los sólidos al software de mecánica de fluidos computacional Fluent© donde se recrean el resto de condiciones físicas y meteorológicas.

Dicho modelo es estacionario y sus condiciones de contorno son la temperatura ambiente (T_a), velocidad del viento (U_w, F_w), radiación solar (R_s) y corriente eléctrica (I_c), como se indica esquemáticamente en la figura 3.2.

La tabla 3.1 resume las principales características del modelo numérico implementado.

Las propiedades termo-físicas del cable son las suministradas por el fabricante y la emisividad de la esfera de aluminio la medida en la calibración explicada en el apartado de instrumentación.

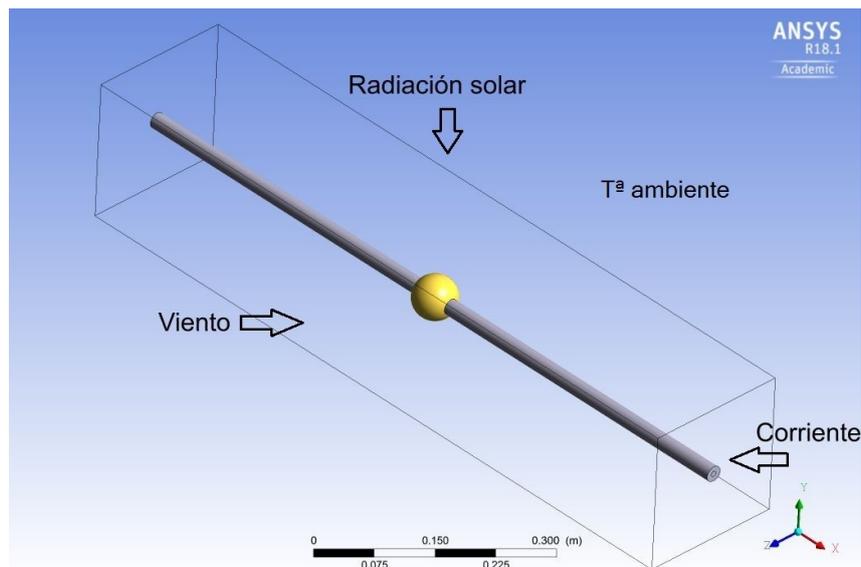


FIGURA 3.2: Condiciones de contorno del modelo numérico

TABLA 3.1: Principales propiedades del modelo numérico diseñado

Principales propiedades del modelo
Estacionario
Gravedad activada y densidad del aire variable
Radiación solar
Modelo de radiación S2S (factores de forma)
Modelo de turbulencia k-e
Condiciones periódicas (longitud indefinida)
Nº de elementos: 890784

Para la validación del modelo se han escogido 5 casos de entre los medidos a lo largo del año que por su variedad de condiciones permitan contrastar el modelo en diversas condiciones ambientales y de carga. La tabla 3.2 recoge dichas condiciones y las temperaturas del conductor y la esfera obtenidas por el modelo numérico, así como la temperatura del conductor estimada por el algoritmo en el método analítico.

TABLA 3.2: Condiciones de contorno medidas directamente en el prototipo

Fecha	Tª ambiente	Velocidad perpendicular equivalente	Radiación solar	Corriente	Tª esfera mod. numérico	Tª cable mod. numérico	Tª algoritmo CIGRE
26/05/2017 10:59	23,46	1,72	647,1	269,5	29,29	30,89	33,78
21/05/2017 12:58	19,03	2	937	271,7	28,68	28,94	30
26/11/2016 8:27	7,3	1,22	5,74	534,7	16,8	21,07	25,4
28/05/2017 4:07	15,89	4,61	1,3	277	17,84	18,5	19,86
3 04/09/2016 11:43	23,5	0,78	392,8	1,14	25,62	27,21	28,89

La figura 3.3 presenta los contornos de temperatura del conjunto conductor-esfera, en el que se aprecia el efecto de disipación térmica provocado por la esfera metálica.

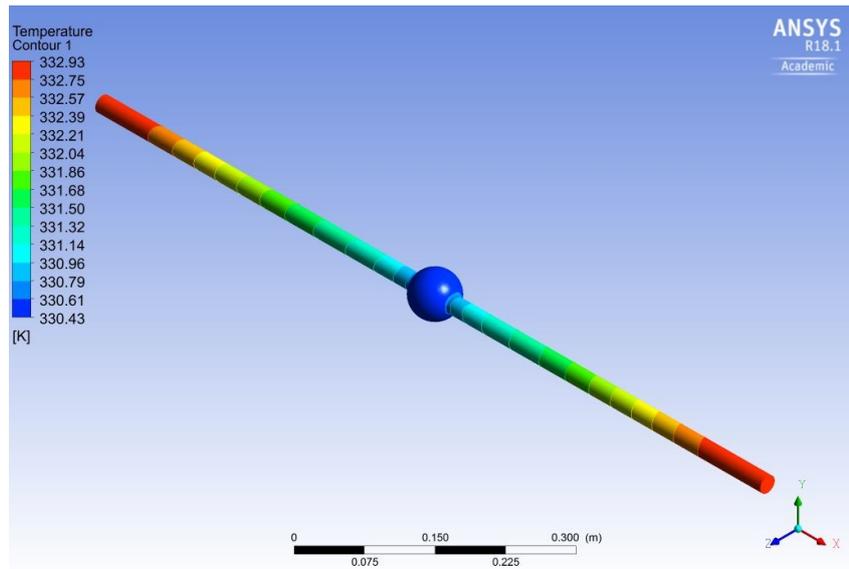


FIGURA 3.3: Distribución de temperaturas en el conductor y la esfera

La figura 3.4 muestra el campo de velocidades alrededor de la esfera debido a la combinación de los efectos de la convección natural y forzada.

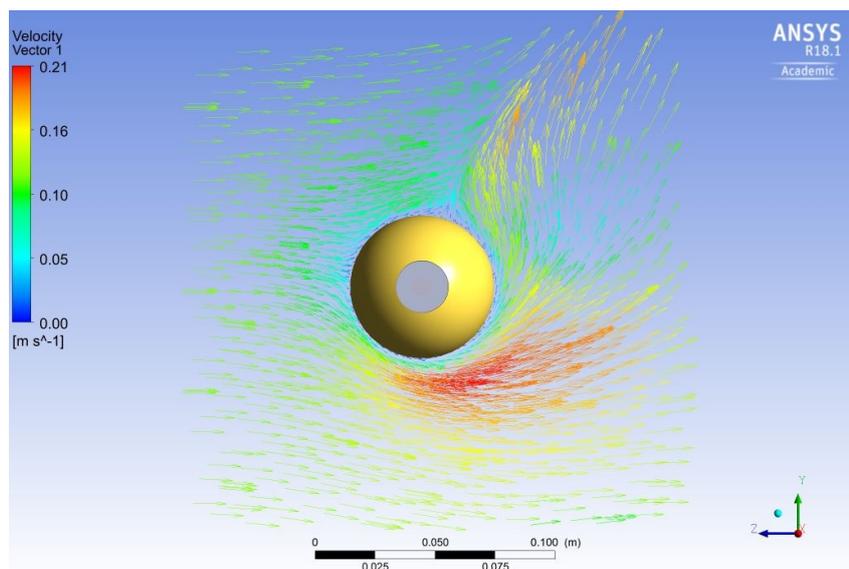


FIGURA 3.4: Campo de velocidades de viento alrededor del conjunto cable y esfera

3.1.4. Implementación del prototipo para ensayos

Descripción general

Para realizar todo este estudio, se ha puesto en marcha la instalación de un prototipo de exterior preparado para el ensayo de probetas formadas por conductores aéreos.

En este prototipo se monitorizan los parámetros que afectan al estado térmico del conductor, como son:

- Intensidad que circula por el conductor (I_c).
- Temperatura ambiente T_a .
- Radiación solar R_s .
- Temperatura en la superficie del conductor T_c .
- Velocidad del viento U_w .
- Dirección del viento F_w .

Se trata de una instalación de exterior que pretende recrear las condiciones reales de explotación de un conductor.

En este caso se ha instalado una probeta de conductor LA-280 debido a que es el tipo de conductor del que se dispone de datos tomados en campo como se especifica en [al17].



FIGURA 3.5: Disposición del prototipo en el exterior

Esta probeta está compuesta por un tramo de conductor de 6,5 m de longitud, este conductor está sustentado en sus extremos por unos herrajes al uso, en los que se incluyen aisladores con 20kV de capacidad de aislamiento para asegurar la fiabilidad de la instalación.

La probeta esta conectada al sistema de alimentación mediante unos terminales preparados para conducir altas magnitudes de intensidad y cuya misión es además contribuir al soporte junto con el sistema de fijación principal.

El lazo de intensidad está impulsado por dos transformadores toroidales de potencia. Estos son atravesados por dos conductores RV1-k de $240mm^2$ de sección conectados en paralelo entre si y cuyas puntas alimentan al cable que conforma la probeta, formando un secundario de una única espira. De esta forma es capaz de inducir grandes intensidades a través de la probeta y pudiéndose recrear así varios estados de carga.

Para testear el estado térmico de la probeta se van a utilizar diferentes elementos de medida de temperatura, como son:

1. Medida directa sin contacto (sensor de infrarrojos).
2. Medida directa contacto (sondas Pt-100)

Este equipo se utiliza para monitorizar el comportamiento térmico del cable llevándolo a unas condiciones de carga que difícilmente se pueden conseguir en estado de explotación normal de la instalación.

Una herramienta para justificar el ajuste del prototipo a la situación de explotación real de una línea será introducir los parámetros obtenidos por el sistema de monitorización en el modelo analítico.

Para realizar el montaje, la puesta en marcha y realizar pequeños ajustes así como la comprobación de la correcta medida en campo devuelta por los sensores, se ha contado con los siguientes equipos de medida portátiles.

1. Cámara termográfica Flir E 40 para la realización de fotografías termográficas de control en los procesos de enfriamiento y calentamiento del conductor.
2. Data logging Thermometer RS 1384, compuesto por cuatro sondas tipo K para medida de temperatura ambiente y tres puntos en la longitud de control del conductor. Tiene conexión USB para obtener una completa recogida de datos.
3. Controlador Testo 435 con sonda de hilo caliente (anemómetro) para la medición de la velocidad y temperatura del aire que incide sobre el cable.

Localización de las instalaciones

El centro donde se están llevando a cabo todos los ensayos está ubicado en la **Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Industrial y de Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria**.

Para realizar la monitorización y seguimiento de las medidas se utilizan las dependencias ubicadas en la última planta del edificio.

El prototipo y parte del equipo de potencia está ubicado en la terraza exterior, encima de las dependencias donde están ubicados los equipos de monitorización. Exactamente en una ubicación que se denomina Góndola, indicada su posición en la figura 3.6.



FIGURA 3.6: Localización de las instalaciones

Esquema eléctrico del prototipo.

El esquema eléctrico del prototipo está formado principalmente por dos tipos de equipamientos.

- El que se corresponde con la monitorización
- El que se corresponde con el lazo de intensidad (alta intensidad)

En la figura 3.7 se muestran las conexiones eléctricas de cada uno de los elementos que conforman la instalación.

En el esquema están representados principalmente tres cuadros eléctricos.

1. Cuadro Secundario de la Gondola (Universidad)

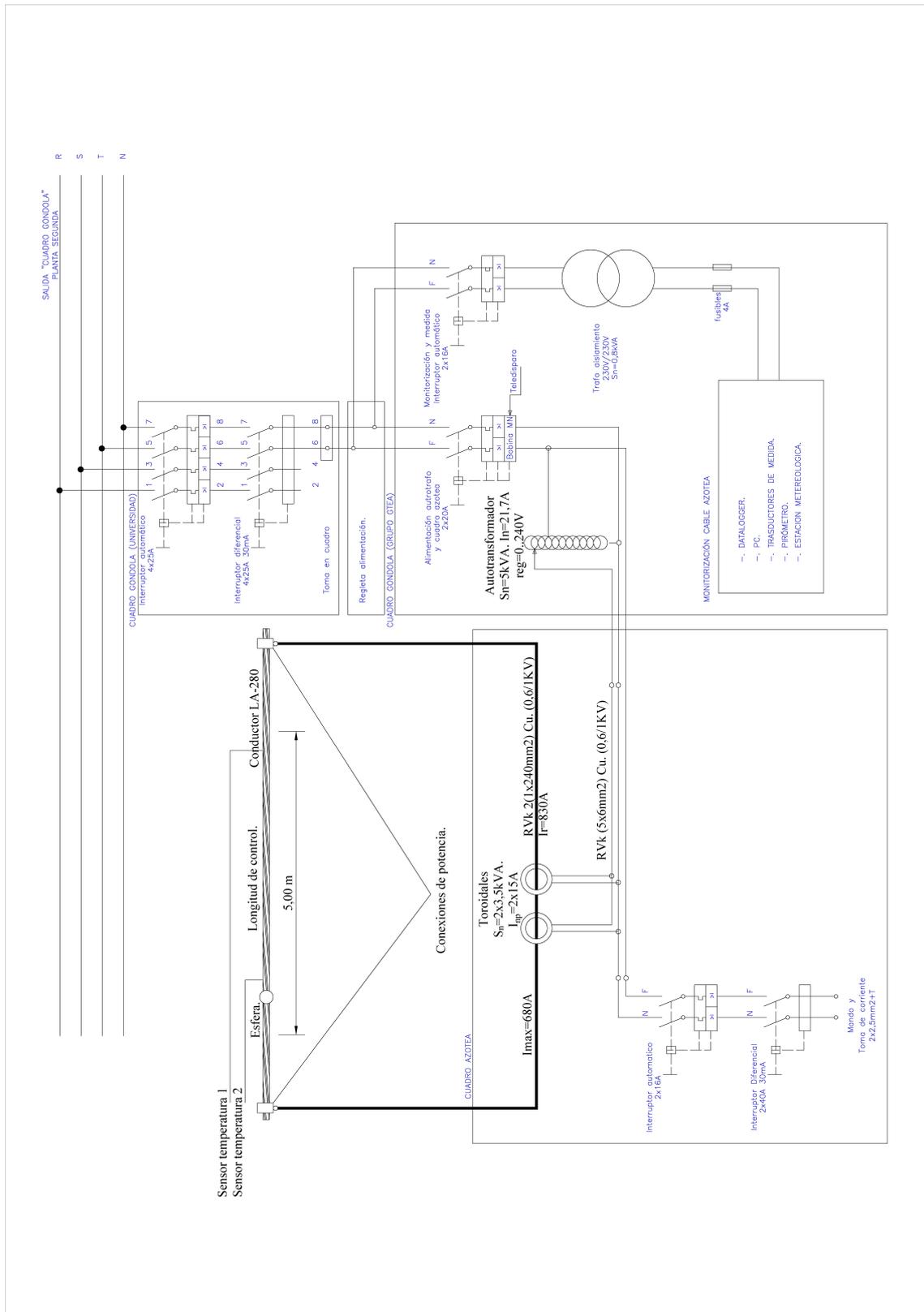


FIGURA 3.7: Esquema eléctrico del equipo de ensayo

2. Cuadro Secundario de la Gondola (Grupo GTEA)

3. Cuadro Secundario Azotea.

Cuadro secundario Gondola (Universidad)

Este cuadro se corresponde con el existente en las instalaciones desde donde se toma tensión para energizar el prototipo.

Cuadro secundario Gondola (Grupo GTEA)

Este cuadro es de nueva instalación y tiene ubicados en su interior todos los elementos necesarios para la protección de las personas y las cosas.

Además, están ubicados en el los transductores, Datalogger y elementos de control según se explica en [3.1.4](#)

Cuadro secundario AZOTEA

En el interior de este cuadro está ubicado el equipo de generación de altas intensidades así como los elementos necesarios para mantener las condiciones ambiente en el interior del armario que eviten el deterioro prematuro de los elementos que hay en su interior.

3.1.5. Análisis térmico según el modelo analítico

Los algoritmos aceptados por CIGRE e IEEE se basan en el equilibrio térmico entre el calor ganado y perdido en el conductor debido a la carga y las condiciones ambientales según [[CIG12b](#)] y [[IEE12](#)].

Para hacer el estudio con el modelo analítico se utilizará el definido por el equilibrio térmico dinámico y por facilidad de ejecución y simplicidad en el requerimiento de equipos informáticos, se utilizará el ofrecido por CIGRE.

Se asume que el conductor está en equilibrio térmico dinámico según la expresión [3.1](#), es decir, teniendo en cuenta la energía puesta en juego asociada al aumento y disminución de la energía interna del conductor.

$$m \cdot c \frac{dT_t}{dt} = q_s + q_j + q_m \pm q_c \pm q_r \quad (3.1)$$

Donde:

- m : es la masa del conductor por unidad de longitud.
- c_p : la capacidad calorífica específica del conductor.
- T_t : temperatura teórica del conductor.
- t : el tiempo.
- q_c se corresponde con el enfriamiento debido a la convección.
- q_r es el enfriamiento debido a la radiación al entorno.
- q_s es el calentamiento debido a la radiación solar.
- q_j es el calentamiento debido al efecto Joule y siendo por ultimo.
- q_m el calentamiento debido al efecto magnético.

Se tomarán en concreto como directrices de referencia a seguir en este caso las indicadas por CIGRE en sus distintos «Técnical Brochure» como son [CIG12b], [CIG06b] o [CIG12a] que dejan definidas las variables que deben ser medidas y como contribuyen estas a la hora de realizar el análisis correspondiente.

Estas variables son la temperatura ambiente (T_a), la radiación solar (R_s), la velocidad del viento (U_w), la dirección del viento (F_w) y la corriente del conductor (I_c).

Las características de los sensores de la estación meteorológica están definidas en 3.2.2 así como las características del sistema de monitorización.

De esta forma, ejecutando el algoritmo que obedece al modelo de equilibrio dinámico, se compara la temperatura medida en la superficie del conductor (T_c) con la temperatura estimada por el algoritmo (T_t).

En este procedimiento se utiliza la ecuación 3.1 del equilibrio dinámico obteniéndose la temperatura del conductor T_t teniendo en cuenta la energía puesta en juego en el sistema.

En el instante $t_0 = 0$ se establecen los parámetros térmicos del conductor ($T_a, T_c, U_w, F_w, I_c, R_s$) medidos.

A partir de estos datos se soluciona la ecuación de equilibrio térmico dinámico para $\partial t = 1s$ asumiendo que el resto parámetros son constantes. Repitiendo este cálculo se llega al valor de T_t en el instante $t = t_0 + 1min$ donde se compara con la medida real tomada por contacto en ese instante.

El diagrama de flujo correspondiente a este proceso se representa en la figura 3.8

Este algoritmo se utiliza para poder validar los resultados obtenidos por el prototipo y de esta forma poder justificar que este se ajusta a una línea en estado de explotación real.

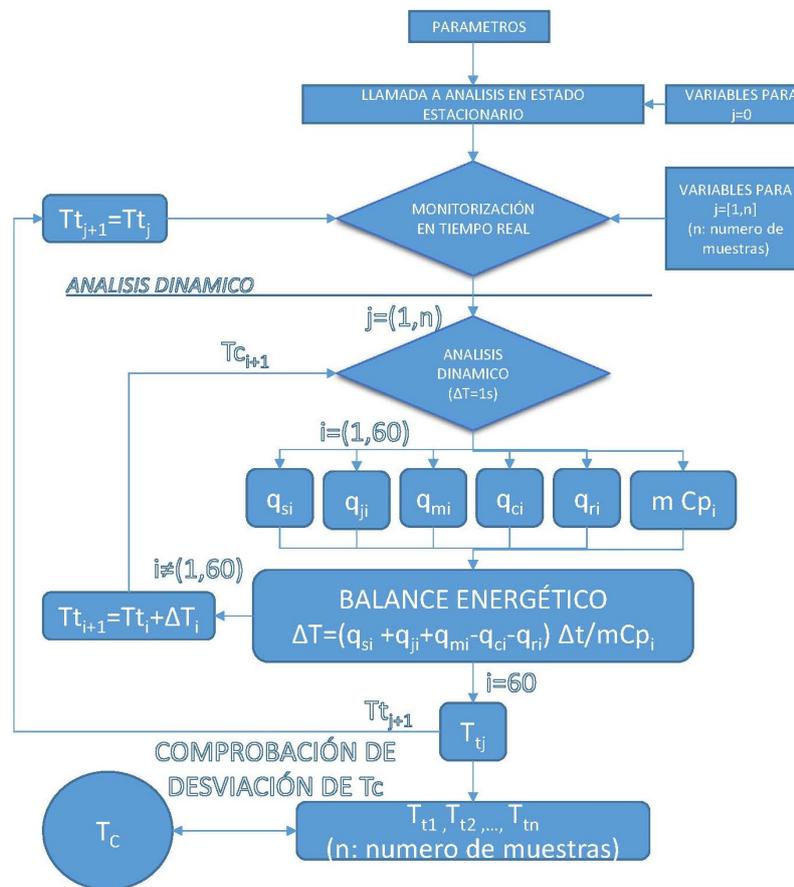


FIGURA 3.8: Algoritmo analítico CIGRÉ para la previsión de temperatura del conductor

3.2. Instrumentación.

3.2.1. Introducción.

En este apartado se describen todos y cada uno de los elementos que comprenden la sensórica utilizada para la monitorización del estado térmico del conductor.

En concreto la sensórica está compuesta por:

- Piranómetro para medición de la radiación solar R_s .
- Sensor de humedad relativa HR .
- Anemómetro de ultrasonidos para medir la velocidad U_w del viento y su dirección F_w .
- Sensor de temperatura de contacto T_c , para medir la temperatura del conductor.

- Sensor de temperatura sin contacto T_{sir} (sensor IR).
- Captador de medida de intensidad I_c

3.2.2. Composición de la estación meteorológica.

En la localización donde está ubicado el equipo de ensayo se ha instalado una estación meteorológica que toma las muestras de los distintos parámetros ambientales. Esta estación meteorológica sirve de datos a un datalogger donde se almacenan parámetros meteorológicos como: temperatura exterior, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar celeste, radiación solar albedo, humedad relativa.

Estos datos, entre otros, nos sirven para validar el equipo de ensayo, a partir de datos tomados en campo y respaldados por los diferentes métodos matemáticos definidos por IEEE y CIGRE.

En la figura 3.9 se puede observar la composición de la estación meteorológica en su conjunto.

Esta estación meteorológica tiene la siguiente composición.

Piranómetro para medición de la radiación solar.

Un piranómetro se constituye por una pila termoeléctrica contenida en un alojamiento con dos hemisferas de cristal.

La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares.

El espectro de la radiación solar se extiende entre 300 y 2800 nm. Esto indica que un piranómetro debe cubrir ese espectro con una sensibilidad lo más «plana» posible.

Para medir la radiación solar, se requiere que la respuesta al flujo de radiación varíe con el coseno del ángulo de incidencia. Por ejemplo, máxima respuesta cuando el flujo incide perpendicularmente sobre el sensor (0°), respuesta nula cuando el Sol está en el horizonte 90° o valores intermedios de respuesta, cuando el ángulo de incidencia está entre los anteriores. La termopila, formada por sectores blancos y negros, es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre los 300 y los 50000 nm. y tiene una respuesta casi perfecta

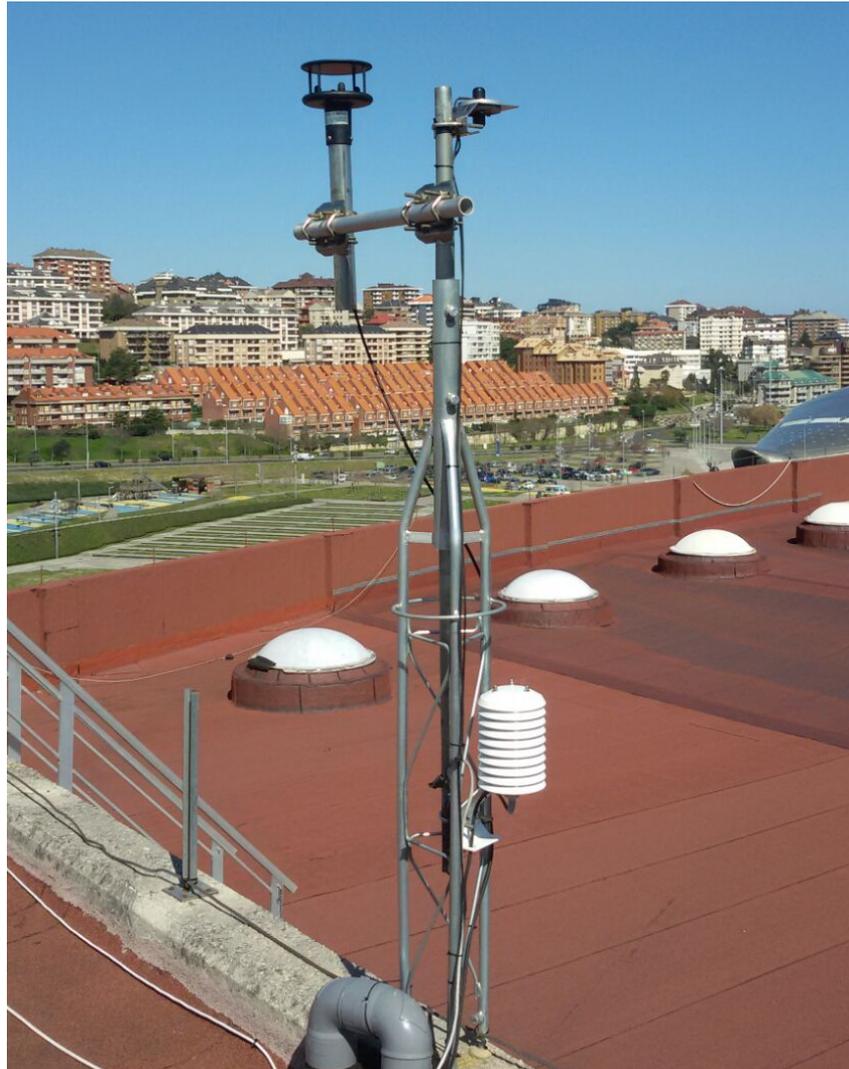


FIGURA 3.9: Imagen del conjunto de la estación meteorológica

al coseno del ángulo de incidencia. La cúpula de cristal limita la respuesta al rango de 300 a 2800 nm. preservando un campo de visión de 180 grados. Otra función de la cúpula es la 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.



FIGURA 3.10: Imagen del piranómetro ubicado en la estación meteorológica

TABLA 3.3: Características técnicas del piranómetro

Respuesta del coseno	45° ángulo cenital: $\pm 1\%$ 75° ángulo cenital: $\pm 5\%$
Exactitud absoluta:	$\pm 5\%$ Repetibilidad $\pm 1\%$
Salida:	0 a 2,5V (2,2V = plena luz del sol $1100W/m^2$)
Tensión de entrada:	de 2,5 a 5,5Vcc
Salida:	0 a 5 V (4,4V = plena luz del sol $1100W/m^2$)
Potencia de entrada:	5 a 5,5Vcc
Sensibilidad:	calibrada encargo exactamente a $0,25Wm^2$ por mV
Material:	Aluminio anodizado con lente acrílico fundido.
Deriva a largo plazo	Menos del 3% por año
Entorno operativo	-25 – 55°C de 0 a 100% de humedad relativa.
Consumo de corriente	285 μA
Cable	5 metros de cable de par trenzado
Dimensiones	diámetro de $2,4 \times 2,75$ cm de altura
Masa	70g (con cable 2 metros)

En la tabla 3.3 quedan reflejadas las características técnicas del piranómetro, así como en la figura 3.10 se muestra una imagen de como es este elemento de medida de radiación solar.

Sensor de humedad para medir humedad relativa.

Un sensor de humedad principalmente permite medir la temperatura de punto de rocío, humedad absoluta y relación de mezcla. Un sensor analógico de humedad mide la humedad del aire relativo usando un sistema basado en un condensador. El sensor está hecho de una película generalmente de vidrio o de cerámica. El material aislante que absorbe el agua está hecho de un polímero que toma y libera el agua basándose en la humedad relativa de la zona dada. Esto cambia el nivel de carga en el condensador del circuito en el cuadro eléctrico.

En la tabla 3.4 quedan reflejadas las características físicas y técnicas de este elemento de medida.

TABLA 3.4: Sensor analógico de humedad relativa y temperatura modelo PC33 de Michell Instruments

Regimen de funcionamiento.	
Rango de medida	
(T)	$-20to + 80^{\circ}C(-4to + 176^{\circ}F)$
Precisión at $23^{\circ}C(73^{\circ}F)$	PC52 : $< \pm 2 \%RH(10 - 90 \%RH)$
Humedad	PC33: $< \pm 3 \%RH(30 - 80 \%RH)$
Precisión at $23^{\circ}C(73^{\circ}F)$	PC52: $\pm 0,2^{\circ}C(\pm 0,36^{\circ}F)$
Temperatura	PC33: $\pm 0,3^{\circ}C(\pm 0,54^{\circ}F)$
Estabilidad – RH Sensor	$\pm 1 \% RH/year$
Tiempo de respuesta – RH Sensor	$< 10 \text{ seg (para un } 90 \% \text{ de incremento)}$
Entradas y salidas eléctricas.	
Señal de salida	$4..,20mA, 0..,1, 0..,5, 0..,10V$
Tensión de alimentación	$14..,30VDC$ (para $0..,5/0..,10V$) $30VDC(0..,1)$
Condiciones de funcionamiento	
Temperatura de funcionamiento	
Sensor	$-30to + 85^{\circ}C$
Storage	$-40to + 85^{\circ}C$
Especificaciones mecánicas.	
Protección IP65 (NEMA 4 level)	
Dimensiones	$L = 130mm, \varnothing 19mm$
Longitud	$30g$ sin cable
Conexiones eléctricas	$M12$

En la figura 3.11 se puede observar la imagen de este tipo de sensor.



FIGURA 3.11: Imagen del sensor de humedad y temperatura exterior ubicado en la estación metereológica

Anemómetro de ultrasonidos para medición de velocidad y dirección del viento.

El anemómetro de ultrasonidos modelo *HD52\3D* es un anemómetro ultrasónico estático de dos ejes para medir velocidad y dirección del viento, componentes cartesianas U-V de velocidad del viento con brújula incluida. Sus características resumidas están en la tabla 3.5

TABLA 3.5: Características del anemómetro de ultrasonidos

Anemometro	
Velocidad del aire	
Sensor utilizado	ultrasónico
Rango de medición	0..60m/s
Resolución	0.01m/s
Precisión	$\pm 0,3m/s$
Dirección del viento	
Rango de medición	0.,360°
Resolución	0,1°
Precisión	$\pm 2^\circ$ RMSE de 1,0m/s
Señal	
Salidas digitales	<i>RS232, RS485ySDI12</i>
Protocolos	NMEA, MODBUS-RTU y SDI-12
Salidas analógicas	
Velocidad del viento	$4 \div 20mA$ (estandar), $0 \div 5V$.
Dirección del viento	$4 \div 20mA$ (estandar), $0 \div 5V$.

En la figura 3.12 se puede observar como es la apariencia de este sensor ubicado en la torre meteorológica.



FIGURA 3.12: Imagen de la anemoveleta de ultrasonidos ubicada en la estación meteorológica

Las salidas analógicas serán las que se utilizarán para servirle datos al datalogger y así poder disponer de estas dos magnitudes.

3.2.3. Composición del equipo de monitorización térmica del conductor.

El equipo de monitorización montado sobre el conductor cuenta con los siguientes elementos de medida.

Captador de intensidad.

El captador de intensidad tiene una relación de transformación 1000:5A, tiene una precisión tipo 0,5 según la norma IEC 61869.

En esta norma se establecen los porcentajes de error máximos de amplitud como de desfase según la tabla 3.6 con respecto al % I_n , es al estado de carga, que puede presentar un transformador de medida.

El error de amplitud, ϵ_i , es el error que el transformador introduce en la medida del módulo la intensidad, y que proviene de que su relación de transformación no es igual a la relación nominal.

El error de fase de un transformador de intensidad, δ_i , es la diferencia de la fase entre los vectores de las intensidades primaria y secundaria, elegidos los sentidos de los vectores, de forma que el ángulo sea nulo para un transformador perfecto.

TABLA 3.6: Tabla de las características de la precisión del trafo según IEC 61869

Tipo	% Error según el estado de carga.				Desfase según el estado de carga.			
	5 %	20 %	100 %	120 %	Minutos (')			
					5'	20'	100'	120'
0,1	0,40	0,20	0,10	0,10	15,00	8,00	5,00	5,00
0,2	0,75	0,35	0,20	0,20	30,00	15,00	10,00	10,00
0,5	1,50	0,75	0,50	0,50	90,00	45,00	30,00	30,00
1,0	3,00	1,50	1,00	1,00	180,00	90,00	60,00	60,00

La clase de precisión de un transformador de intensidad para medida, está caracterizada por un número (índice de clase) que es el límite del error de relación, expresado en tanto por ciento para la intensidad nominal primaria estando alimentando el transformador la “carga de precisión”.

Las clases de precisión de los transformadores de intensidad para medida según la norma IEC son: 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 3.

Guía de aplicación:

- Clase 0,1 - Laboratorio.
- Clase 0,2 - Laboratorio, patrones portátiles, contadores de gran precisión.
- Clase 0,5 - Contadores normales y aparatos de medida.
- Clase 1 - Aparatos de cuadro.
- Clase 3 - Para usos en los que no se requiere una mayor precisión.

En la figura 3.13 se puede observar las dimensiones del trafo de intensidad utilizado para la medida de esta ubicado en el interior del cuadro exterior de la gondola.

Sensor de medida de temperatura con contacto.

Para la captación de temperatura por contacto en el prototipo se utiliza un sensor estandar del tipo Pt100.

Este sensor, es un sensor de temperatura que a $0^{\circ}C$ presenta una resistencia de 100Ω y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

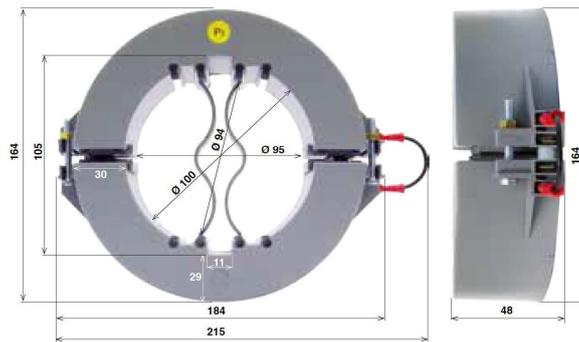


FIGURA 3.13: Imagen del trafo de intensidad utilizado en el prototipo.
(Medidas en mm)

El incremento de la resistencia de la Pt100 no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas o un transductor que corrija apropiadamente esas alinealidades es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde la medida. Estas sondas Pt100 son industriales y se fabrican encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable denominado vaina.

En el extremo de contacto está el elemento sensible (Sensor RTD) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal)

La parte bobinada en forma de hilo o cinta de platino sensible a la temperatura, va encapsulada en un cuerpo cerámico en el interior de un contenedor de silicona para minimizar las vibraciones. Los terminales del elemento de medida están unidos a la parte resistiva activa de forma que resistan a las vibraciones.

Las Pt100 de platino utilizadas en el prototipo cumplen con los valores básicos, estabilidad de temperatura y las desviaciones admitidas de la norma DIN IEC 751.

Para obtener una medida de temperatura segura con Pt100 es necesario que sus características mecánicas y técnicas de medida (tamaño, forma, resistencia a vibraciones, rango de temperatura, tiempo de respuesta, resistencia al aislamiento, etc.) sean las adecuadas para la clase de medida y las condiciones del lugar de aplicación.

En este caso las sondas están formadas por un tubo de protección metálico en inoxidable, en el cual se coloca el sensor Pt100 que tiene una salida mediante cable.

Las sondas de este tipo son más costosas y mecánicamente no tan rígidas como los termopares, pero realmente los superan en exactitud en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °).

En el prototipo es utilizado el modo de conexión de 3 hilos, el más común y más utilizado para procesos industriales y resuelve bien el problema de error generado por los cables.

El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa en el “puente de Wheatstone”.

TABLA 3.7: Características del sensor de contacto

Sensor Pt-100:	
Máxima temperatura de trabajo de la vaina:	-50°C / +250°C
Máxima temperatura de trabajo del cable silicona:	-50°C / +120°C
Sensor interno de temperatura:	clase DIN B
Sonda longitud útil:	50mm x 6mm diámetro.
Acero inoxidable AISI-316L	
Cable de Silicona:	3 hilos d:4mm Long. 10mts

En la tabla 3.7 quedan reflejadas las características del sensor Pt-100 para medida de temperatura por contacto, además se incluyen en la tabla 3.8 las características correspondientes del transductor utilizado para que la señal del sensor pueda ser recogida por el datalogger.

TABLA 3.8: Características del transductor

Convertidor universal Pt 100 Remberg:	
Condiciones ambientales	
Temperatura de trabajo	- 10/+60°C
Temperatura de almacenamiento	- 40/+80°C
Tiempo de calentamiento	5 minutos
Coefficiente de temperatura	50 ppm/°C
Entrada	Pt100 con compensación de línea
Resistencia máxima de línea	50W/hilo
Efecto resistencia de cable compensación	0,015°C/W
Corriente excitación a sensor	<1mA
Linealización según	DIN 43760 a:0.0385
Salida	
Intensidad:	4/20mA, 0/20mA, 0/5mA, ..
Capacidad de carga máxima	<700W
Protegida contra inversión de polaridad	
Tensión:	0/10V, 0/5V, ..
Capacidad de carga máxima	>1K
Protegida contra cortocircuitos	
Detección rotura de sonda	
aprox. 23mA	aprox. 12V
Ausencia de sensor	
4/20mA aprox.	3mA
0/20mA	0mA
V	- 0,6V
Tiempo de respuesta(10 % 90 %)	50mseg

Se utiliza también el término “pirómetro de infrarrojos” para expresar la diferencia con un termómetro de contacto clásico ya que mide la radiación térmica y no la temperatura en sí.

Este sensor permite medir la temperatura de forma remota a diferencia de otros tipos como pueden ser los termopares que necesitan estar en contacto con el elemento que se está monitorizando. Por lo tanto, es posible medir la temperatura si el objeto se está moviendo, si está rodeado por un campo electromagnético, o si se coloca en el vacío, etc

El termómetro está constituido por un sensor y una unidad donde está contenida la electrónica (driver) figura 3.16 unidad desde la cual se puede disponer de los datos en varios formatos, en este caso se utilizará la interconectividad USB.

El termómetro infrarrojo utilizado permite una medición exacta de la temperatura en los objetos más pequeños desde una distancia de 0,9 mm a una distancia de 1500 mm.

En este caso se utilizará para medir la temperatura de la esfera que está unida al conductor a una distancia de 1500 mm para justificar su correcto funcionamiento en condiciones límite.

TABLA 3.9: Características generales del termómetro de infrarrojos

Especificaciones generales		
Envolvente		IP 65 (NEMA-4)
Temperatura ambiente		sensor: -20 - 85°C electrónica: 0 - 85°C
Temperatura de trabajo		sensor: -40 - 85°C electronica: -40 - 85°C
Humedad relativa		10 - 95 %
Vibraciones	IEC 68-2-6: 3 G, 11 - 200 Hz	
Peso		sensor 600 g electronica 420 g

En la tabla 3.9 quedan reflejadas las características constructivas generales del termómetro de infrarrojos.

En la tabla 3.10 quedan reflejadas las características eléctricas del termómetro de infrarrojos.

En la tabla 3.11 quedan reflejadas las características en cuanto a exactitud de la medida se refiere del termómetro sin contacto.

En la figura 3.15 se puede observar como queda ubicado el sensor de infrarrojos con respecto a la esfera para poder monitorizar su temperatura.

TABLA 3.10: Características eléctricas del termómetro de infrarrojos

Especificaciones eléctricas	
Salidas analógicas	canal 1: 0/4 - 20 mA, 0 - 5/10 V, termopar J, K canal 2: temperatura del sensor (40-85°C de 0 - 5 V o 0 - 10 V)
Salida de alarma	Salida transistor (24 V / 50 mA)
Impedancia de salida	100kΩ
Entradas	Entradas programables para ajuste de emisividad y compensación por temperatura exterior

TABLA 3.11: Especificaciones de la medida del termómetro de infrarrojos

Especificaciones en la medida	
Rango de temperaturas	-50°C a 975°C
Rango del espectro.	8 - 14μm
Resolución óptica	75:1
Precisión del sistema	±1 %
Repetitibilidad	±0,5 %
Resolución de temperatura (NETD)	0,1°C
Tiempo de respuesta (90 % señal)	9 ms
Emisividad (ajustable)	0.100 - 1.100
Transmisividad (ajustable)	0.100 - 1.000

En la figura 3.16 se muestra de forma detallada una imagen del termómetro de infrarrojos que es utilizado en el prototipo.



FIGURA 3.15: Ubicación del termómetro infrarrojo



FIGURA 3.16: Sensor de Infrarrojos

Composición del equipo de monitorización

El equipo de monitorización se encuentra ubicado dentro de un armario de PVC, conformando el cuadro de protección general en el interior de la Góndola.

En este se incluyen los elementos necesarios para cumplir las disposiciones de seguridad

requeridas en el Reglamento Electrotécnico de Baja tensión, estas se corresponden con los interruptores automáticos magnetotérmicos de los calibres correspondientes a los elementos que deben de proteger, e interruptores diferenciales para proteger a las personas y cosas de las posibles faltas de aislamiento y por lo tanto de contactos eléctricos experimentales.

Además, tiene ubicado en su interior un sistema de adquisición de datos formado por un Datalogger que recoge datos aportados por los distintos sensores instalados en el equipo de ensayo.

Este datalogger, así como el equipo informático que soporta las comunicaciones y el tratamiento de señales, está conectado eléctricamente a un transformador de aislamiento galvánico, cuya misión es la protección de estos equipos de medida cuyas características se describe mas adelante.

Autotransformador para la simulación del estado de la carga El autotransformador es el elemento regulador que se encarga de controlar la tensión de alimentación de los transformadores toroidales, que inducen las fuerzas electromotrices en el conductor que alimenta a la probeta, necesarias para inducir altas intensidades.

Se emplea este elemento, debido a que proporciona suficiente exactitud en cuanto a las necesidades de regulación de intensidad, y es suficientemente robusto, para soportar las posibles inclemencias atmosféricas, derivadas de la ubicación en la terraza exterior.

Las características del autotransformador, quedan resumidas en la tabla 3.12.

TABLA 3.12: Características del autotransformador

Potencia nominal:	$S_n = 5kVA$
Relación de transformación:	$r = 230/(0 a 250V)$
Tensión de cortocircuito:	$V_{cc} = 4\%$

Como se puede observar en la figura 3.17, el autotransformador va rígidamente montado sobre el armario metálico en el interior de la góndola.

Transformador de aislamiento galvánico Para alimentar todo este sistema se intercala un transformador de aislamiento galvánico entre la red de baja tensión suministrada en la escuela y el equipo de monitorización del prototipo.

Se evitan así posibles retornos de intensidad provenientes del contacto de los sensores ubicados en el conductor que puedan dañar los transductores, así como amortiguar los efectos de posibles sobre-tensiones provenientes de descargas atmosféricas.

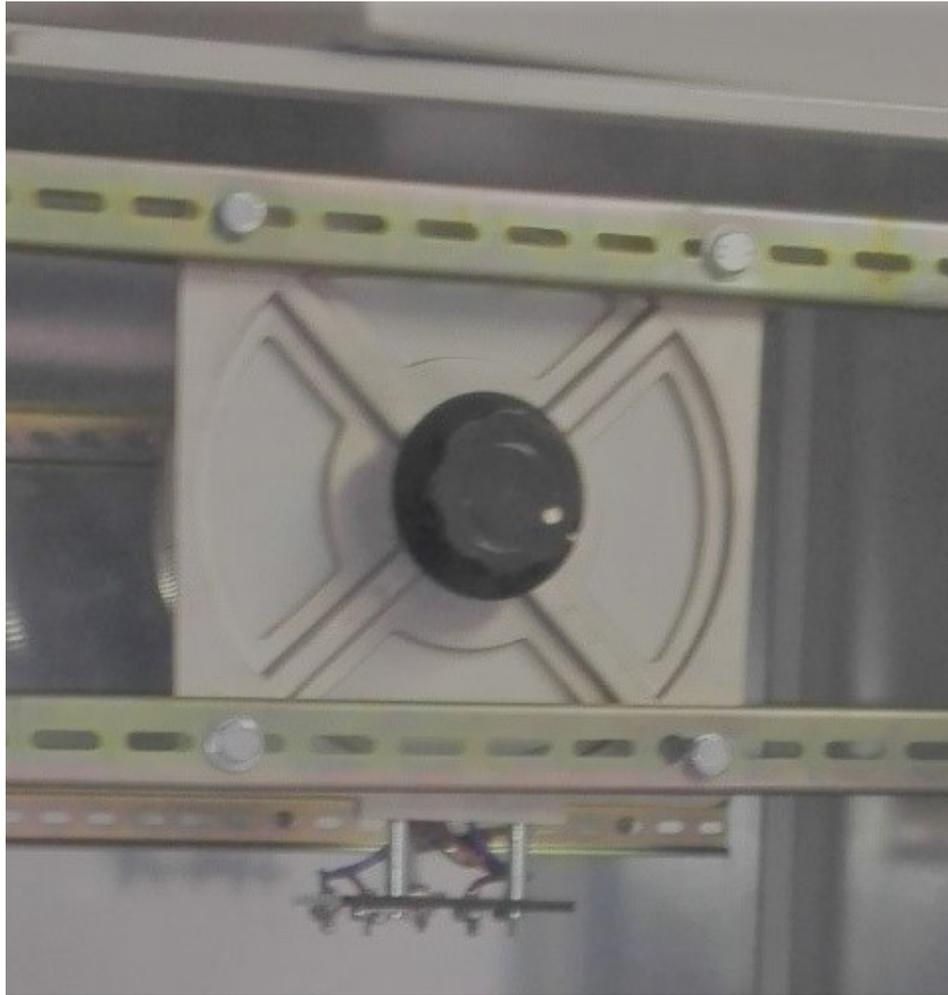


FIGURA 3.17: Autotransformador regulación 0..250V

De esta forma se mejoran las condiciones eléctricas de funcionamiento de la instalación ya que sus condiciones de funcionamiento son duras debido a la naturaleza de la instalación situada en el exterior, en altura y cerca de la costa.

TABLA 3.13: Características transformador de aislamiento galvánico

Potencia nominal:	0,8 kVA
Relación de transformación:	$r=230/230V$
Tensión de cortocircuito:	$V_{cc}=8\%$
Tensión de aislamiento:	35 kV

Composición del sistema inductor de alta intensidad.

Este apartado se refiere a la caracterización del conjunto de los interruptores automáticos e interruptores diferenciales imprescindibles para asegurar las protecciones y el funcionamiento correcto de la instalación.

Todos estos elementos se ubican en el interior del armario metálico de intemperie localizado en la terraza, en la zona exterior del edificio. Estos dispositivos protegen a todos los dispositivos que se conectan al cuadro exterior.

Está conformado por dos transformadores toroidales de potencia de 5 kVA de potencia nominal, cuyos circuitos primarios están conectados en paralelo, estando los circuitos secundarios de estos transformadores acoplados magnéticamente en serie, consiguiéndose de esta forma que las fuerzas electromotrices que inducen se sumen, generándose una intensidad máxima en el circuito secundario de 690 A.

Los primarios de estos transformadores de potencia, están conectados al autotransformador previsto para regular la tensión de alimentación desde una tensión mínima de 0V hasta una máxima de 250V, de esta forma se consigue una regulación de intensidad en el secundario de 0A hasta 690A.

Para poder soportar la intensidad máxima de ensayo, el circuito secundario está conformado por dos conductores en paralelo tipo RVk de 240mm² de sección en cobre. Cada uno de estos conductores es capaz de soportar una intensidad máxima admisible de 415 A en las peores condiciones posibles de explotación. Estando por tanto conectados en paralelo, como es el caso, pueden soportar un máximo de 830 A, de esta forma el bucle es suficientemente robusto.

Este circuito secundario está totalmente aislado galvánicamente del primario (aislamiento de los conductores 0,6/1kV), y no tiene referencia a tierra, esta es una segunda forma de proteger los equipos de monitorización y medida de posibles sobre-tensiones, se evitan derivaciones a tierra e intensidades de retorno que puedan dañar a los sensores de temperatura. Las conexiones sobre el conductor que se somete a ensayo (probeta) se hacen mediante mordazas. El montaje de estas mordazas sobre el conductor se realiza aplicando pasta conductora, asegurándose el apriete definido por el fabricante para de esta forma minimizar la resistencia de contacto entre las mordazas de conexión eléctrica y la probeta. En estas condiciones y estando el conductor directamente conectado a la fuente de alimentación, la probeta queda en situación de ser ensayada.

En la figura 3.18 se muestra el montaje en serie de los dos trafos toroidales de potencia atravesados por los dos conductores que conforman el secundario de la instalación.

Composición de la estructura mecánica.

La sujeción de la probeta está constituida por dos torres que se caracterizan por ser apoyos autosoportados de disposición transversal triangular equilátera de 0,3 m de lado y



FIGURA 3.18: Acoplamiento de trafos toroidales para generar altas intensidades

1,5 m de altura. Están constituidas por perfiles tubulares de acero laminado, galvanizados en caliente y atornillados entre sí.

Estas torres están fijadas al edificio mediante pernos de M12 (12mm de diámetro) que han sido adheridos al hormigón estructural mediante tacos de resina endurecidos, conformando la cimentación del conjunto, en la figura 3.19 se muestra el tipo de torreta utilizado.

Esta estructura se vale de los herrajes necesarios (mordazas, aisladores, etc.) para ubicar en su correcta posición al conductor tipo LA-280 para llevar a cabo las medidas sin ningún tipo de dificultad.

Estos herrajes conformes a la UNE-EN 62217 y UNE-EN 61109 y complementariamente a las indicaciones de la compañía suministradora y el reglamento electrotécnico de Líneas Eléctricas de Alta Tensión.



FIGURA 3.19: Torreta sujeción de 1,5m de altura y 0,3m de lado

Los aisladores compuestos están constituidos, por un núcleo resistente dieléctrico, protegido por un revestimiento polimérico. Alrededor del núcleo se moldean una serie de aletas o platos que aseguran la línea de fuga especificada.

Los extremos del aislador disponen de herrajes metálicos solidarios con el núcleo, cuyo conjunto, así formado, soporta las cargas mecánicas especificadas en la tabla 3.14.

TABLA 3.14: Herrajes para líneas aéreas en Alta Tensión

Nivel de tensión de red	Carga mecánica específica (kN)	Momento torsión ($daN \cdot m$)	A. F.I. Bajo lluvia (KV)	Con onda de impulso (KV)
20	40/70	6	70	165
30	70	6	95	215
45	70	6	120	300
66	70	6	165	380
132	120	9	320	650
220	120/160	9/12	495	1000
380	160	12	750	1550

En el diseño de los aisladores se tiene en cuenta que las aletas que se tengan que disponer para cumplir con la línea de fuga exigida, deberán estar dispuestas en el centro del aislador o como mínimo alejadas de los herrajes 20 cm, con el objeto de que no impidan la colocación del elemento antiposada sobre el aislador.

Los aisladores, con las aletas dispuestas en posición de servicio, llevan los herrajes metálicos que son solidarios con el núcleo. El diseño y las dimensiones de los herrajes metálicos se establece en la UNE-EN 61466-1. De los diferentes niveles de cargas mecánicas especificadas (CME) que incluye la citada UNE-EN 61466-1, previstas para ser utilizadas con diversos tipos de acoplamientos, en la presente norma se toman cuatro niveles de CME (40, 70, 120 y 160) combinándolos con cinco familias de elementos de unión (rotula, alojamiento de rotula, anilla, horquilla en Y y lengüeta), conforme a lo dictado en las Normas siguientes:

- UNE 21009 para el acoplamiento rotula y alojamiento rotula.
- UNE 21128 para el acoplamiento tipo lengüeta.
- Anexo C de la norma UNE-EN 61466-1 para el acoplamiento tipo horquilla en Y.
- Anexo D de la norma UNE-EN 61466-1 para el acoplamiento tipo anilla.

El núcleo está constituido por fibra de vidrio reforzada, impregnada de resina Epoxi termoendurecida, resistente eléctrica y químicamente a los fenómenos de hidrólisis y resistentes a los ácidos en especial al nítrico NO_3H , que asegure el aislamiento y soporte los esfuerzos mecánicos producidos por los conductores de la línea.

El revestimiento del núcleo y las aletas están fabricados con caucho de silicona, con aditivos y elementos de relleno, totalmente libre de EPDM o de otros cauchos orgánicos.

Los herrajes metálicos cumplen con la norma UNE-EN 61284 y están constituidos por los siguientes materiales:

- Acero estampado o forjado, galvanizado en caliente.
- Tornillería (Horquilla en V), acero de alta resistencia galvanizado en caliente.

De esta forma en la figura 3.20 se puede observar como quedan implantados en el prototipo los distintos herrajes sujetando al conductor.



FIGURA 3.20: Composición de los apoyos y sujeciones del prototipo

3.2.4. Verificación de los equipos de medida de temperatura

Equipos de medida de temperatura con contacto

Para realizar la calibración del equipo en cuanto a medida de temperatura por contacto se refiere, se ha contado con la colaboración del Centro Español de Metrología (CEM).

El CEM aporta un puente de resistencias patrón de Platino que a su vez ha sido calibrado, aportando la correspondiente certificación e informe.

El procedimiento técnico de medida es identificado por el CEM como CEM-Pt-0004 y queda descrito por esta entidad en los siguientes términos:

El puente de resistencias está compuesto por resistencias de valores nominales de $108,57\Omega$, $107,79\Omega$ y $107,02\Omega$, marca Paliba, modelo SPt 1, no de serie CEM-101 (4.2-16.19-0341).

El procedimiento es por comparación directa con patrones de 100Ω con trazabilidad al efecto Hall Cuántico del Centro Español de Metrología. Para el valor de 0°C , lectura directa con multímetro con trazabilidad a los patrones de tensión y resistencia.

En la tabla 3.15 quedan plasmados las características del patrón de Pt-100 utilizado para calibrar el equipo de captación de datos.

TABLA 3.15: Características de la calibración del simulador de Pt-100

Parámetros del ensayo:	
Corriente de medida:	3 mA
Temperatura media de la resistencia durante la realización de las medidas:	108,57Ω, 107,79Ω y 107,02Ω (22,984 ± 0,033) °C (22,988 ± 0,033) °C y (22,991 ± 0,030) °C
Numero de medidas:	11, 11 y 10, respectivamente.
Fecha de realización de las medidas:	19 al 23 de febrero de 2016.

Este puente de resistencias patrón se conecta directamente al transductor donde se conectan los sensores de contacto cuando esté el equipo en explotación.

De esta forma, se parametriza y se corrige la medida por programa en el Datalogger directamente, quedando así corregidos los posibles errores intermedios derivados de la transmisión de la señal, tarjetas analógica y el resto de la electrónica intermedia.

Calibración de la emisividad de la esfera y conductor.

Para justificar en primera aproximación la viabilidad del sistema de medida sin contacto se solicita al CEM un ensayo que incluya todos los agentes integrantes de este sistema de medida explicado en el apartado 2.5.

Se trata de la medida de la emisividad de unas muestras de conductor tipo LA-280 con su superficie en varios estados de envejecimiento y además un cuerpo térmico (esfera) que se acopla a dichos cables para mejorar la ventana de medida.

Se pretende confirmar de esta forma la viabilidad de la medida de la temperatura de dichos cables en el margen de 10°C a 90°C con el termómetro de radiación descrito en 3.2.3.

En este apartado, se justifica la relación entre la temperatura medida en la superficie de la esfera por termometría infrarroja y la temperatura en la superficie en un punto localizado al lado de la esfera.

Se aportan al Centro de Metrología las probetas sobre las que se realizarán los distintos ensayos, y es la entidad la que utiliza sus equipos de medida, para confirmar el comportamiento de los materiales en cuanto a emisividad se refiere.

En la tabla 3.16 se concretan las condiciones en las que queda instalado el termómetro de infrarrojos propiedad del CEM que utiliza en el ensayo.

TABLA 3.16: Montaje del termómetro de radiación

Datos del termómetro de radiación del CEM:		
Marca:		LAND
Modelo:		C300
Nº serie:		40002068
Banda de detección:		8 – 14 μ m
Tamaño del blanco:	4,5mm de diámetro a $d = 50$ cm	
Certificado de calibración:		132525001

Para las medidas de la temperatura de contacto por parte del CEM se ha utilizado una Pt100 conectada a un puente de medida de resistencias según se especifican en la tabla 3.17:

TABLA 3.17: Montaje de las resistencias de contacto

Datos de las resistencias de contacto Pt100:		
Marca:		ISOTECH
Nº serie:		191140/1
Puente de resistencias:	marca ASL, modelo F700	
Número de serie del puente		005865/09
Certificado de calibración de la Pt100 :		132564001
Certificado de calibración del puente:		141034002

Para realizar las medidas se ha desarrollado el siguiente método:

Las muestras se han pintado en una zona con pintura de alta emisividad (Nextel), ver figura 3.21 de forma que tienen una zona con una emisividad alta y conocida.

Se ha medido la temperatura de contacto con una Pt100 calibrada sujeta a la muestra cerca de la zona de medida.

A la vez se ha medido la temperatura de radiación con el termómetro de radiación (TR) en la muestra enfocando en la zona pintada y la zona sin pintar (véase figura 3.21).

En la figura 3.22 se muestra como el termómetro de infrarrojos del laboratorio toma muestras de temperatura en las distintas zonas del conductor.

De esta forma, comparando las temperaturas medidas por el termómetro de infrarrojos, se pueden deducir los valores de las distintas emisividades.

En las figuras 3.23 se muestra lo diferente que es la emisividad del cable nuevo con respecto a la del conductor viejo.



FIGURA 3.21: Muestras donde se observa las zonas que han sido pintadas con Nextel



FIGURA 3.22: Medida de la temperatura de radiación de las muestras con el termómetro C300

Se observa que las temperaturas de radiación tomadas a emisividad $\epsilon = 1$ y las tomadas por contacto son muy parecidas, no siendo así la tomada por radiación del conductor nuevo. Esto significa que la emisividad del conductor es diferente de la unidad.

En la medida de temperatura en el cable usado como se muestra en la figura 3.24, se detecta que la medida por contacto, por radiación a emisividad unidad y la del conductor son parecidas, lo que quiere decir que la la emisividad del conductor usado es muy parecida a la unidad.

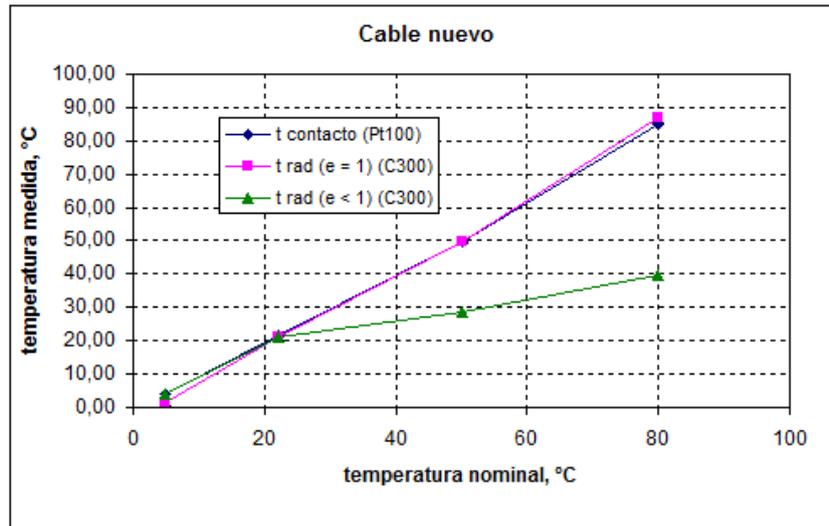


FIGURA 3.23: Lectura de temperatura del cable nuevo

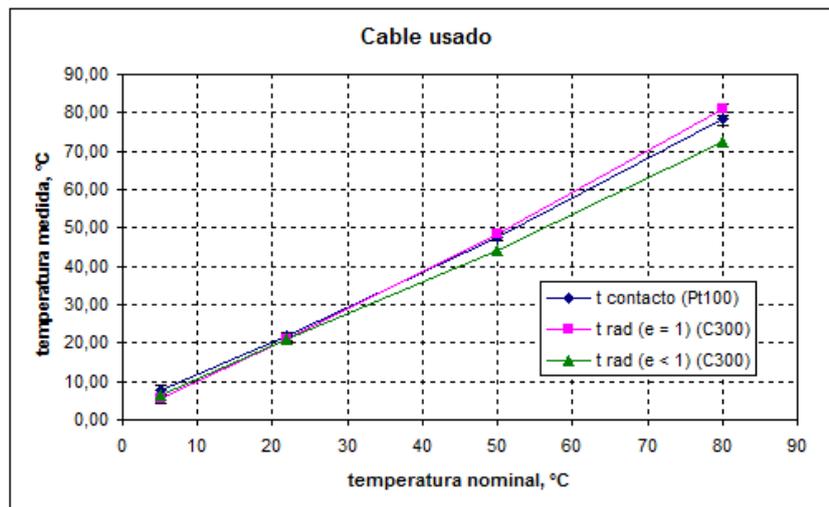


FIGURA 3.24: Lecturas de temperatura del cable usado

Tomando la temperatura en la esfera se observa como se muestra en la figura 3.25 que la emisividad en esta es constante y cercana a la unidad.

La presentación de resultados se puede observar en la tabla 3.18 donde se muestran las temperaturas de contacto y de radiación medidas con la Pt100 y con el TR (en la zona pintada y en la zona sin pintar).

El parámetro σ es la estabilidad en temperatura obtenida durante las medidas. U incluye la incertidumbre de calibración y medida de los patrones utilizados, σ y la diferencia entre la medida de la temperatura de contacto y la medida de la temperatura de radiación en la zona pintada (error sistemático estimado).

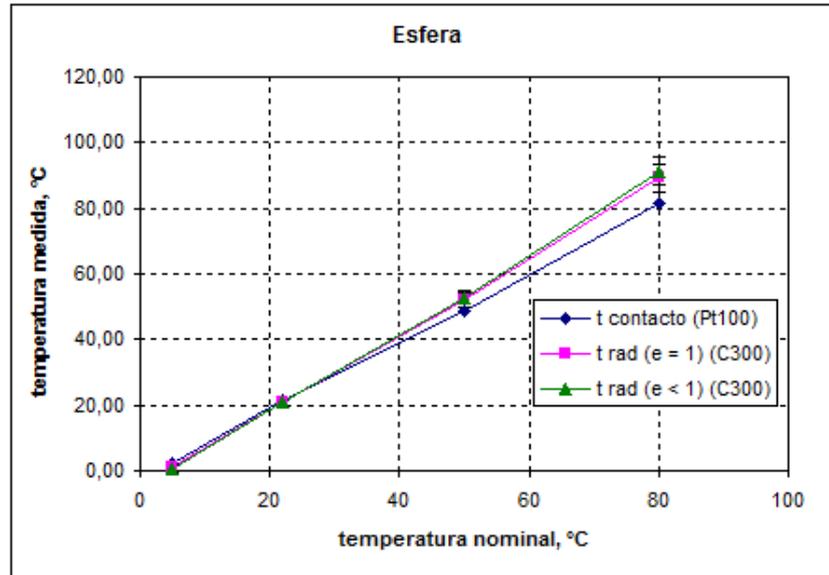


FIGURA 3.25: Temperaturas esfera

TABLA 3.18: Medidas de temperatura de contacto y de radiación

Muestra	$t_{nominal}$ °C	$t_{contacto}$ °C	σ , °C	t_{rad} ($\epsilon = 1$) (C300 - nextel)	σ , °C	t_{rad} ($\epsilon < 1$) (C300 - material)	σ , °C	$t_{cont} - t_{rad}$ $\epsilon = 1$ °C	$t_{cont} - t_{rad}$ $\epsilon < 1$ °C	$t_{rad, (\epsilon=1)} - t_{rad, (\epsilon<1)}$ °C	U , °C
Cable nuevo	5	3,89	0,06	1,70	0,07	4,10	0,14	2,19	-0,21	-2,40	1,40
	22	21,84	0,03	20,90	0,04	21,00	0,04	0,94	0,84	-0,10	0,70
	50	49,92	0,03	50,00	0,05	28,70	0,03	-0,08	21,22	21,30	0,50
	80	85,12	0,10	86,70	0,08	39,90	0,05	-1,58	45,22	46,80	1,10
Cable usado	5	7,55	0,16	5,70	0,10	6,50	0,05	1,85	1,05	-0,80	1,20
	22	21,94	0,03	21,10	0,04	21,10	0,04	0,84	0,84	0,00	0,70
	50	47,50	0,13	48,30	0,08	44,30	0,07	-0,80	3,20	4,00	0,70
	80	78,43	0,14	80,90	12,00	72,50	0,07	-2,47	5,93	8,40	1,60
Esfera	5	2,47	0,09	0,90	0,07	0,50	0,05	1,57	1,97	0,40	1,10
	22	21,73	0,03	20,80	0,04	20,80	0,05	0,93	0,93	0,00	0,70
	50	48,55	0,06	52,20	0,09	52,90	0,06	-3,65	-4,35	-0,70	2,20
	80	81,76	0,03	89,20	0,17	91,40	0,06	-7,44	-9,64	-2,20	4,30

En las columnas 9, 10 y 11 de la tabla 3.18 se han obtenido las diferencias entre las temperaturas de contacto medidas y las temperaturas de radiación para $\epsilon = 1$ (es decir, medida hecha en el Nextel) y para $\epsilon < 1$ (es decir, medida hecha en el material sin pintar) y las diferencias entre las dos temperaturas de radiación medidas.

Como se puede ver en la figura 3.25 anterior, las mayores diferencias entre las temperaturas la temperatura real de la muestra (temperatura de contacto y temperatura de radiación para $\epsilon = 1$) y la temperatura de radiación medida en la muestra ($\epsilon < 1$) son para el cable nuevo. Esto se puede ver más claramente viendo las diferencias entre, p. e., la temperatura de radiación para $\epsilon = 1$ y para $\epsilon < 1$ en la figura 3.26.

En la figura 3.26 además se pueden ver que las diferencias están dentro del margen de unos 10 °C para el cable usado y para la esfera para las muestras suministradas a las temperaturas de 5°C, 22°C, 50°C y 80°C., mientras que son de hasta 45 °C en el caso del

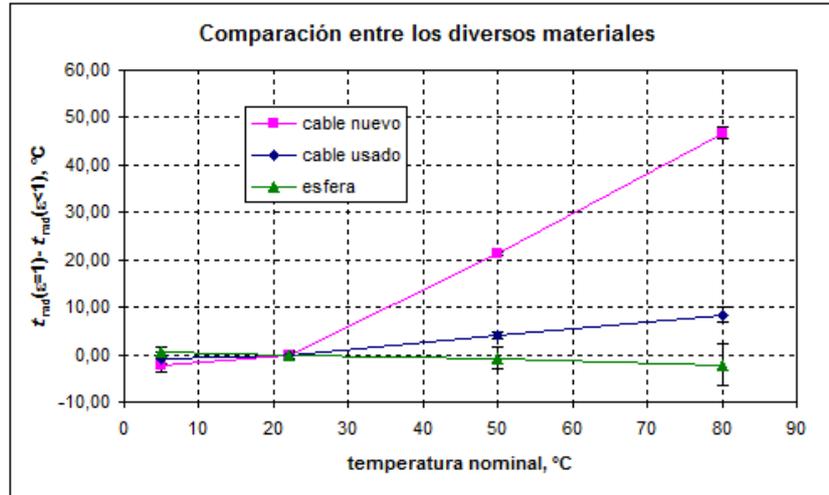


FIGURA 3.26: Diferencias entre la temperatura de radiación medida en la zona pintada con Nextel y la zona sin pintar

cable nuevo. Esto significa que las emisividades del cable usado y de la esfera son próximas a 1 mientras que en el caso del cable nuevo la emisividad es muy baja.

Se pueden estimar los valores de emisividad de las muestras utilizando el TR patrón, cambiando en el equipo el valor de emisividad para reproducir las diferencias de temperatura anteriores. Los resultados obtenidos son:

TABLA 3.19: Resultados de emisividad a la que debe ajustarse el TR

Muestra	$t_{nominal}$ °C	$t_{contacto}$ °C	$t_{rad}(\epsilon = 1), ^\circ C$ C300 – Nextel	$t_{rad}(\epsilon < 1), ^\circ C$ C300 – material	Emisividad	
					C300 $t_{contacto}, \epsilon = 1$	C300 $t_{nextel}, \epsilon = 1$
Cable nuevo	5	3,89	1,70	4,10	0,99	0,88
	22	21,84	20,9	21	-	-
	50	49,92	50	28,7	0,52	0,52
	80	85,12	86,7	39,9	0,47	0,46
Cable usado	5	7,55	5,70	6,50	0,93	0,96
	22	21,94	21,10	21,10	-	-
	50	47,50	48,30	44,30	0,89	0,86
	80	78,43	80,90	72,50	0,88	0,84
Esfera	5	2,47	0,90	0,50	0,90	0,98
	22	21,73	20,80	20,80	-	-
	50	48,55	52,20	52,90	0,85	0,87
	80	81,76	89,20	91,40	0,82	0,95

En la tabla 3.19 se presentan las emisividades a las que debe ajustarse el sensor IR para lograr las diferencias de temperatura obtenidas entre la temperatura de contacto y la medida de la temperatura de radiación en el material y entre la temperatura de radiación en el Nextel y la temperatura de radiación en el material.

Como resultado de todos estos ensayos se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Hay errores sistemáticos en el método de medida utilizado, ya que la medida de la temperatura de contacto y la medida de temperatura en la zona pintada con Nextel debería de ser la misma. Estos errores pueden deberse a la falta de homogeneidad en la temperatura a lo largo de la muestra, a las pérdidas por conducción en la Pt100, etc.

Se podría estimar este error como la diferencia entre las dos medidas de temperatura (columna 11 de la tabla 3.18: $(t_{cont} - t_{rad})_{(\epsilon=1)}$), que se ha tenido en cuenta en el valor de U en la tabla 3.18(Última columna) y en las gráficas representadas.

- En el caso de la esfera, estas diferencias son mayores para las temperaturas mayores que t_{amb} , y pueden deberse a errores debidos a la medida de superficies curvas con el TR.
- Los valores de emisividad son informativos y no se ha calculado la incertidumbre de dichos valores.

Como conclusión final se llega a que:

Las medidas realizadas de las temperaturas de las muestras con un TR en la banda de $8 - 14\mu m$ son próximas a las reales para el cable usado y para la esfera (diferencias de $0,8^\circ C$ a $8,4^\circ C$ en el margen de $5^\circ C$ a $80^\circ C$), no así para el cable nuevo (diferencias de $2,4^\circ C$ a $46,8^\circ C$ en el margen de $5^\circ C$ a $80^\circ C$).

Capítulo 4

Resultados.

En este capítulo se justifica la similitud de comportamiento del prototipo con el comportamiento de una línea en estado de explotación.

Además, se valida el sistema de medida de temperatura sin contacto como herramienta capaz de estimar la temperatura del conductor.

Como elemento complementario, se desarrolla una función de corrección que contrarresta el efecto de disipación térmica que ejerce la esfera y que ajusta valores de la temperatura real del conductor a partir de esta medida. Para esto se dispone de un conjunto de muestras extraídas del prototipo durante el periodo de un año.

4.1. Datos medidos para validar en el prototipo

4.1.1. Procedimiento de la toma de temperaturas por contacto

Entre el 01/08/2016 y el 05/06/2017, se ha mantenido el prototipo de medida en distintos estados de carga expuesto a los agentes atmosféricos, mientras se ha estado monitorizando su comportamiento.

A este conductor se le ha sometido durante ese periodo aleatoriamente a varios índices de carga entre un mínimo de 250 A hasta un valor máximo 680A.

Entre estas dos fechas se ha estado registrando su comportamiento con una cadencia de un minuto por muestra, se han obtenido un total de **235.226 muestras**, de las cuales por motivos de seguridad (apagado de instalaciones en periodos de no vigilancia y operaciones de mantenimiento) en los equipos de medida se han desechado del orden de un 30 %.

Es así que se cuenta con un total de **164.658 muestras válidas** y será sobre esta “nube de datos” sobre la que se trabajará para realizar el tratamiento estadístico y la interpretación de los distintos resultados aportados por el prototipo.

Se toman temperaturas por contacto directo en dos puntos del conductor. Uno de los puntos está ubicado en el centro del segmento del conductor, el segundo está ubicado al lado de la esfera que se utiliza para asegurar la cantidad de superficie de visión del haz del sensor, asegurándose la calidad de la medida del sensor IR.

El objetivo de estas dos ubicaciones es confirmar el efecto aleta que produce la esfera sobre el conductor. De esta forma se mide la deriva de temperatura entre el centro del segmento del conductor y la base de la esfera y entre la base de la esfera y la medida del sensor.

Estas medidas sirven para comprobar la coherencia de los datos que nos aporta el prototipo, y confirmar el comportamiento térmico del conjunto tal como el la etapa de diseño se previó con el modelo numérico.

En ambos casos la medida de temperatura por contacto, se toma desde una sonda tipo PT-100 fijada mediante una grapa de PVC al cable asegurando ésta mecánicamente con cinta vulcanizante en frío. Por otra parte, para mejorar el contacto térmico, se ha aplicado una crema conductora que asegura el contacto térmico del sensor con el conductor.

Se ha decidido este tipo de fijación para evitar el deterioro de la sonda y minimizar los efectos que pudiera tener sobre la medida el calentamiento por inducción, etc.

Además, el sensor se ha posicionado en dirección perpendicular al conductor, de forma que sea mínimo el efecto del campo magnético generado por la intensidad que atraviesa el cable sobre la conducción desde el dispositivo de medida hasta el transductor como se muestra en la figura 4.1.



FIGURA 4.1: Fijación del sensor de contacto sobre el conductor

Es obvio que teniendo este campo una frecuencia de 50Hz, no debe afectar a la medida, aunque sin duda alguna es posible que afecte eléctricamente a la conexión entrada de la sonda del transductor, pudiendo presentarse en este tensiones inducidas que pongan en riesgo su electrónica.

El procedimiento de medida de datos desde el sensor de contacto consiste en disponer en cada minuto de las temperaturas suministradas por la sonda descrita en 3.2.3.

El captador, tipo PT-100 envía mediante una línea de cable coaxial envía la señal de temperatura medida, proporcional a la resistencia eléctrica presentada según la curva característica de este tipo de sensores, que es linealizada en el transductor.

Este transductor que está, junto con el resto del equipo de monitorización, ubicado en un armario metálico localizado en el interior del habitáculo de servicio denominado “Gondola”, convierte la señal enviada por la sonda en una señal analógica de 0-5V.

La señal analógica producida por el transductor es enviada a un datalogger, donde se concentran las señales enviadas por los distintos sensores que conforman el sistema de monitorización del conductor. Estos sensores de medida incluyen los ubicados en la estación meteorológica y están caracterizados en 3.1.4.

Finalmente, el datalogger recoge los valores instantáneos aportados por la sensórica, los integra en periodos de un minuto, y los registra en una base de datos.

En la imagen 4.2 se puede ver el aspecto físico de este elemento de monitorización que por otra parte es imprescindible para el correcto tratamiento de los datos.



FIGURA 4.2: Datalogger utilizado para la recopilación de datos

De esta forma se obtiene una tabla de datos estructurada en los intervalos integrados de un minuto que es guardada en forma de libro EXCEL, a partir de la cual se realizan todos los trabajos de interpretación de los datos resultantes.

4.2. Análisis de los datos obtenidos por el prototipo y el modelo analítico

Los datos obtenidos por el prototipo están compuestos por los parámetros atmosféricos característicos (PAC) así como por la temperatura del conductor (T_c) medida por contacto.

De esta forma se analiza el comportamiento del prototipo ubicado en la terraza con respecto al modelo analítico.

Las muestras registradas incluyen los parámetros atmosféricos que participan en la ecuación de equilibrio térmico del conductor definidos en 3.1.5, de esta forma cada uno de los registros indicará la respuesta del prototipo a los elementos atmosféricos.

A su vez, los parámetros atmosféricos medidos en el prototipo, son utilizados como entradas en el algoritmo que reproduce el modelo analítico, comparando los resultados de uno y de otro.

En este apartado se hace un análisis de datos medidos por el prototipo ubicado a la intemperie en comparación con los obtenidos desde el algoritmo.

El cálculo analítico se desarrollará, en concreto teniendo en cuenta el procedimiento incluido en [CIG12b], registrándose las variables cada minuto y realizando el balance de energético con incrementos de tiempo de 1s.

El algoritmo es configurado asumiendo que el comportamiento del cable es dependiente del tiempo, de esta forma se conseguirá un registro de temperaturas que deberá prever el estado térmico del cable en cada minuto.

En este modelo analítico se introducen los parámetros obtenidos por los sensores, como son velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar, temperatura exterior, etc. De esta forma, se obtienen los resultados correspondientes a la temperatura del conductor que el modelo analítico prevé para cada caso y se pueden comparar con los obtenidos en el prototipo.

Esta es la herramienta utilizada para debatir el ajuste del prototipo, y justificar que representa el comportamiento de un conductor en estado de explotación real en campo.

De la totalidad de los datos obtenidos se desechan los casos en los que la velocidad del viento es menor de 1 m/s y aquellos en los que aunque el conductor está monitorizado, está sin carga eléctrica. Está justificado en [al17] que el algoritmo no se ajusta bien al comportamiento térmico del conductor con velocidades de viento menores de 1 m/s.

Después de haber eliminado todos los registros que cumplen esta condición, de un total de **164.658 muestras válidas**, el total disponible se reduce a una nube de **104.748 registros**, sobre los que se lleva a cabo el estudio para respaldar la validación del prototipo.

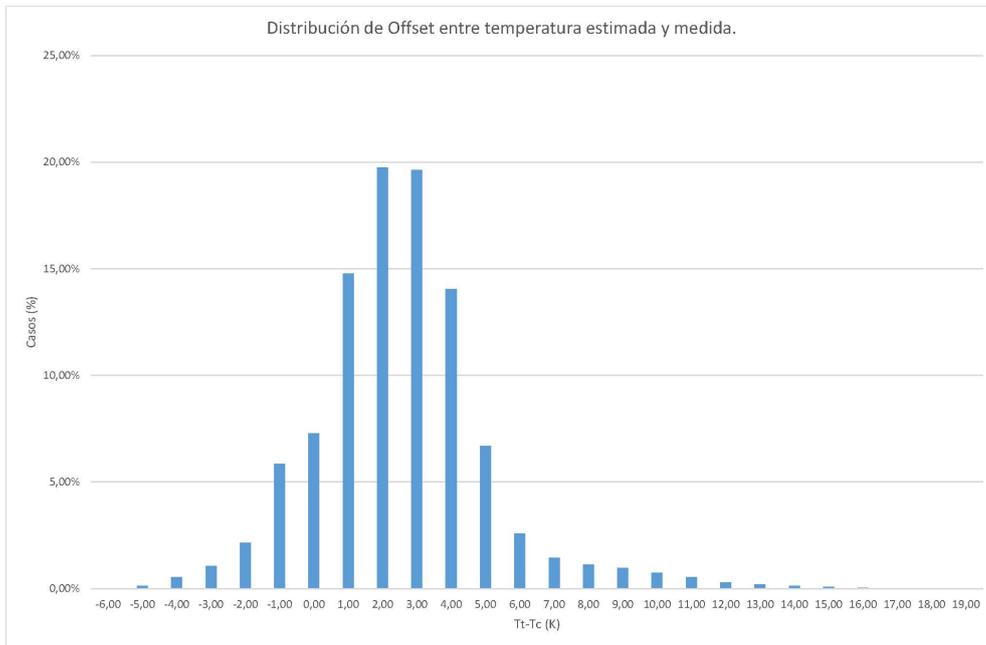


FIGURA 4.4: Distribución de casos según el offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo

En la campana de distribución en la figura 4.4 se presenta la distribución estadística de los valores de las diferencias entre la temperatura medida por contacto T_c y la temperatura devuelta por el modelo analítico T_t , de esta forma se puede observar el ajuste de los dos modelos y por tanto se podría justificar si los dos modelos se ajustan.

Esta representación se emplea para llevar a cabo un análisis, siguiendo los criterios incluidos en [C.04] y de esta forma poder avalar la hipótesis inicial, según la que se pretende verificar y validar que el prototipo realmente se comporta como un conductor en estado real de explotación.

$T_t - T_c$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Frecuencias (%)	0%	0%	1%	1%	2%	6%	7%	15%	20%	20%	14%	7%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Frecuencias acumuladas (%)	0%	0%	1%	2%	4%	10%	17%	32%	52%	71%	85%	92%	94%	96%	97%	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

TABLA 4.1: Distribución de frecuencias y frecuencias acumuladas

Como se muestra en la tabla 4.1, el número de casos con desviaciones menores de 5°C es del 92% del total de la muestra, así como que el número de casos en los que el algoritmo subestima la temperatura por debajo de -1°C es del 6%.

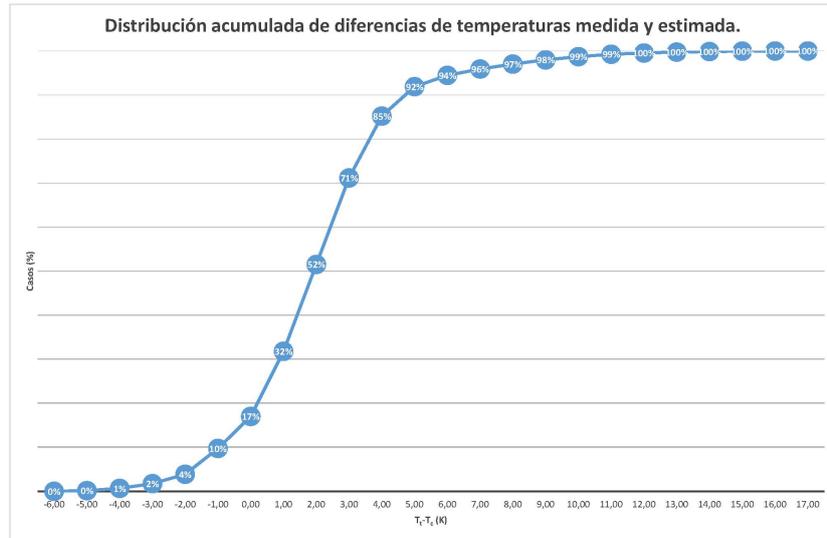


FIGURA 4.5: Distribución acumulada del offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo

El 40 % de los casos están en la horquilla de los +2 y +3°C, de forma que se puede asegurar que el algoritmo sobreestima en general la temperatura del conductor en +2,5°C, valor de la mediana de esta campana de distribución.

Por tanto se comprueba que el algoritmo en el caso del prototipo, partiendo de las medidas de cada parámetro, sobreestima la temperatura del conductor, en la misma proporción en que lo hacen los datos presentados sobre muestras reales en [al17].

Para estados de carga similares a los que se dan en líneas en explotación para este tipo de cable, se puede comprobar que todavía el ajuste del prototipo es mejor, como se representa en figuras 4.6 y 4.7.

Esta parte del estudio se realiza, aislando los casos en los que se le ha aplicado a la probeta una intensidad menor de 300A, de forma que el total del grueso de datos se reduce a una nube de 84.408 registros.

De esta forma, se pretende justificar que el prototipo, además de ajustarse al algoritmo, se ajusta al comportamiento real de un conductor en estado de explotación.

$T_c - T_e$	-6,00	-5,00	-4,00	-3,00	-2,00	-1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	
Frecuencias (%)	0,00 %	0,09 %	0,25 %	0,72 %	2,00 %	6,41 %	8,04 %	16,57 %	22,21 %	21,41 %	14,12 %	5,62 %	1,56 %	0,52 %	0,28 %	0,14 %	0,06 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Frecuencias acumuladas (%)	0 %	0 %	0 %	1 %	3 %	9 %	18 %	34 %	56 %	78 %	92 %	97 %	99 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

TABLA 4.2: Distribución de frecuencias y frecuencias acumuladas intensidad <300 A

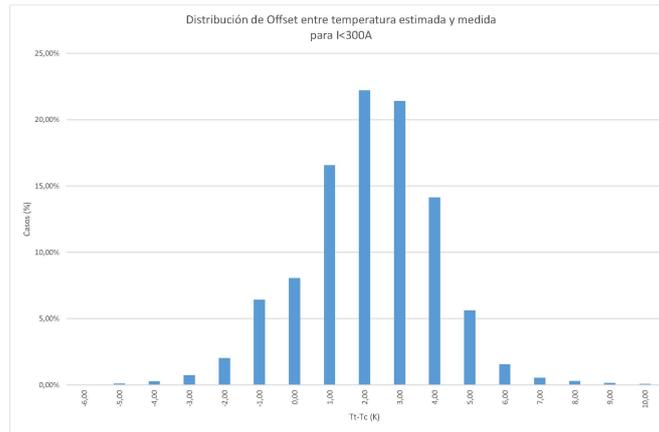


FIGURA 4.6: Distribución de casos según el offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo I<300A

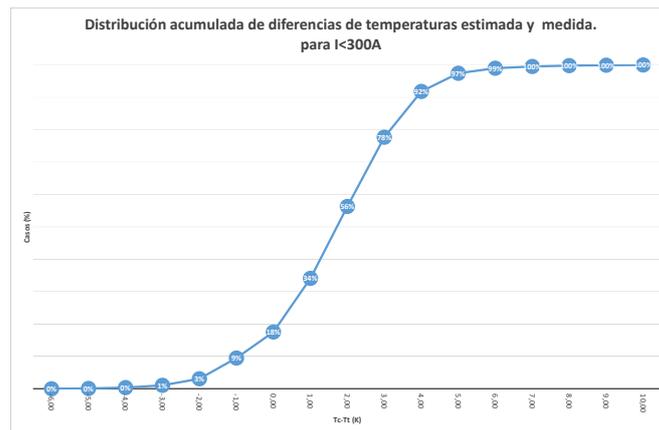


FIGURA 4.7: Distribución acumulada del offset de temperaturas entre modelo analítico y prototipo I<300A

Como se puede observar en la tabla 4.2 existe una mejora en el ajuste entre algoritmo y prototipo con respecto a la totalidad de los datos obtenidos, esto es así ya que se observa que los casos con una diferencia de temperaturas entre T_t y T_c menor de $+5^{\circ}\text{C}$ se esta vez en el 97% de los casos evaluados, aunque los casos en que el diferencial de temperaturas menor de -1°C pasa a ser de un 9% de los casos, los casos mas alejados de la mediana desaparecen prácticamente.

Para que quede mas clara esta reflexión, en 4.6, se muestra una representación de como se comporta el prototipo cuando se filtran datos por estados de carga similares a las presentadas en [al17].

Este hecho, se considera elemento diferenciador en esta tesis, ya que hasta ahora no se ha abalado el comportamiento de un prototipo con un algoritmo de previsión de ampacidad respaldado con datos tomados en campo.

En la figura 4.8 quedan reflejados los valores de:

- T_c temperatura de contacto.
- T_t temperatura teórica.
- T_a temperatura ambiente.
- I_c intensidad que circula por el conductor.
- U_w Velocidad del viento.
- R_s Radiación solar.

Se comprueba por tanto como la temperatura medida en el conductor sigue a la temperatura teórica calculada por el algoritmo en un día cualquiera de primavera, en este caso particular estamos hablando del 15 – 5 – 2017.

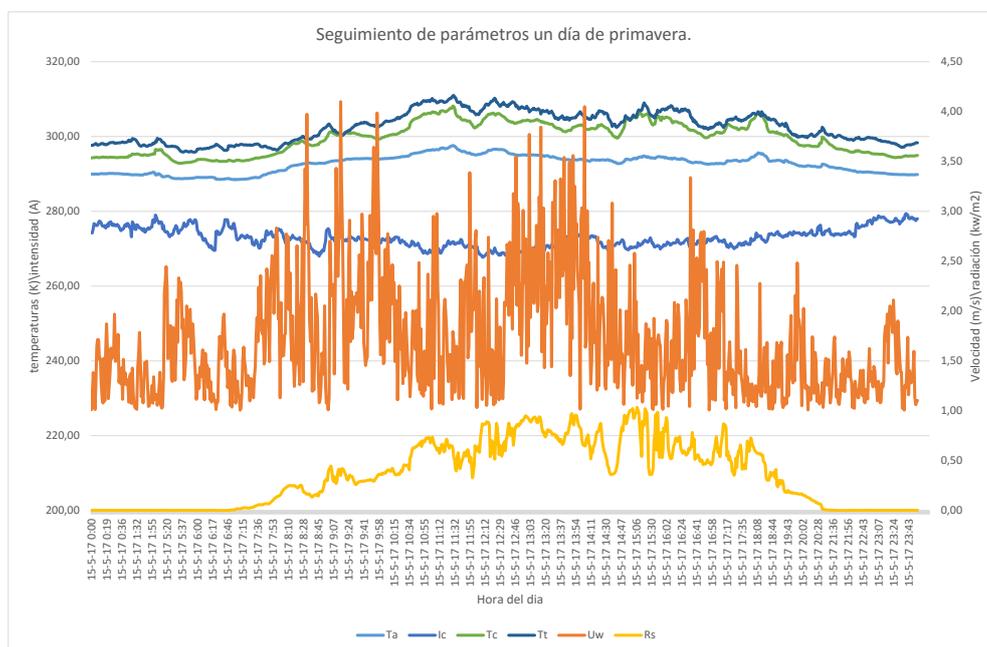


FIGURA 4.8: Seguimiento del tracking al prototipo

Se puede comprobar como se comporta la temperatura del conductor con la variación de cada uno de los parámetros que influye en el balance térmico, así como se puede verificar la aproximación de este comportamiento al estado real del conductor.

De hecho con una carga prácticamente de unos 270A, el seguimiento de las temperaturas teórica y captada realmente fiel en el tiempo en una horquilla de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.3. Datos y procedimiento de toma de muestras mediante el conjunto

En este caso se dispone del fondo de datos especificado en 4.1 contando con un total de **164.658 muestras válidas** con la diferencia de que para llevar a cabo este estudio.

De estas muestras se desecharán aquellas en las que el conductor no esté en carga, por no considerarse relevante este estado para el estudio pero a diferencia de 4.1, este será el único filtro en cuanto a la toma de datos se refiere, ya que en este caso se justificará la validez del conjunto de medida para bajas velocidades de viento también.

Es así que para este estudio, totalmente independiente del correspondiente a la validación del prototipo se cuenta con un total de **152.093 muestras válidas** y será sobre esta “nube de datos” sobre la que se trabajará para realizar el tratamiento estadístico y la interpretación de los distintos resultados aportados por el el conjunto de medida sensor IR-esfera-sonda de contacto.

El sistema de medida está definido en 2.5 y en este apartado se describe como se adquieren los datos se almacenan y se acoplan a los recogidos desde el datalogger.

Las características del sensor de medida se especifican en concreto en 3.2.3, además de estar caracterizado ya por sus especificaciones en cuanto medida de temperatura, en este apartado se caracterizará su interconectividad.

Finalmente, es un programa cliente el que se encarga de monitorizar los datos obtenidos por la unidad de medida y almacenarlos en forma de tablas continuas.

En la figura 4.9 se muestra como el programa muestra los datos enviados desde el Sensor.

El programa además del valor de la temperatura instantánea medida por el sensor TActual, nos presenta otros valores que también son importantes, sobre todo para monitorizar el estado del equipo, estos son:

- **TProceso:** Se refiere a la toma de temperatura del sensor después de haber sido procesada en el intervalo de tiempo programado.
- **TInterna:** Temperatura medida en el interior del SIR
- **TCaja:** Temperatura medida en el interior del driver.

El computador personal y el datalogger están sincronizados sobre el mismo reloj, de forma que se garantiza que cada uno de los registros grabados en la tabla de datos, coincide en el tiempo en las dos fuentes de datos.

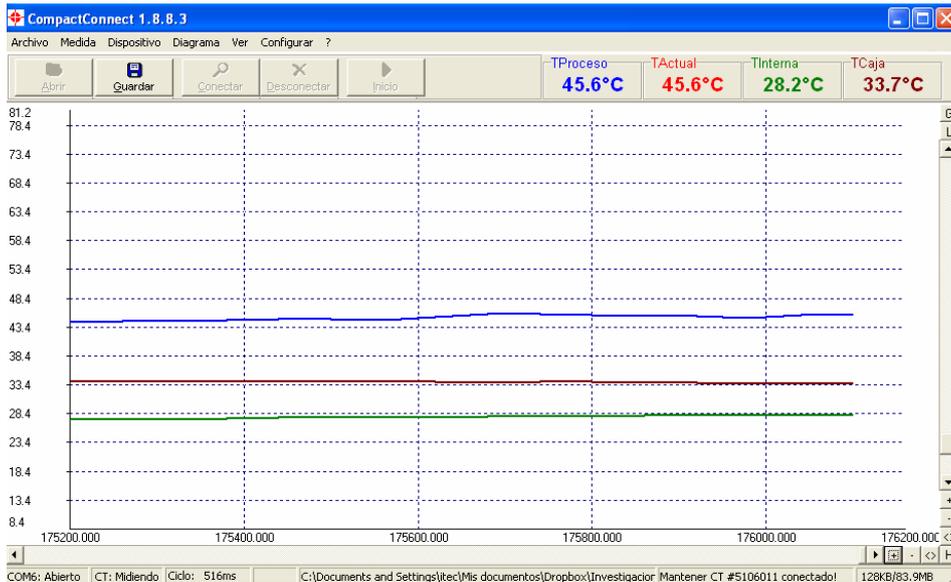


FIGURA 4.9: Programa cliente para captación de datos desde el sensor IR

En un tratamiento posterior, se sincronizan los registros obtenidos por ambas fuentes y de esta manera se graban como si de una fuente única se tratase.

Todo este sistema ha sido continuamente monitorizado en remoto para poder resolver cualquier incidencia sucedida que pudiera interferir en el correcto desarrollo del trabajo.

En la figura 4.10 se muestran los parámetros de configuración básicos que se le trasladan al sensor desde el programa cliente. Se configura asumiendo que la emisividad de la esfera es constante y de valor $\epsilon = 0,95$ y una transmisividad del medio ambiente (aire) también constante $\tau = 1$

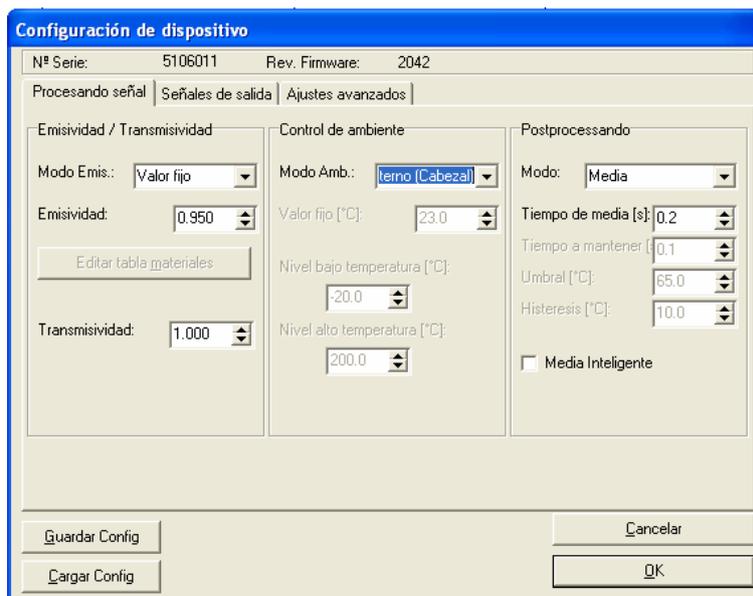


FIGURA 4.10: Parametros de configuración del cabezal (sensor IR)

Por otro lado, el control de temperatura ambiente se lleva a cabo mediante un sensor de temperatura incorporado en el interior del cabezal (sensor IR).

El postprocesado de la temperatura medida por el sensor IR está configurado de forma que adquiere una medida de temperatura cada 200 ms, es decir, para generar un registro, se toma el valor medio de las temperaturas adquiridas cada periodo de 1 minuto.

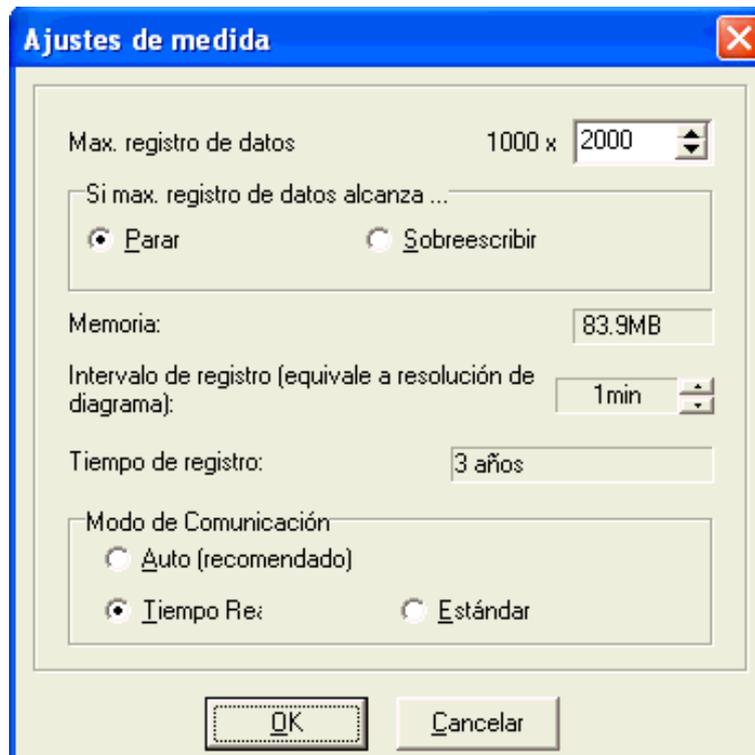


FIGURA 4.11: Parámetros de generación de la tabla de datos

Se ha configurado el generador de ficheros como se puede ver en 4.11 para almacenar un máximo de 2.000.000 de registros, cantidad de sobra para realizar la totalidad de la medida, con orden de parada en caso de llegar al límite (nunca sobreescribir). Cuando se llegue a este extremo, el fichero continuo de datos, debería ocupar una capacidad de memoria total de 83,9 Mbytes. Lógicamente, en ningún momento de la toma de muestras se llegará a este extremo, pero de esta forma se asegura la estabilidad en el funcionamiento del sensor IR.

En resumen, queda configurado el generador de ficheros de datos para grabar un registro cada minuto, tal como lo hace el datalogger, de forma que estando ambos equipos ajustados al mismo reloj, registran los datos que se interpretan en esta tesis.

4.4. Análisis de los resultados obtenidos por el conjunto sensor IR-esfera

En este apartado se muestran los resultados donde queda reflejado cual es el comportamiento del conjunto de medida con respecto a cada uno de los parámetros tomados por la estación meteorológica y medidos en el propio conductor.

Para ello, se comparan las medidas de temperatura registradas por el captador de infrarrojos y las medidas de temperatura en la sonda de contacto ubicada en el centro del conductor del prototipo.

En un primer estudio, se pretende aclarar si cada uno de los parámetros medidos afectan o no a la desviación de la medida y si es así, en que proporción lo hacen.

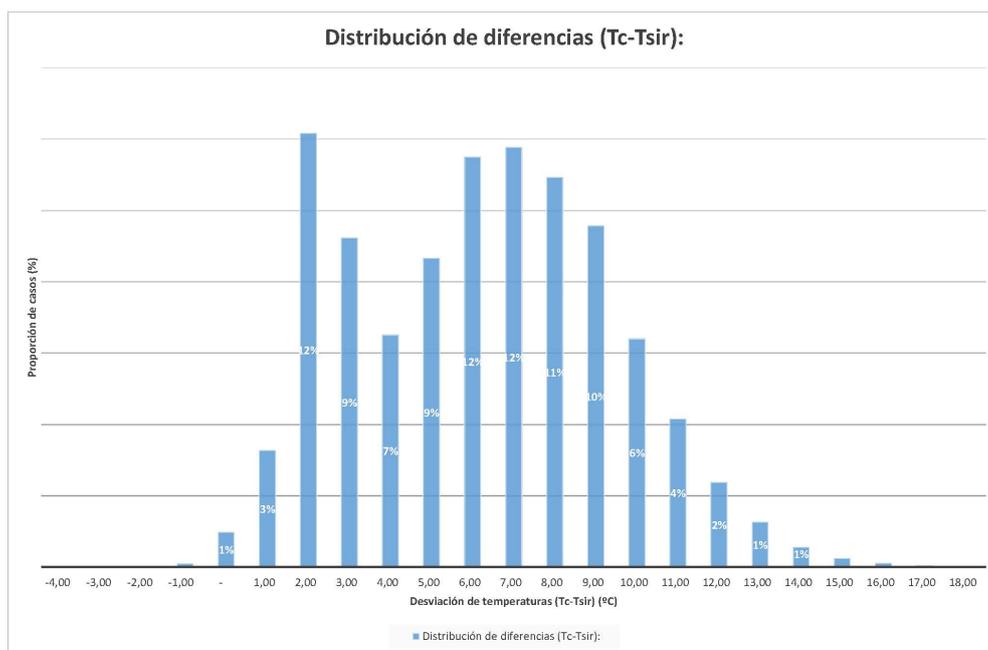


FIGURA 4.12: Distribución de diferencias de temperatura

Como representación inicial, en la figura 4.12 queda reflejada la distribución de frecuencias de la desviación de temperatura entre T_c y T_{sir} . Se muestran en este caso todos los registros incluidos en la base de datos correspondientes al conductor en estado de carga.

Para reafirmar estos datos, en figura 4.13 principalmente se puede constatar que las medidas tomadas mediante el sensor IR, son distintas y menores que las tomadas directamente por contacto en el conductor.

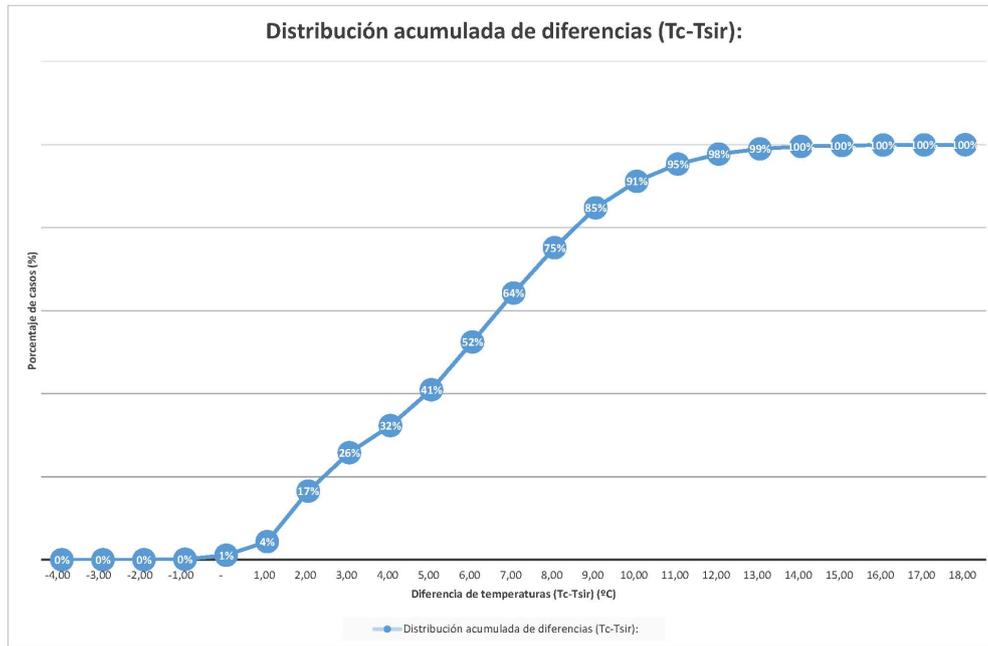


FIGURA 4.13: Distribución acumulada de diferencias de temperatura

$T_i - T_c$	-1,00	0	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir):	0%	1%	4%	16%	26%	32%	41%	53%	64%	75%	85%	91%	95%	98%	99%	100%	100%	100%
Distribución de diferencias (Tc-Tsir):	0%	1%	3%	12%	9%	7%	9%	11%	12%	11%	10%	6%	4%	2%	1%	1%	0%	0%

TABLA 4.3: Distribución de diferencias y distribución acumulada entre temperaturas de contacto e infrarrojos ($T_c - T_{sir}$)

De esta forma, como estaba previsto en el modelo numérico se manifiesta el enfriamiento que produce la esfera sobre el conductor.

En la tabla 4.3 se puede observar que solo el 4% de los casos presentan una desviación ($T_c - T_{sir}$) menor de 1°C, y el 26% de los casos están por debajo de los 3°C, el resto de los casos están por encima .

Por otra parte, se observa en estas distribuciones que de una u otra forma, las medidas tomadas en el sensor de IR están relacionadas con la temperatura real del conductor a través de los parámetros, medidos por el sistema de monitorización.

En este apartado, se trata de establecer si cada uno de estos parámetros tiene relación o no con la desviación observada en la medida de temperaturas y si es así, hasta que punto está ligado con cada uno de estos.

De esta forma, se podrá establecer una función de corrección a través de la cual y teniendo en cuenta la influencia de estos parámetros, se ajustará la temperatura del conductor en

un punto suficientemente alejado de la esfera.

4.4.1. Efecto del estado de carga sobre el comportamiento del conjunto sensor IR-esfera.

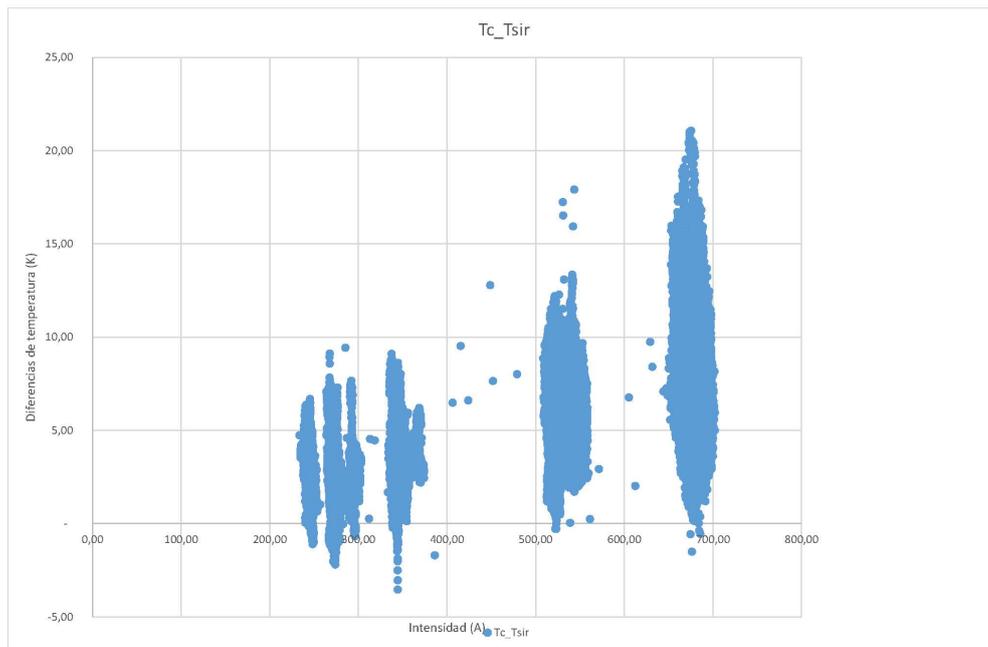


FIGURA 4.14: Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la intensidad

Como se puede observar en la figura 4.14 se detecta que dependiendo de el estado de carga del conductor, la desviación entre temperatura medida por contacto y con el sensor IR ($T_c - T_{sir}$) varían. De hecho, se puede observar que para intensidades de 680A, las diferencias de temperatura son mayores. También se puede observar que cuanto menor es la intensidad que atraviesa el conductor la diferencia entre temperaturas disminuye.

Para ver con mas claridad como se comportan estas diferencias de temperaturas, se han expuesto estos datos en forma de distribuciones acumuladas representando la proporción de casos, clasificando estas distribuciones por intensidades I_c . De esta forma se puede apreciar mejor como es el comportamiento térmico del conjunto con respecto a la intensidad que atraviesa el conductor.

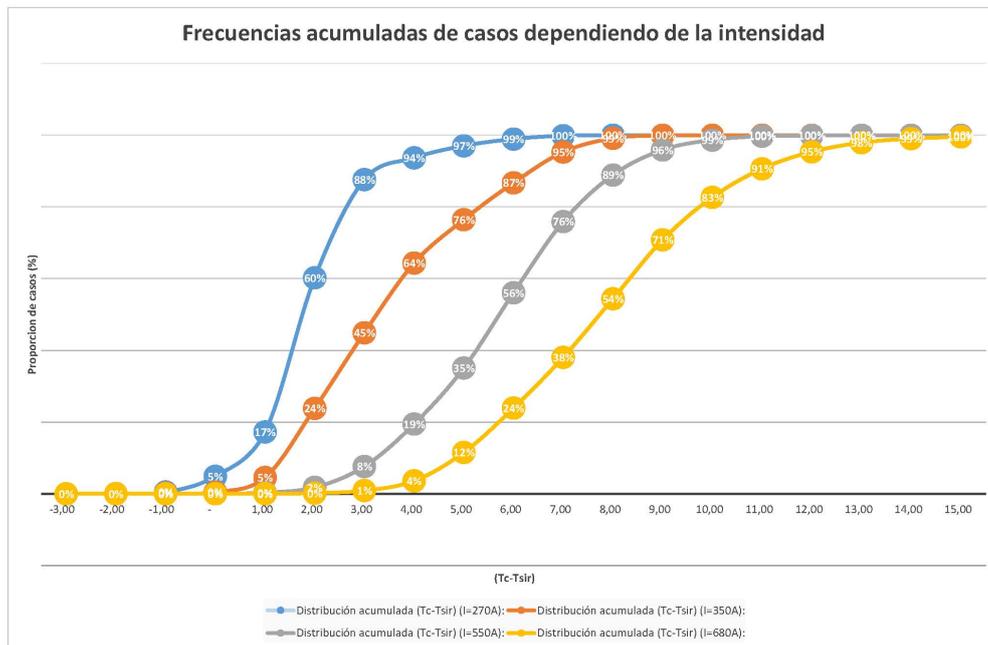


FIGURA 4.15: Comparativa de distribuciones de casos según estados de carga del conductor

(Tc-Tsir)	-1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00
Distribución acumulada (Tc-Tsir) (I=270A):	0%	5%	17%	60%	88%	94%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada (Tc-Tsir) (I=350A):	0%	0%	5%	24%	45%	64%	76%	87%	95%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada (Tc-Tsir) (I=550A):	0%	0%	0%	2%	8%	19%	35%	56%	76%	89%	96%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada (Tc-Tsir) (I=680A):	0%	0%	0%	0%	1%	4%	12%	24%	38%	54%	71%	83%	91%	95%	98%	99%	100%

TABLA 4.4: Distribuciones de casos ordenadas por intensidades

En la figura 4.15 quedan representados los valores acumulados separados por las distintas intensidades I_c a las que se ha sometido el conductor, en la tabla 4.4 se concretan los valores que conforman estos diagramas.

En la tabla 4.5 se observa que, con una intensidad de carga de 270A en un 99% de los casos la diferencia de temperatura medida entre la sonda de contacto y el sensor IR es menor de 6°C. Cuando la carga es de 350A esta misma proporción se da para los casos con diferencias menores a 8°C, para una carga de 550A esta proporción se da para diferencias de hasta 10°C, y en último lugar para 680A se llega con casos en los que se miden diferencias de hasta 14°C más en la sonda de contacto que en el sensor IR.

De esta forma queda justificado que la diferencia de temperaturas medida entre la sonda de contacto y el sensor IR entre otros parámetros depende directamente de la intensidad que atraviesa el conductor ocurriendo que esta es mayor cuanto mayor es la intensidad que atraviesa el conductor. Por esta razón la intensidad será uno de los parámetros a

Intensidad	$(T_c - T_{sir})$	Frecuencia
$< 270A$	$\leq 6^{\circ}C$	99 %
$350A \pm 5 \%$	$\leq 8^{\circ}C$	99 %
$550A \pm 5 \%$	$\leq 10^{\circ}C$	99 %
$680A \pm 5 \%$	$\leq 14^{\circ}C$	99 %

TABLA 4.5: Relación entre intensidad y $(T_c - T_{sir})$

incluir para evaluar una función de corrección.

Queda patente además, que el efecto de refrigeración de la esfera se deja ver mejor cuando el conductor está al máximo de la carga, es decir, cuando la energía que el conductor está evacuando por efecto joule es máxima.

4.4.2. Efecto del viento sobre el conjunto sensor IR-esfera

En la ilustración 4.16 se puede observar la clara influencia del viento en la diferencia de temperaturas medida entre la sonda de contacto y el sensor IR. En esta dispersión están incluidos todos los estados de carga.

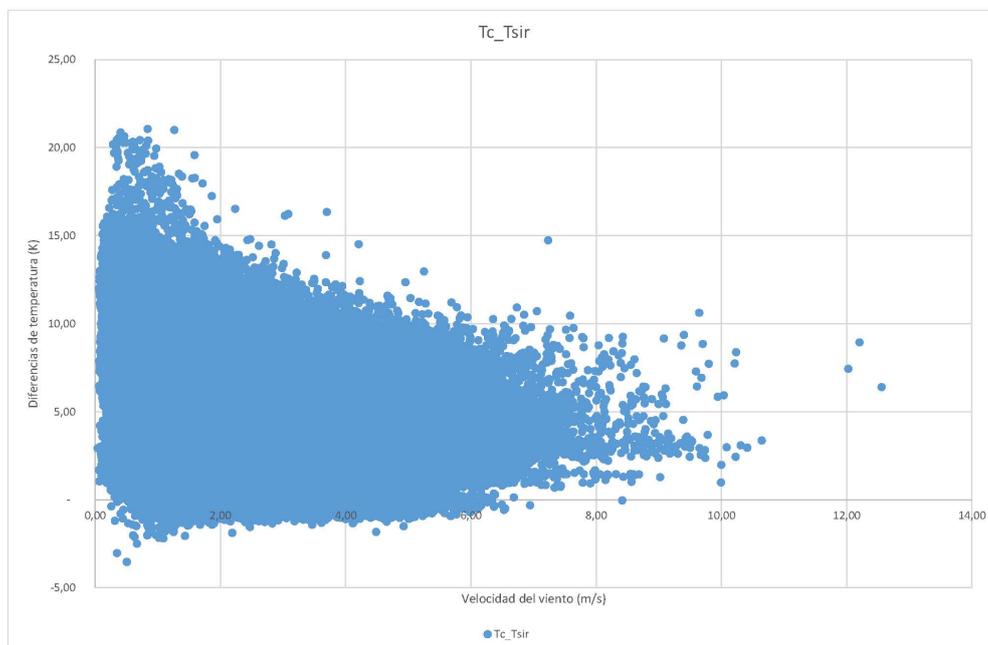


FIGURA 4.16: Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto al viento

Para poder hacer un análisis mas exhaustivo sobre la influencia del viento sobre el conjunto de medida, se hace necesario fijar la mayor cantidad de parámetros posible para evitar posibles interacciones entre ellos.

En este caso, un parámetro fácil de fijar es el estado de la carga del conductor. Se aislarán los casos en los que el estado de carga del conductor se traduzca en una diferencia máxima sobre las temperaturas medidas entre sonda de contacto y sensor IR.

En el estudio sobre la influencia del estado de la carga sobre la diferencia de temperaturas entre sensor IR y sonda de contacto se destaca que en el estado de carga de 680A es cuando la influencia de la intensidad se deja ver mejor. Es por esto que en este apartado se aíslan los casos en que el conductor tiene una carga de 680A, y se continua el estudio estadístico siendo variables el resto de los parámetros.

Aplicado este filtro, la muestra de cargas que cumplen esta condición ascienden a 75.339 registros de un total de 152.977.

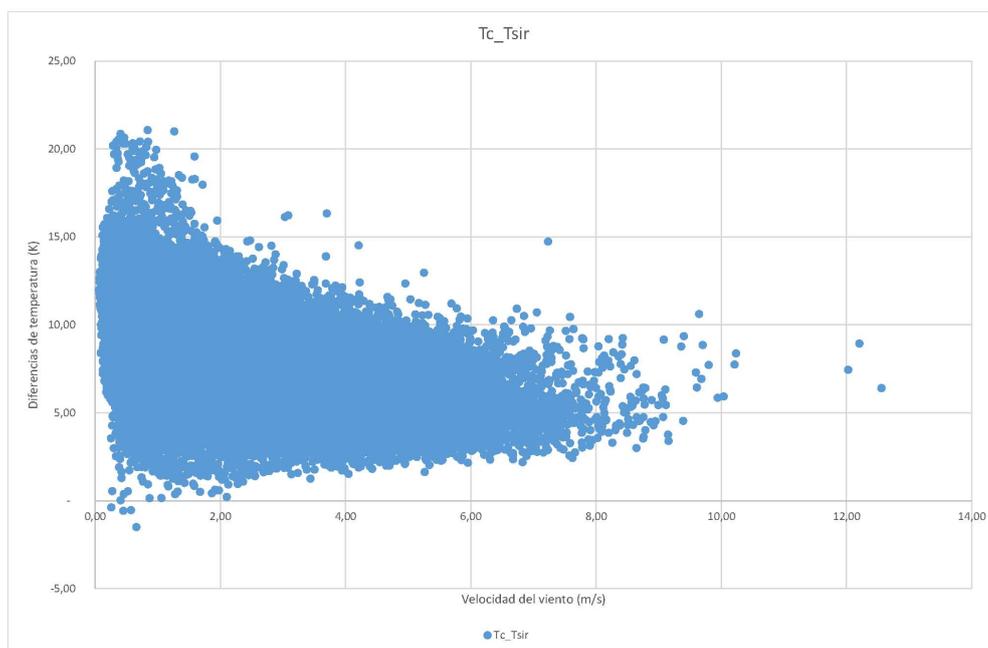


FIGURA 4.17: Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto al viento $I=680A$

En la figura 4.17 se puede observar como en el estado de carga referido de 680A, la dispersión sigue un patrón claro donde se puede observar que la diferencia de temperatura disminuye con el aumento de la velocidad del viento.

Para hacer un estudio mas detallado, se analiza la distribución de valores por tramos de velocidades del viento desde 0 m/s hasta el límite de velocidades captadas por el anemómetro de ultrasonidos como se puede obserar en 4.18.

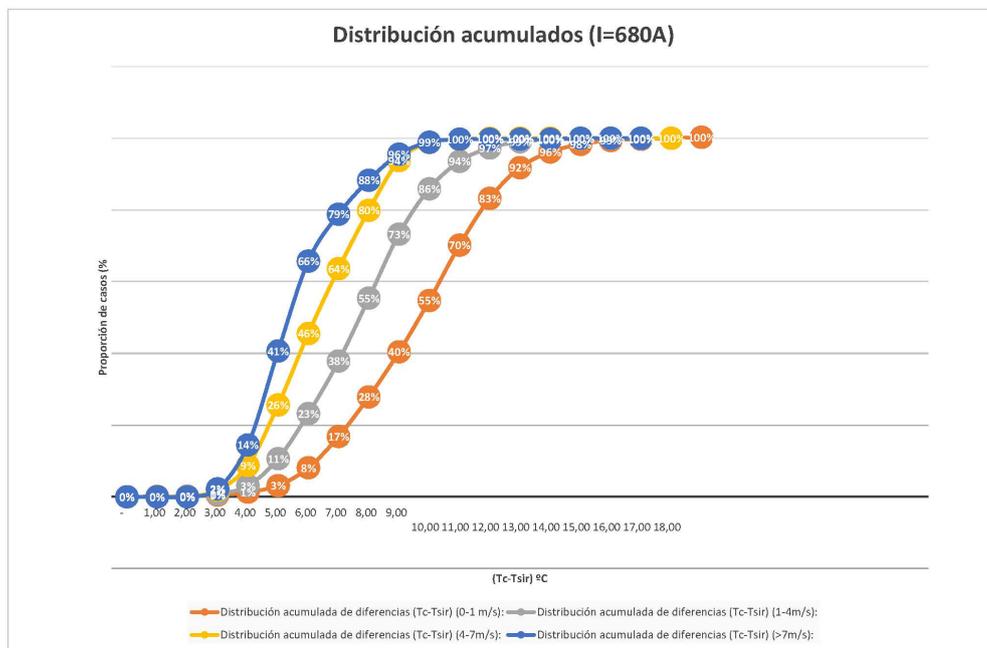


FIGURA 4.18: Distribución de casos acumulados en distintos tramos de vientos para una I=680A

(T _c - T _{sir})	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00
Distribución acumulada de diferencias (T _c -T _{sir}) (0-1 m/s):	0%	0%	0%	0%	1%	1%	3%	8%	17%	28%	40%	55%	70%	83%	92%	96%	98%	99%	100%
Distribución acumulada de diferencias (T _c -T _{sir}) (1-4 m/s):	0%	0%	0%	1%	3%	11%	23%	38%	55%	73%	86%	94%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (T _c -T _{sir}) (4-7 m/s):	0%	0%	4%	22%	34%	56%	72%	80%	85%	95%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (T _c -T _{sir}) (>7 m/s):	0%	0%	0%	2%	14%	41%	66%	79%	88%	96%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

TABLA 4.6: Distribuciones de casos ordenados por velocidades de viento para una I=680A

Intensidad	(T _c - T _{sir})	Frecuencia
0-1m/s	17 ^o C	99 %
1-4m/s	13 ^o C	99 %
4-7m/s	10 ^o C	99 %
>7m/s	10 ^o C	99 %

TABLA 4.7: Relación entre velocidades del viento y (T_c - T_{sir})

En la tabla 4.7 se pueden comprobar como los valores (T_c - T_{sir}) se comportan con la velocidad de viento con una frecuencia acumulada del 99 % de los casos. Los valores expresados en esta tabla aportan una imagen numérica de la dependencia tiene la desviación de temperaturas (T_c - T_{sir}) con la velocidad del viento (U_w).

4.4.3. Efecto de la radiación solar sobre el conjunto sensor IR-esfera sonda de contacto.

En este apartado se lleva a análisis la posible influencia de la radiación solar sobre la medida del conjunto, para este análisis se tienen en cuenta los casos en que la probeta no está cargada, es decir, $I_c = 0$.

De esta forma en la figura 4.19 se puede observar como se comporta térmicamente el conjunto con respecto a la radiación. No quedando claro el comportamiento del conductor en esta dispersión, se procede a analizar los datos discriminando por segmentos de radiación solar entre los siguientes casos:

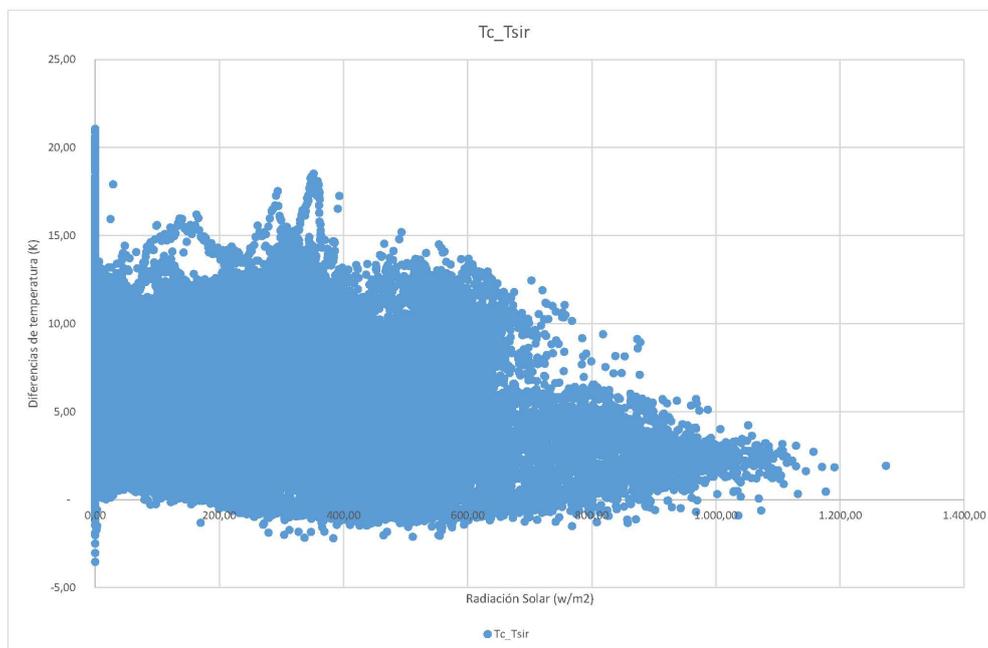


FIGURA 4.19: Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la radiación solar

- Radiación solar $0\text{W}/\text{m}^2$ (Casos en que la radiación solar es exclusivamente nula).
- Radiación solar hasta $250\text{W}/\text{m}^2$.
- Radiación solar entre $250\text{W}/\text{m}^2$ y $500\text{W}/\text{m}^2$.
- Radiación solar entre $500\text{W}/\text{m}^2$ y $750\text{W}/\text{m}^2$.
- Radiación solar a partir de $750\text{W}/\text{m}^2$.

En la figura 4.20 se ve con mas detalle el comportamiento del conductor con la radiación solar clasificada por índices de radiación solar. En concreto, se han realizado cinco curvas de valores acumulados atendiendo a los criterios anteriormente descritos, ordenadas por tramos de radiación, siendo esta la radiación detectada por la estación meteorológica.

Se intenta de esta forma, despejar la duda sobre si la radiación por si sola es susceptible de provocar desvíos en la medida.

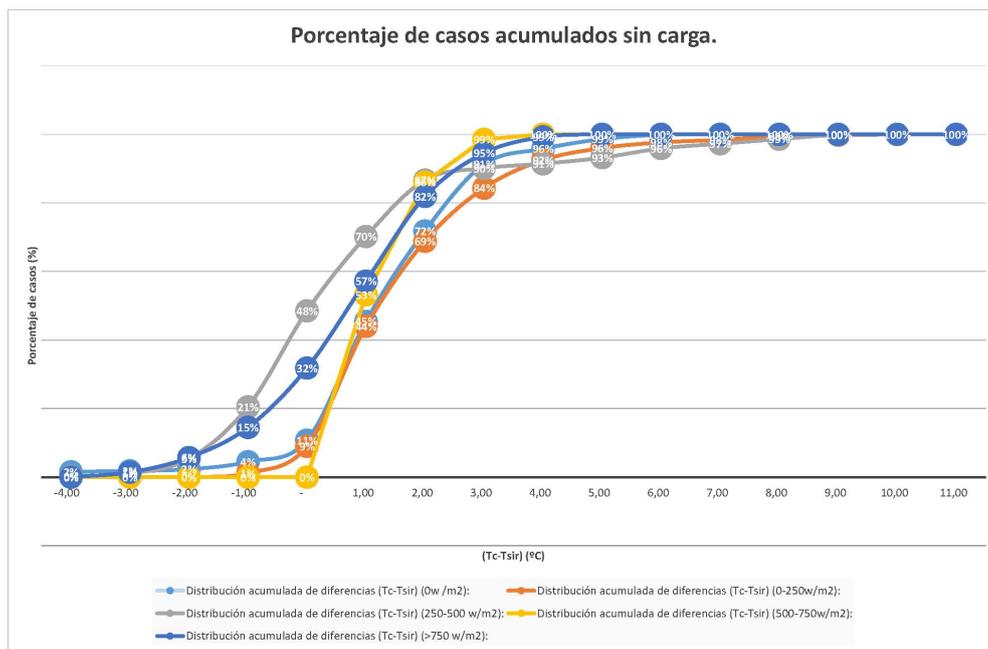


FIGURA 4.20: Distribución de casos acumulados en distintos tramos de radiación solar sin carga

(Tc - Tsr)	- 4,00	- 3,00	- 2,00	- 1,00	-	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsr) (0w /m2):	2%	2%	2%	4%	11%	45%	72%	91%	96%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsr) (0-250w/m2):	0%	0%	0%	1%	9%	44%	69%	84%	92%	96%	98%	98%	99%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsr) (250-500 w/m2):	0%	1%	5%	21%	48%	70%	87%	90%	91%	93%	96%	97%	99%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsr) (500-750w/m2):	0%	0%	0%	0%	0%	53%	86%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsr) (> 750 w/m2):	0%	1%	6%	15%	32%	57%	82%	95%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

TABLA 4.8: Distribución de casos clasificados por índices de radiación R_s

Queda reflejado en las gráficas de distribución y tabla con los respectivos porcentajes 4.20 y 4.8 que no se puede observar una relación clara sobre el efecto de la radiación sobre la desviación entre la medida del conjunto Sensor IR-esfera y la sonda de contacto.

Además, se esperaba de este resultado que se balanceara el desvío de la temperatura hacia la medida por el sensor de infrarrojos, previendo la posibilidad de que por efecto de la radiación, al tener la esfera mas superficie se calentara mas además se esperaba que la

radiación reflejada hacia el sensor, se hiciera presente y fuera detectada por el sensor IR enmascarando de esta manera la medida real.

Es por esto que en este caso no se incluirá el índice de radiación como variable explicativa, debido a que aunque se “sospecha” de su posible influencia en la medida, no se puede justificar su significación estadística en la medida.

4.4.4. Efecto de la temperatura ambiente sobre el conjunto sensor IR esfera-sonda de contacto.

En este apartado se lleva a análisis hasta que punto la temperatura medida en el exterior influye en la desviación de temperaturas entre la sonda de contacto y el sensor IR.

En la figura 4.21 se muestra una dispersión de casos con desviación de temperaturas ($T_c - T_{sir}$) frente a temperatura ambiente T_a .

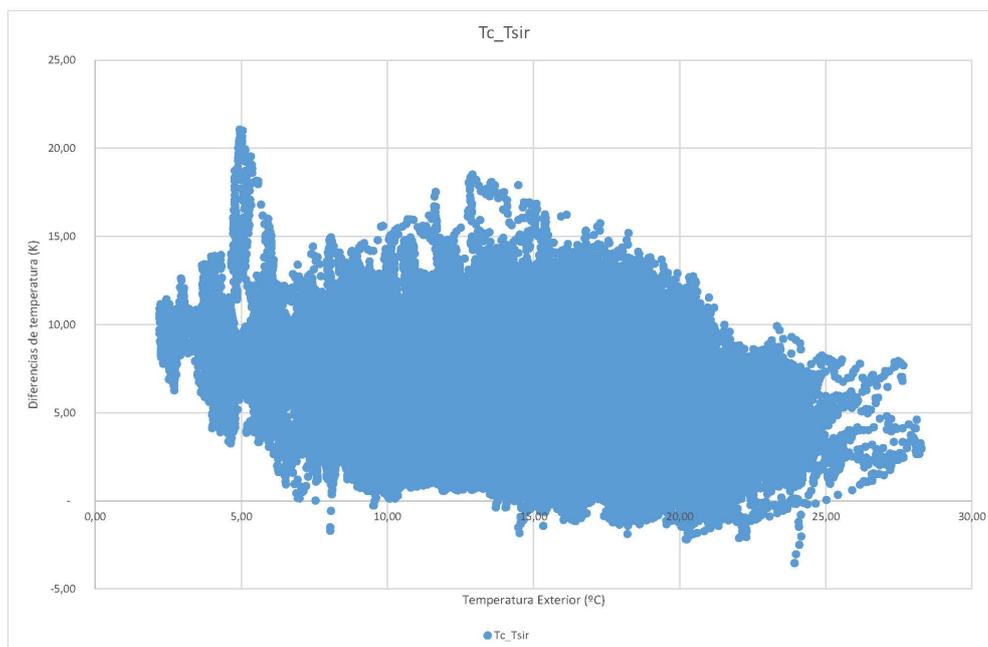


FIGURA 4.21: Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la temperatura ambiente

En este caso a priori no parece que se pueda presumir ninguna relación entre estos dos parámetros, esta dispersión no es clara a la hora de poder prever un resultado.

Para aclarar este aspecto, se analizan estados en los que el conductor está expuesto a diferentes temperaturas exteriores, pero la misma carga (en este caso $680A \pm 5\%$) para concluir si este parámetro (la temperatura ambiente T_a) se puede incluir entre los que afectan a la medida y poder prever en que grado.

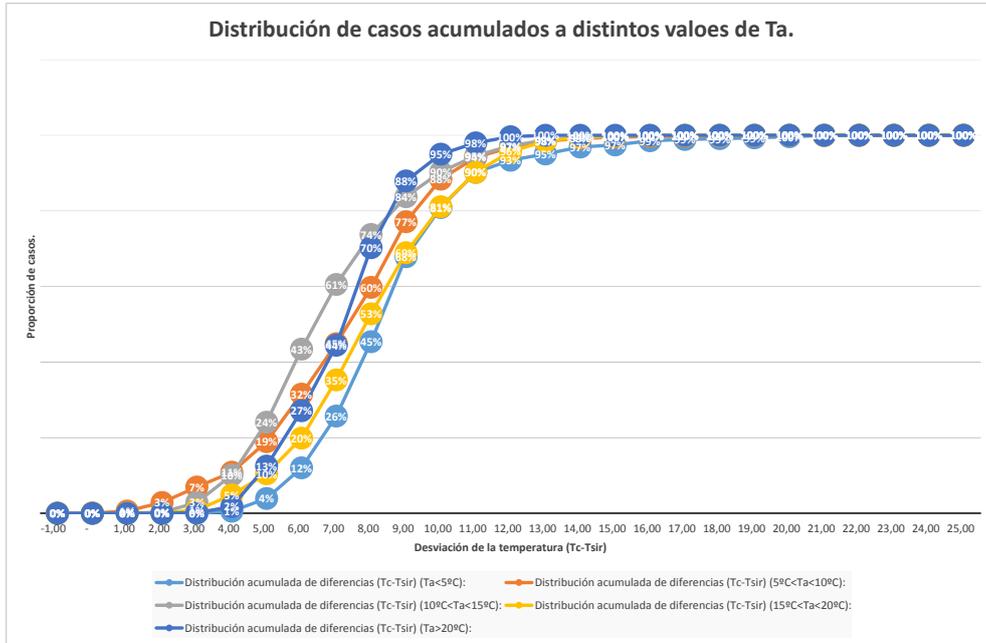


FIGURA 4.22: Distribución de casos acumulados en distintos tramos de temperatura exterior con $680 \pm 5\%$ de carga

En la figura 4.22 se puede observar como independientemente del valor de la temperatura ambiente a la que está expuesto el conductor, los valores acumulados de las desviaciones se refiere son parecidos.

$(T_c - T_{sir})$	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00		
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) ($T_a < 5^\circ\text{C}$):	0%	0%	0%	0%	1%	4%	12%	26%	45%	68%	81%	90%	93%	95%	97%	97%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) ($5^\circ\text{C} < T_a < 10^\circ\text{C}$):	0%	1%	3%	7%	11%	19%	32%	45%	60%	77%	88%	94%	97%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) ($10^\circ\text{C} < T_a < 15^\circ\text{C}$):	0%	0%	0%	3%	10%	24%	43%	61%	74%	84%	90%	95%	97%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) ($15^\circ\text{C} < T_a < 20^\circ\text{C}$):	0%	0%	0%	1%	5%	10%	20%	35%	53%	69%	81%	90%	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) ($T_a > 20^\circ\text{C}$):	0%	0%	0%	0%	2%	13%	27%	44%	70%	88%	95%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

TABLA 4.9: Valores de casos acumulados según temperatura ambiente T_a

En la tabla 4.9 se puede comprobar numéricamente los valores que de forma gráfica en 4.22 se muestra mas intuitivo.

Visto este comportamiento, se puede concluir que la desviación de entre el conjunto sensor IR-esfera y sonda de contacto no se ve afectado por la temperatura ambiente.

4.4.5. Efecto de la temperatura de la esfera sobre el conjunto

En la figura 4.23 se aprecia una relación entre la temperatura medida en la esfera y la diferencia entre la temperatura medida por el conjunto sensor IR-esfera y la sonda de contacto.

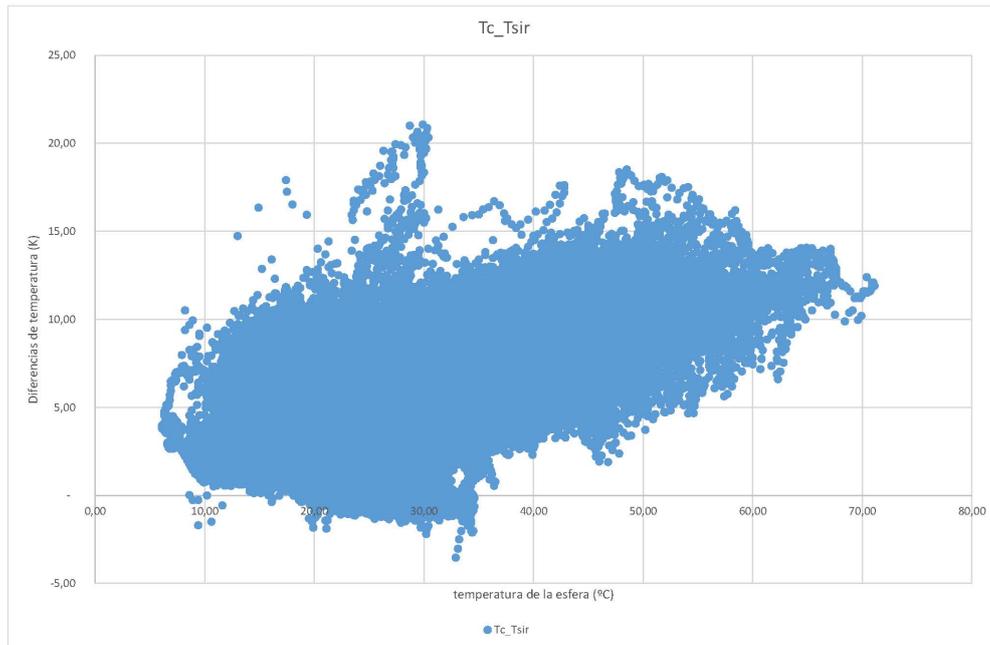


FIGURA 4.23: Diferencia de temperaturas entre la sonda de contacto (T_c) y el sensor IR (T_{sir}) con respecto a la temperatura de la esfera

Se observa que cuanto mayor es la temperatura medida en la esfera, mayor es la diferencia entre la temperatura medida por el sensor IR y la medida por la sonda de contacto, luego se pueden considerar variables dependientes.

El efecto aleta de la esfera queda patente en esta medida. Cuando la esfera está mayor temperatura, la cantidad de calor que evacua por convección es mayor.

Este calor es transmitido por conducción desde el conductor a la base de la esfera en contacto con él y liberado por la superficie de esta hacia el ambiente por convección, de ahí la proporcionalidad entre la T_{sir} y $(T_c - T_{sir})$. Cuanto mayor es la cantidad de calor liberada por la superficie de la esfera, mayor es el gradiente de temperatura al desde los puntos al rededor de esta que lo aportan.

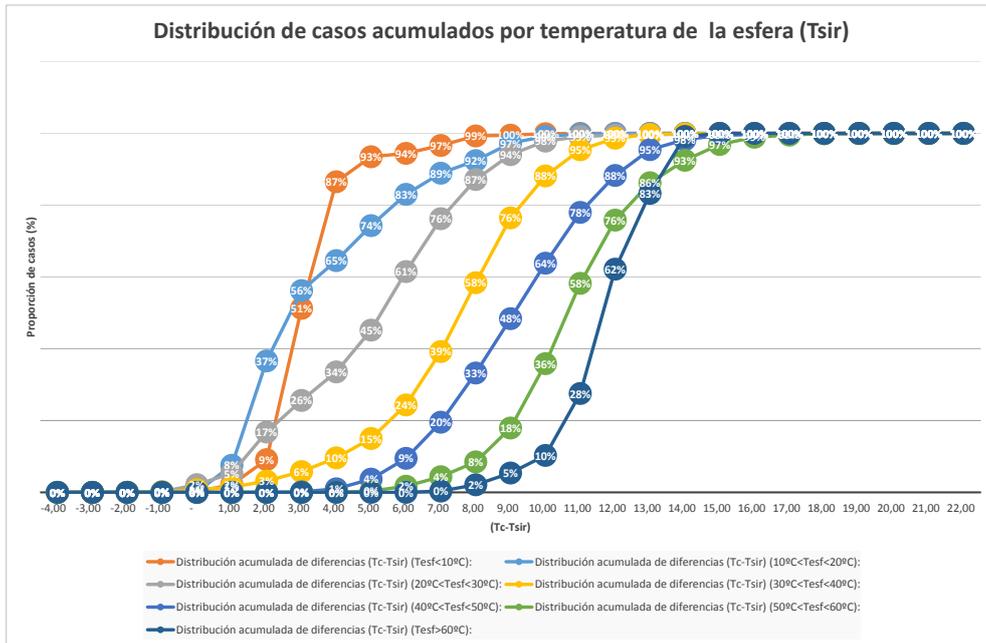


FIGURA 4.24: Distribución de casos acumulados en distintos tramos de temperatura de la esfera

$(T_c - T_{dif})$	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (Tdif<10°C):	0%	2%	9%	51%	87%	93%	94%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (10°C<Tdif<20°C):	0%	8%	37%	56%	65%	74%	83%	89%	92%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (20°C<Tdif<30°C):	2%	5%	17%	26%	34%	43%	61%	76%	87%	94%	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (30°C<Tdif<40°C):	1%	1%	3%	6%	10%	15%	24%	39%	58%	76%	88%	95%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (40°C<Tdif<50°C):	0%	0%	0%	0%	1%	4%	9%	20%	33%	48%	64%	78%	88%	95%	98%	99%	100%	100%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (50°C<Tdif<60°C):	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	4%	8%	18%	36%	58%	76%	86%	93%	97%	99%
Distribución acumulada de diferencias (Tc-Tsir) (Tdif>60°C):	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	5%	10%	28%	62%	83%	99%	100%	100%	100%

TABLA 4.10: Valores de casos acumulados según la temperatura de la esfera T_{sir}

4.4.6. Efecto de la inercia térmica de la esfera sobre el conjunto

En este apartado se estudia la posible dependencia de la desviación de temperaturas entre el conjunto sensor IR y la sonda de contacto ($T_c - T_{sir}$), con a la inercia térmica del cuerpo formado por la esfera.

El debate es sobre si la «masa térmica» de la esfera provoca que su temperatura presente un retardo en el tiempo sobre la temperatura del conductor.

Para aclarar este aspecto, se estudió el registro temporal de ambas temperaturas (T_c) y (T_{sir}), y en ningún caso se detectó retardo alguno de una medida con respecto a la otra, en la figura 4.25 se presentan los valores instantáneos de temperatura medidos mediante el conjunto sensor IR-esfera en °C y los medidos por la sonda de contacto en °C.

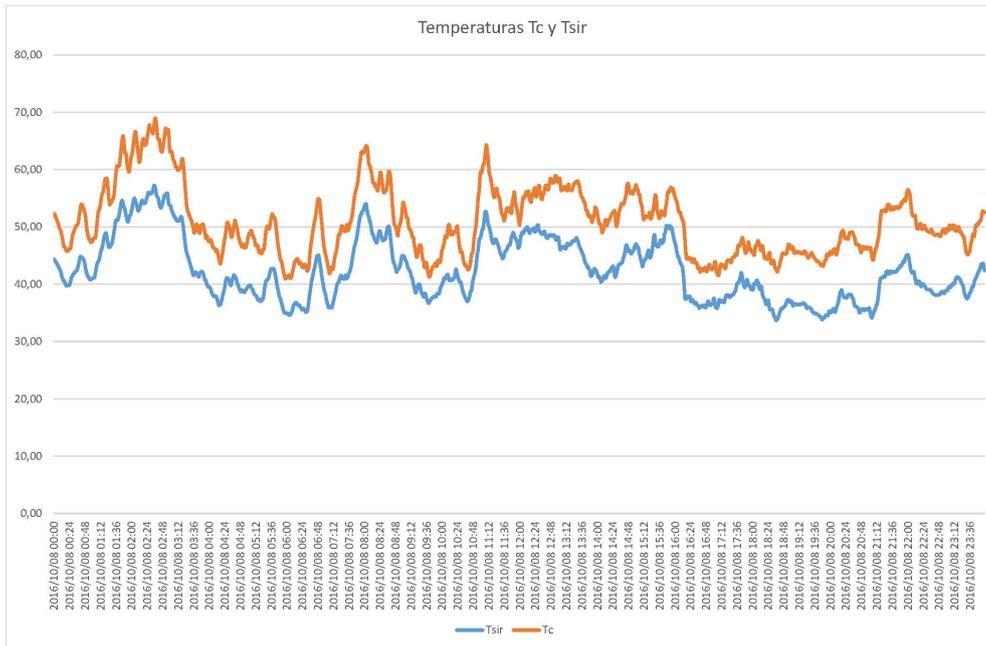


FIGURA 4.25: Registro de temperaturas del sensor IR y sensor de contacto durante el transcurso de un día

En la figura 4.25 queda reflejado como para un día cualquiera, las dos temperaturas difieren, y además se detecta que en un calentamiento de 25°C de temperatura la inexistencia de desfase en el tiempo queda fuera de discusión.

Es por esta razón que se concluye que no existe dependencia de ningún tipo entre la desviación de $(T_c - T_{sir})$ y el posible retardo provocado por la inercia térmica de la esfera.

4.5. Postprocesado de la señal del conjunto sensor IR esfera

Como resumen del apartado 4.4 queda determinado que hay un conjunto de parámetros medidos por el sistema de monitorización del prototipo que no afectan a la desviación de medida ($T_c - T_{sir}$) y otros de estos parámetros por otro lado que si afectan a esta desviación.

Se concluye que la desviación ($T_c - T_{sir}$) es dependiente de un grupo de tres parámetros o sus funciones como son los siguientes:

1. Temperatura de la esfera medida por el sensor IR. (T_{sir})
2. Intensidad que circula por el conductor. (I_c)
3. Velocidad del viento. (U_w)

Desechándose los demás en cuanto a la desviación de temperaturas entre medida del sensor IR y sensor de contacto se refiere.

Se busca una función que corrija esta desviación de forma que se disponga de valores fiables de temperatura en el conductor a través de este conjunto de medida sensor IR-esfera.

Se utiliza como herramienta para aproximar una función de corrección de valores una regresión lineal multivariable, que caracterice la dependencia lineal de la desviación de temperatura ($T_c - T_{sir}$) de cada una de las variables explicativas que participan en la corrección, es decir, se busca una línea base para caracterizar el comportamiento del conjunto, y así definir su funcionamiento cuando esté instalado en campo.

4.5.1. Definición de las variables explicativas.

En el apartado anterior se ha analizado cuales de los parámetros medidos en el prototipo se considera y no se considera explicativo. De esta forma se hace una selección de variables con las que concretar una función de corrección.

Toca ahora definir cuales van a ser las variables explicativas dentro de esta regresión lineal multivariable mediante la que se realizan las correcciones en la temperatura.

Para construir esta regresión (línea base), se consideran en forma de variables explicativas para esta regresión los elementos:

- Parámetros medidos directamente en el prototipo con relevancia física.
- Transformaciones de los parámetros medidos que tengan relevancia física.

Además lo harán en forma de constante.

- Errores sistemáticos acumulados en la medida de los distintos sensores puestos en juego m_{0err}^{sist} .
- Los que el análisis de la física indique en cada apartado.

Serán transformaciones de estos parámetros con relevancia física:

- U_w^2, U_w : Refrigeración por convección.
- I_c^2 : Calor generado en el conductor por efecto Joule.
- T_{sir}^4 : Transmisión de calor por radiación al ambiente.

Se justifica la significancia física de estas transformaciones en los siguientes apartados:

Generación de calor por efecto Joule

El calentamiento por unidad de longitud de un conductor debido al efecto Joule según [CIG12a] está definido por:

$$P_j = k_{sk} \cdot I^2 \cdot R_{dc}$$

Siendo la definición de los parámetros la siguiente:

- P_j : Potencia disipada por unidad de longitud.
- k_{sk} : factor de corrección que incluye el efecto piel.
- I : Intensidad que atraviesa el conductor.
- R_{dc} : Resistencia eléctrica del conductor en corriente continua por unidad de longitud.

Su influencia está ligada principalmente al fenómeno de transmisión de calor por convección en el conductor incluido en la definición del número de Grashof (Gr) como se explica en 4.5.1:

$$(T_c - T_{sir})_{I_c} = m_1 \cdot I_c^2 \tag{4.1}$$

Evacuación de calor por convección

El fenómeno de convección entre otros factores, depende del número de Prandtl. Este número es característico del fluido que refrigera y representa la relación entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor entre la capa límite de velocidad y la capa límite térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot C_p}{k_c} \quad (4.2)$$

Siendo la definición de los parámetros la siguiente:

- ν : Viscosidad cinemática.
- α : difusividad térmica.
- μ : viscosidad dinámica.
- C_p : Capacidad calorífica a presión constante fluido.
- k_c : Conductividad térmica del fluido.

En este caso, el fluido que refrigera es el aire y es común para la esfera y para el conductor, de forma que este parámetro no se considera relevante en el tratamiento del diferencial de medida ($T_c - T_{sir}$).

Además, se define el numero de Nusselt como la relación que se da entre transmisión de calor por convección y transmisión de calor por conducción.

$$Nu = \frac{h_c \cdot \Delta T}{k_c \cdot \frac{\Delta T}{l_{car}}} \quad (4.3)$$

Donde:

- h_c : Coeficiente de transmisión de calor por convección.
- k_c : Conductividad del fluido.
- ΔT : Diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo y la temperatura ambiente T_a .
- l_{car} : Longitud característica.

De forma que:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_c}{l_{car}} \quad (4.4)$$

Es decir, el número de Nusselt (Nu) depende del valor coeficiente de transmisión de calor por convección (h_c).

En general, estudio de la convección se basa en dos principios de la mecánica de fluidos:

- Conservación de la masa.

- Conservación de momento.

Y en un principio de la termodinámica.

- Conservación de la energía.

La evacuación de calor por convección además depende de otros factores según se esté hablando de convección natural o forzada.

Evacuación de calor por convección natural En evacuación de calor por convección natural el número de Nusselt es función de:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (4.5)$$

De forma que los tres principios mencionados en 4.5.1 cuando se trata de convección natural, están recogidos en el número de Grashof que sirve para determinar el coeficiente de transmisión de calor por convección (h_c) siendo de la forma.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot q_w \cdot l_{car}^3}{\nu^2} \quad (4.6)$$

Donde:

- g : Aceleración de la gravedad.
- β : Coeficiente de expansión volumétrica.
- l_{car} : Longitud característica.
- q_w : Cantidad de calor disipada.
- ν : cinemática.

En los casos en los que la convección natural predomina ($U_w \leq 1\text{m/s}$) se observa que el efecto aleta de la esfera se manifiesta de forma especial.

La relación entre las refrigeraciones depende esencialmente de la que hay entre la geometría de la esfera y del conductor, que lógicamente es constante durante la toma de datos.

Se puede concluir que cuando el fenómeno de convección natural predomina, la diferencia de temperaturas entre el conductor y la esfera depende de la relación de las geometrías del conductor-esfera y de la cantidad de calor evacuado.

En definitiva, la convección natural aparecerá en la función de corrección como una constante $m_0^{conv\ nat}$ y un coeficiente m_1 dándole un peso al valor de I_c^2 como se explica en 4.5.1.

Evacuación de calor por convección forzada Se determina que la convección forzada comienza a hacerse patente cuando ($U_w > 1\text{m/s}$)

De la misma forma que en convección natural se utiliza el número de Grashof (Gr) para determinar el valor de h_c , en la convección forzada se utiliza el número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{U \cdot l_{car}}{\nu} \quad (4.7)$$

Donde:

- U : Velocidad del fluido.
- l_{car} : Longitud característica.
- ν : cinemática.

En experimentación la relación que hay entre el número de Nusselt y el número de Reynolds viene dada por la siguiente formulación:

$$Nu = C \cdot Re_L^m \cdot Pr^n \quad (4.8)$$

Según 4.8 el número de Nusselt aumenta en proporción a una potencia emésima del Número de Reynolds y por tanto en la misma proporción con respecto a la velocidad del fluido refrigerante, en este caso la velocidad del viento U_w .

En este caso tampoco se considera el número de Prandtl relevante al ser el aire el fluido refrigerante común a todo el episodio.

Los coeficientes de transmisión de calor por convección forzada de la esfera y del cable, dependen de la velocidad del viento y de la relación de longitudes características de la geometría expuesta.

La dependencia de la relación entre los valores de h_c de la esfera-conductor de la longitud, es menor que en la convección natural e igualmente constante, pero por otra parte el valor de h_c en convección forzada está fuertemente ligado a la velocidad del viento.

Esto quiere decir que los valores del coeficiente de transmisión de calor por convección forzada (h_c^{forz}) son varias veces mayores que los valores del coeficiente de transmisión de calor por convección natural (h_c^{nat}), y que hace que a medida que la velocidad del viento U_w aumente, el coeficiente de transmisión de calor por convección forzada predomine, y sea principalmente dependiente de la velocidad del viento.

Cuando la velocidad del viento (a la que está expuesta toda la probeta) aumenta, se observa que los coeficientes de transmisión de calor por convección puntuales, además de

mejorar ampliamente $h_c^{forz} \gg h_c^{nat}$, se igualan en toda la superficie del conjunto, motivo por el cual la desviación $(T_c - T_{sir})$ disminuye, siendo esta desviación máxima cuando el único mecanismo de refrigeración por convección, lo es únicamente por convección natural.

Después de estas reflexiones, se puede concluir que el efecto de convección forzada en la desviación de temperaturas actúa como compensador de la desviación $(T_c - T_{sir})$, y se debe incluir en la función de tratamiento de la medida, asumiendo que en primera aproximación y de forma experimental, el mejor ajuste posible se da para una función polinómica de segundo grado.

En la dispersión representada en 4.4.2 queda reflejada la influencia de la velocidad del viento U_w con respecto al diferencial de temperaturas aproximadamente según 4.9.

$$(T_c - T_{sir})_{U_w} = m_2 \cdot U_w^2 + m_1 \cdot U_w + m_0^{conv nat} \quad (4.9)$$

Evacuación de calor al exterior por radiación.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro emite una radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total en (W/m^2) que es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

Donde E es la radiación total del cuerpo negro, que se puede definir como la radiación integral, para todas las direcciones y longitudes de onda transmitida por unidad de superficie del cuerpo negro, en la unidad de tiempo y por grado Kelvin de temperatura elevado a la cuarta potencia.

La potencia emitida para un cuerpo real (cuerpo gris) es menor que la de un cuerpo negro siendo un parámetro adimensional (emisividad) el que establece la relación entre el máximo de energía emisible posible y el real emitido, esta potencia viene dada por:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.10)$$

Donde:

- $0 \leq \epsilon \leq 1$. Emisividad del cuerpo.
- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.
- T = Temperatura absoluta del cuerpo en K.

Observando en la práctica que la desviación de temperatura entre sensor IR y la sonda de contacto es dependiente de la temperatura de la esfera, en este caso y teniendo en cuenta la interactividad física en cuanto a la radiación emitida al exterior de la esfera se refiere, se tomará la cuarta potencia de la temperatura como variable explicativa para contribuir al procesado de señal.

$$(T_c - T_{sir})_{T_{sir}} = (\epsilon_{esfera} - \epsilon_{cable}) \cdot \sigma \cdot T_{sir}^4 = m_4 \cdot T_{sir}^4 \quad (4.11)$$

Asignación de pesos a las variables explicativas.

En este apartado se justifica la existencia de una dependencia lineal entre estas variables y/o sus transformaciones, y la desviación de temperaturas propiamente dicha ($T_c - T_{sir}$). Se considera que esta condición la cumplen un total de 3 parámetros (velocidad del viento (U_w), intensidad (I_c) y temperatura medida en el sensor IR (T_{sir})).

La relación de parámetros parámetros que da peso a estas variables será la siguiente:

1. m0: Coeficiente suma de las distintas constantes recogidas en el prototipo.
2. m1: Coeficiente que da peso a la velocidad del viento.
3. m2: Coeficiente que da peso al cuadrado de la velocidad del viento.
4. m3: Coeficiente que da peso al cuadrado de la intensidad que atraviesa el conductor.
5. m4: Coeficiente que da peso a la cuarta potencia de la temperatura medida con el sensor IR.

Por tanto, el resultado de la búsqueda de la línea base, será la combinación de las cuatro variables con cuatro pesos asignados a cada una de ellas (m1, m2, m3 y m4) mas una constante (m0) que buscará una relación entre estas variables y la desviación entre la temperatura medida por el sensor IR y el sensor de contacto ($T_c - T_{sir}$).

La corrección de temperatura sobre la temperatura obtenida por el sensor IR vendrá dada por la ecuación 4.12 como la suma de las correcciones que vienen de la intervención de cada una de las variables explicativas enunciadas.

$$(T_c - T_{sir}) = (T_c - T_{sir})_{T_{sir}} + (T_c - T_{sir})_{U_w} + (T_c - T_{sir})_{I_c} + C \quad (4.12)$$

Como si se tratara de la búsqueda de una línea base que modele el comportamiento de las desviaciones de temperatura ($T_c - T_{sir}$), se busca una regresión lineal multivariable que ajuste una corrección de la temperatura tomada por el sensor IR.

Esta regresión lineal se armará a partir de los datos obtenidos el último año en el que se ha monitorizado el prototipo, de forma que se encontrarán los pesos con los que cada una de las variables influye en el fenómeno, y que nos indicará como se deben compensar los efectos de cada una de estas en la expresión de la corrección estimada.

En el modelo de regresión lineal múltiple, aparecen varias variables explicativas de forma que la ecuación resultante queda:

$$y = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \dots + C \quad (4.13)$$

En esta operación se busca un hiperplano de regresión de forma que se minimiza la varianza residual. Un hiperplano de regresión es una función lineal de mas de tres dimensiones que se ajusta a una muestra de datos.

La condición de este hiperplano es que la varianza residual, es decir el sumatorio de los errores al cuadrado sea mínimo (aproximación por minimos cuadrados) de forma que se cumpla que.

Estando definida la varianza residual como:

$$S^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (4.14)$$

La condición es para conseguir este objetivo es:

$$\text{Min} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.15)$$

A esta correlación lineal objetivo de varias variables, que cumple la condición impuesta en 4.15 se le denomina hiperplano, ya que se corresponde a una expresión similar a de la de un plano pero de mas de tres dimensiones.

La expresión del hiperplano cobra la apariencia de 4.16 que se construye a partir de los coeficientes obtenidos de la regresión.

$$\hat{y}_i = m_0 + m_1 \cdot x_{1,1} + m_2 \cdot x_{2,j} + \dots m_k \cdot x_{k,j} \quad (4.16)$$

Utilizando notación matricial:

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - \hat{y}_1 \\ y_2 - \hat{y}_2 \\ \dots \\ \dots \\ y_n - \hat{y}_n \end{bmatrix} = y - \hat{y} \quad (4.17)$$

Y teniendo en cuenta la definición de \hat{y} :

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - m_0 - m_1 \cdot x_{1,1} - m_2 \cdot x_{2,1} - \dots m_k \cdot x_{k,1} \\ y_2 - m_0 - m_1 \cdot x_{1,2} - m_2 \cdot x_{2,2} - \dots m_k \cdot x_{k,2} \\ \dots \\ \dots \\ y_n - m_0 - m_1 \cdot x_{1,n} - m_2 \cdot x_{2,n} - \dots m_k \cdot x_{k,n} \end{bmatrix} = y - \hat{y} \quad (4.18)$$

$$u = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \cdot & \cdot & x_{k,1} \\ 1 & x_{1,2} & \cdot & \cdot & x_{k,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1,n} & \cdot & \cdot & x_{k,n} \end{bmatrix} = y - X * m \quad (4.19)$$

Por lo tanto la varianza residual se puede mostrar de la forma:

$$n * S^2 = u' * u = (y - X * m)' * (y - X * m) \quad (4.20)$$

Es decir, la varianza es función de los coeficientes m siendo

$$n * S^2 = \Phi(m) = \sum (y_j - \hat{y}_j)^2 = u' * u \quad (4.21)$$

Por tanto, la condición para que tenga un mínimo será:

$$\frac{\partial \Phi(m)}{\partial m} = 0 \quad (4.22)$$

Como resultado de esta condición se llega a que la matriz de coeficientes M resulta de:

$$\mathbf{M} = (X' * X)^{-1} * X' * Y \quad (4.23)$$

Para realizar el análisis de la calidad de la regresión se utiliza la ecuación básica del análisis de la varianza que es de la forma:

$$\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4.24)$$

Viniendo el coeficiente de determinación (R^2) dado por:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.25)$$

De esta forma se prevé que quede una función de corrección de parámetros como se muestra en 4.26 que devuelva la corrección de temperatura que hay que incrementar o decrementar a la temperatura T_{sir} para obtener una temperatura aproximada a la que realmente tiene el cable.

$$(T_c - T_{sir}) = m_4 \cdot T_{sir}^4 + m_3 \cdot I_c^2 + m_2 \cdot U_w^2 + m_1 \cdot U_w + m_0 \quad (4.26)$$

Por tanto, la temperatura corregida será según 4.27 de la forma.

$$T_{est} = T_{sir} + m_4 \cdot T_{sir}^4 + m_3 \cdot I_c^2 + m_2 \cdot U_w^2 + m_1 \cdot U_w + m_0 \quad (4.27)$$

$$T_{est} = T_{sir} + f(I_c, T_{sir}, U_w) \quad (4.28)$$

Como se explica en 4.5.1, se harán las siguientes transformaciones que consistirán en establecer la relación entre los parámetros medidos en el prototipo y las variables explicativas según 4.29.

$$x_{1,n} = I_c^2; x_{2,n} = T_{sir}^2; x_{3,n} = U_w^2; x_{4,n} = U_w; y_n = (T_c - T_{sir}) \quad (4.29)$$

Después de echas estas transformaciones y realizada la regresión lineal, utilizando como herramienta informática una plantilla electrónica, se obtienen los siguientes valores.

Los coeficientes m_4 , m_3 , m_2 , m_1 y m_0 que intervendrán en la función de corrección según se expresa en 4.26 y que soportan estos datos.

En la tabla 4.11 se muestran los valores de los coeficientes resultantes que dan peso a cada una de las variables explicativas incluidas en el array de datos de la regresión lineal.

m_4	m_3	m_2	m_1	m_0
7,79E-10	-4,80E-01	3,34E-02	1,23E-05	-3,65E+00

TABLA 4.11: Tabla de coeficientes de la función de corrección propuesta

Con esta corrección de temperatura se presentan las campanas de distribución de casos de diferencias de temperaturas ($T_c - T_{sir}$) y ($T_c - T_{est}$) 4.26 en la que se puede apreciar como la función de corrección ajusta y devuelve unos valores de temperaturas similares a la temperatura captada por la sonda de contacto compensando la desviación provocada por las variables explicativas puestas en juego.

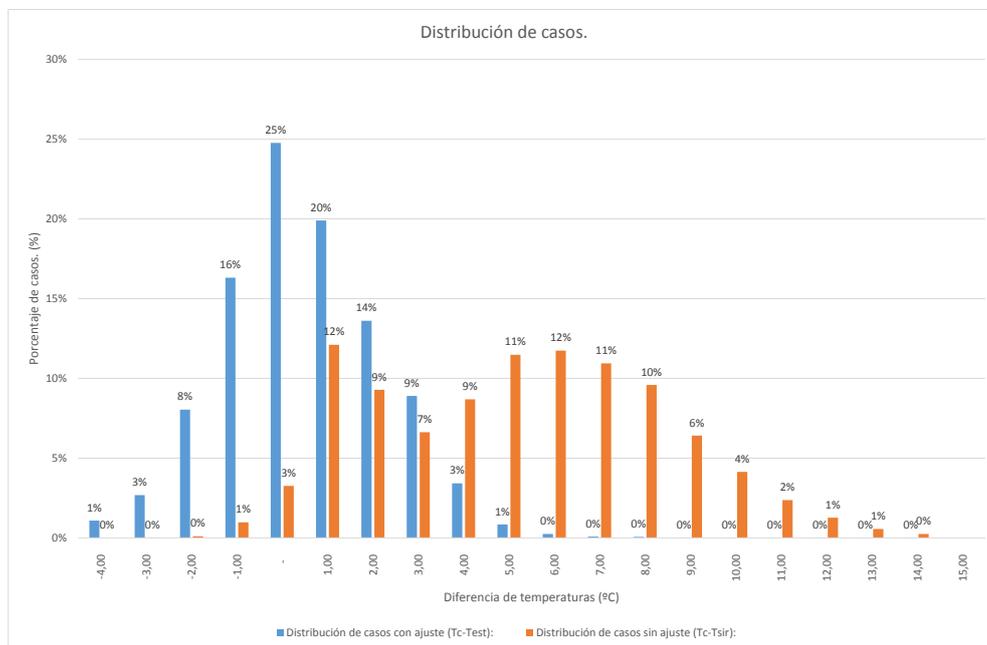


FIGURA 4.26: Distribución de error en la medida

El coeficiente de determinación sobre los valores de temperatura tomada por la sonda de contacto T_c y la temperatura estimada T_{est} en grados centígrados es:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 0,978 \quad (4.30)$$

Para concluir si el ajuste de la regresión es suficiente, en la tabla 4.12 se muestra una serie de valores indicativos que indican su calidad.

Esta calidad en el ajuste se confirma en la figura 4.27 donde se representa la distribución de casos en porcentaje acumulado.

Sin correlación	Correlación positiva media	Correlación positiva considerable	Correlación positiva muy fuerte	Correlación positiva perfecta
<0,10	0,50	0,75	0,9	1

TABLA 4.12: Tabla de valores indicativos para el coeficiente de ajuste

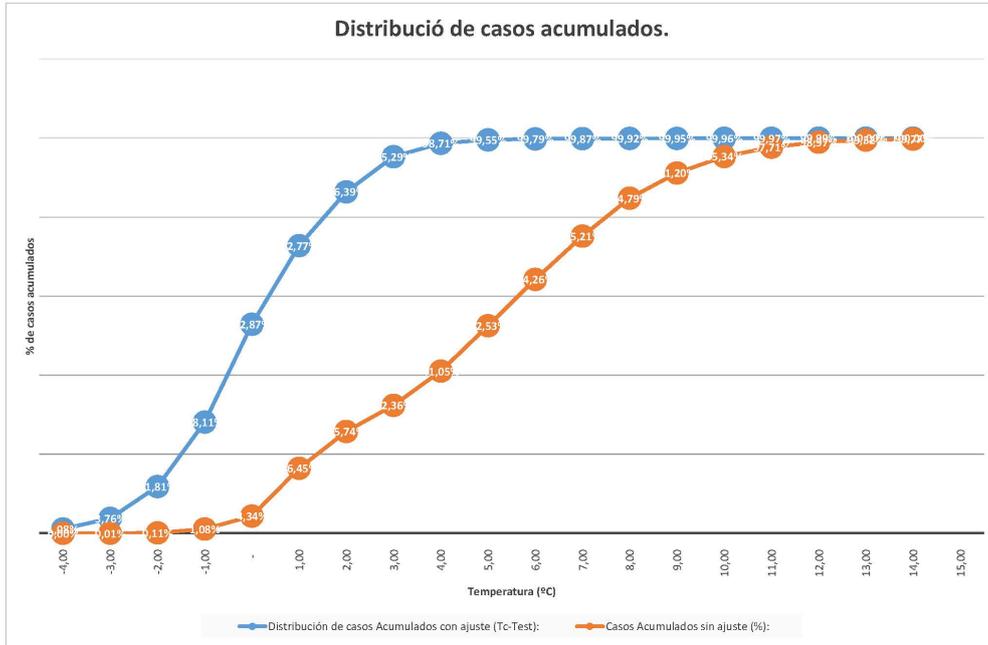


FIGURA 4.27: Distribución de error acumulado en la medida

	(Tc-Test)	-3,00	-2,00	-1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00
Distribución de casos con ajuste (Tc-Test):		1 %	3 %	8 %	16 %	25 %	20 %	14 %	9 %	3 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Distribución de casos Acumulados con ajuste (Tc-Test):		1,08 %	3,76 %	11,81 %	28,11 %	52,87 %	72,77 %	86,39 %	95,29 %	98,71 %	99,55 %	99,79 %	99,87 %	99,92 %	99,95 %	99,96 %	99,97 %	99,99 %	100,00 %
Distribución de casos sin ajuste (Tc-Tsir):		0 %	0 %	0 %	1 %	3 %	12 %	9 %	7 %	9 %	11 %	12 %	11 %	10 %	6 %	4 %	2 %	1 %	1 %
Casos Acumulados sin ajuste (Tc-Tsir):		0,00 %	0,01 %	0,11 %	1,08 %	4,34 %	16,45 %	25,74 %	32,36 %	41,05 %	52,53 %	64,26 %	75,21 %	84,79 %	91,20 %	95,34 %	97,71 %	98,97 %	100 %

TABLA 4.13: Valores de proporción de casos por desviación de temperaturas

Como indicación en la tabla 4.13 queda reflejado que el 86,29 % de los casos procesados tienen una desviación de menos de $\pm 3^{\circ}C$ de temperatura, sobre la temperatura real medida.

Otra forma de mostrar como opera la función de corrección en los valores de la temperatura se muestra en la figura 4.28.

En esta figura se observa como se comporta la dispersión de los valores de temperaturas tomados por el sensor IR (T_{sir}), la dispersión de los valores obtenidos después del postprocesado (T_{est}) y la dispersión de la función de corrección de los valores (ΔT) en comparación con la temperatura tomada por contacto directamente en el conductor (T_c) (eje x).

Como muestra definitiva, en la figura 4.29 se muestra la temperatura medida por contacto

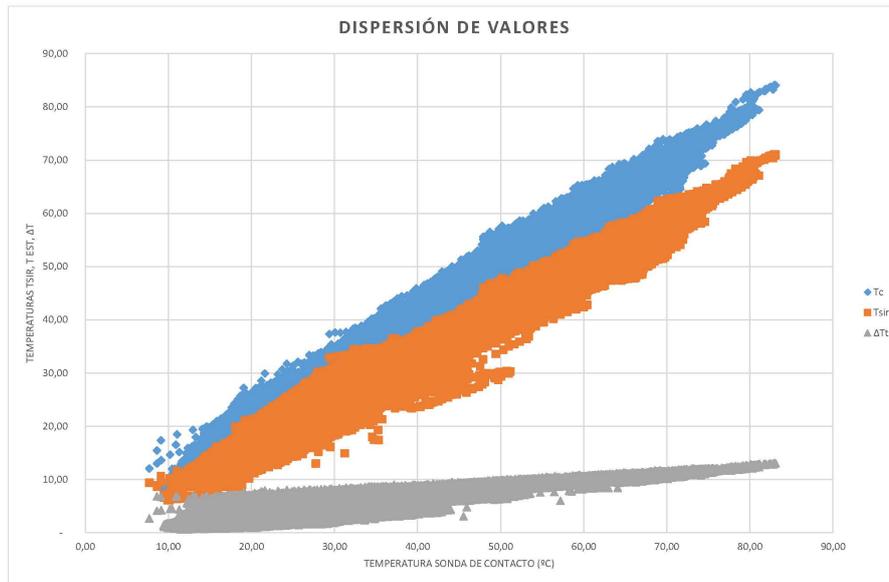
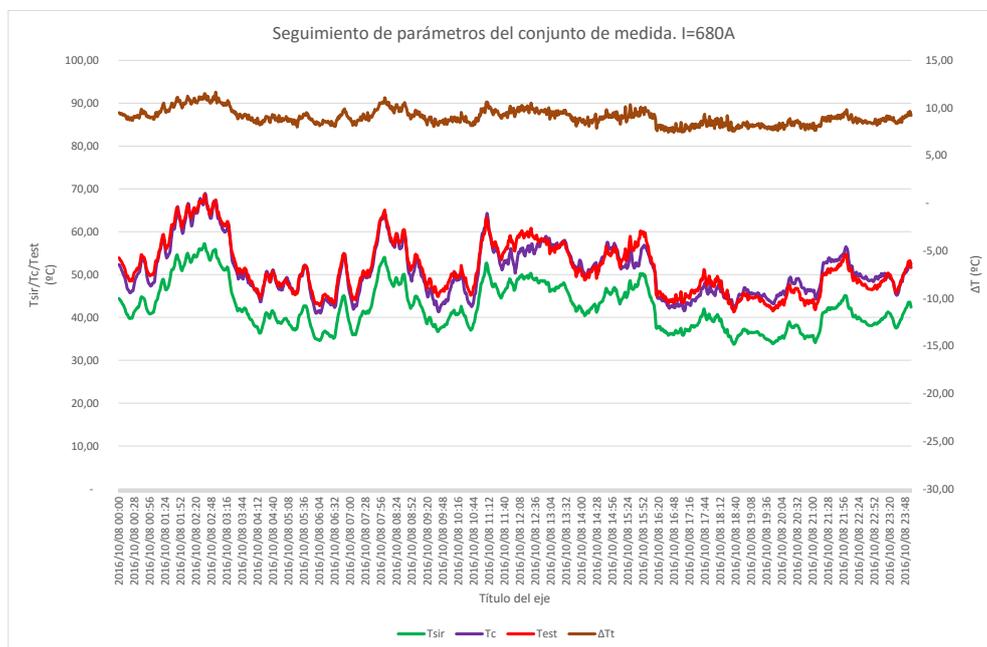
FIGURA 4.28: Dispersión de T_{sir} , T_{est} y ΔT 

FIGURA 4.29: Seguimiento de temperaturas del conjunto de medida

(T_c), la temperatura medida por el sensor IR (T_{sir}), la temperatura estimada (T_{est}) y la corrección obtenida por la función de corrección (ΔT) de forma instantánea.

De esta forma se deja plasmado este método de medida de temperatura del conductor como una posibilidad técnicamente viable para medida en conductores pertenecientes a líneas eléctricas que en la actualidad están en explotación.

4.5.2. Comprobación de los parámetros extrapolando resultados

En este apartado se estudian los resultados que aporta la función de corrección de temperaturas con datos extrapolados.

Después de cerrar las bases de datos que se han utilizado para realizar el ajuste de la función de corrección, se han seguido registrando los parámetros ambientales y estados de carga del conductor mediante el sistema de monitorización del prototipo.

Se utilizará la función de corrección para, introduciendo en esta los nuevos datos, comparar los resultados que devuelve con los captados por la sonda de contacto.

De esta forma, se puede comprobar que la función de corrección de temperaturas se ajusta al comportamiento del conjunto de medida, la función de corrección queda expresada como en 4.31 y será a partir de esta, de la que se obtienen los resultados expuestos en este apartado.

$$T_{est} = T_{sir} + (7,79E-10) \cdot T_{sir}^4 - (4,80E-01) \cdot I_c^2 + (3,34E-02) \cdot U_w^2 + (1,23E-05) \cdot U_w - 3,65 \quad (4.31)$$

En la figura 4.30 se muestran las frecuencias acumuladas de casos en el eje Y, sobre las diferencia entre temperatura de contacto y estimada ($T_c - T_{est}$).

Teniendo en cuenta esto, quedan las curvas de distribución de casos de la siguiente forma.

$(T_c - T_{sir})$	-5,00	-4,00	-3,00	-2,00	-1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
Distribución casos acumulados (%)	0%	0%	2%	4%	10%	24%	38%	50%	72%	91%	94%	97%	99%	100%	100%
Distribución casos (%)	0%	0%	1%	3%	6%	14%	14%	12%	22%	19%	3%	3%	3%	1%	0%

TABLA 4.14: Distribución de frecuencias de $(T_c - T_{sir})$ aplicando función de corrección

Otra forma de mostrar como opera la función de corrección con los valores de temperatura es hacerlo en forma de dispersión. En la figura 4.31 se muestran los valores de temperatura tomados por el sensor IR (T_{sir}), temperatura estimada (T_{est}) y corrección de temperatura (ΔT) (eje Y) frente a la temperatura de contacto (eje X).

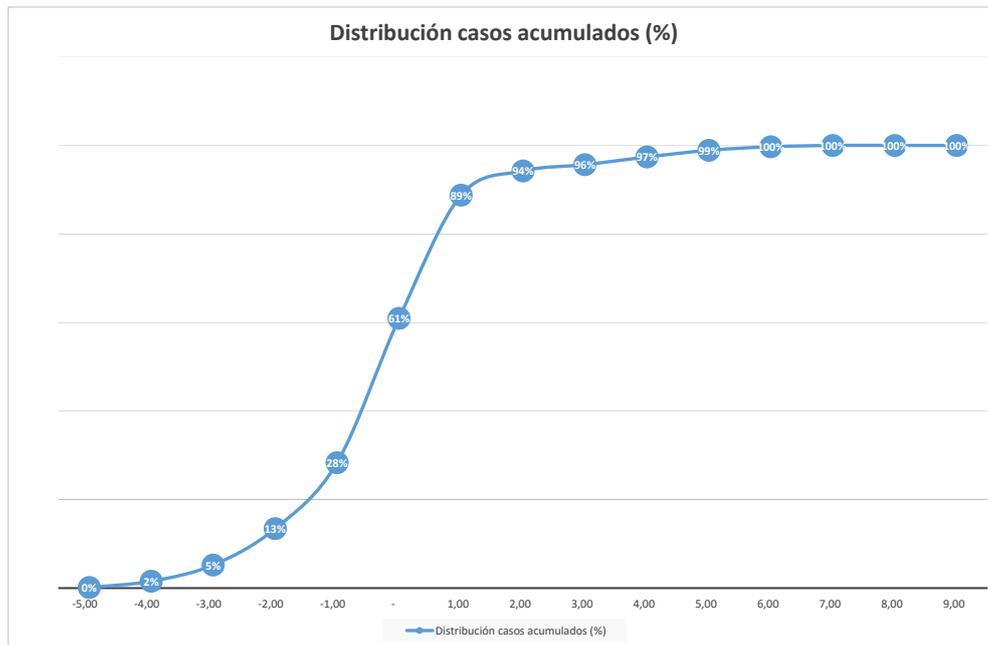


FIGURA 4.30: Distribución acumulada de desviaciones arrojada por la función de corrección a partir de los datos aportados

En la figura 4.32 se muestra como la función de corrección sigue los valores instantáneos de la temperatura que se ha tomado con la temperatura de contacto en el espacio de tiempo durante el que se han obtenido los datos.

4.5.3. Comprobación de la desviación de las temperaturas corregidas y el modelo analítico

En este apartado se pasa directamente a comparar los valores de las temperaturas corregidas (T_{est}), las temperaturas medidas por el sensor de contacto IR (T_c) y las obtenidas a partir del modelo analítico (T_t).

De esta forma se trata de valorar la posibilidad de obtener una imagen del margen de amplitud del conductor directamente de la medida de los parámetros obtenidos desde el prototipo.

Como se puede observar, la medida hecha por el conjunto de medida corregida, se puede utilizar para estimar el margen de amplitud que tiene un conductor teniendo en cuenta los parámetros ambientales.

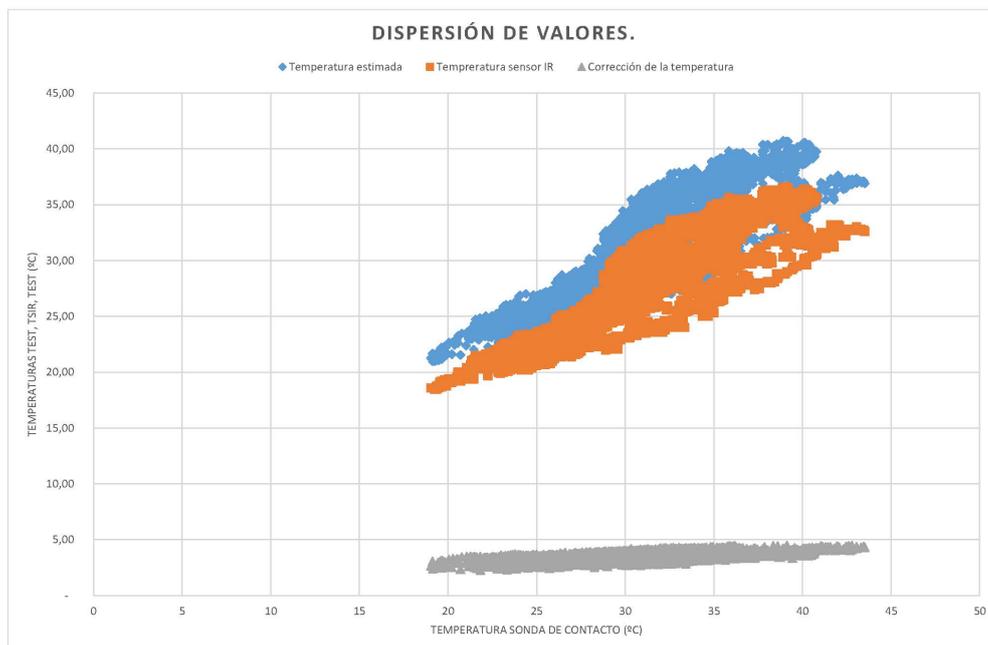


FIGURA 4.31: Dispersión de T_{sir} , T_{est} y ΔT

En la figura 4.33 se puede observar como la temperatura corregida sigue los valores de la temperatura teórica del algoritmo CIGRÉ. En el gráfico de acumulados se puede ver que un

	-4,00	-3,00	-2,00	-1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00
Distribución acumulada (%) Test-Tc	0%	3%	11%	24%	48%	80%	94%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distribución acumulada (%) Tt-Tc	1%	3%	5%	10%	15%	28%	43%	62%	77%	85%	89%	92%	94%	96%	97%	98%	99%	99%	100%
Distribución acumulada (%) Tt-Test	1%	4%	7%	11%	17%	27%	42%	61%	76%	84%	88%	90%	93%	94%	96%	97%	98%	99%	100%

TABLA 4.15: Valores de proporción de casos acumulados $(T_{est} - T_c)(T_t - T_c)(T_{est} - T_t)$

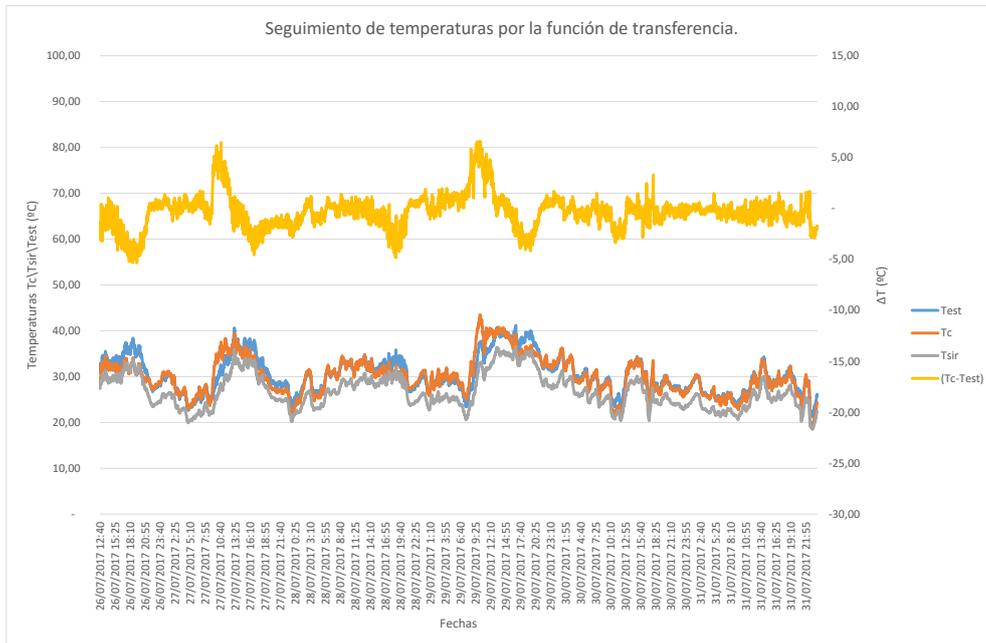


FIGURA 4.32: Seguimiento de las temperaturas reales por la función de corrección a partir de nuevos registros

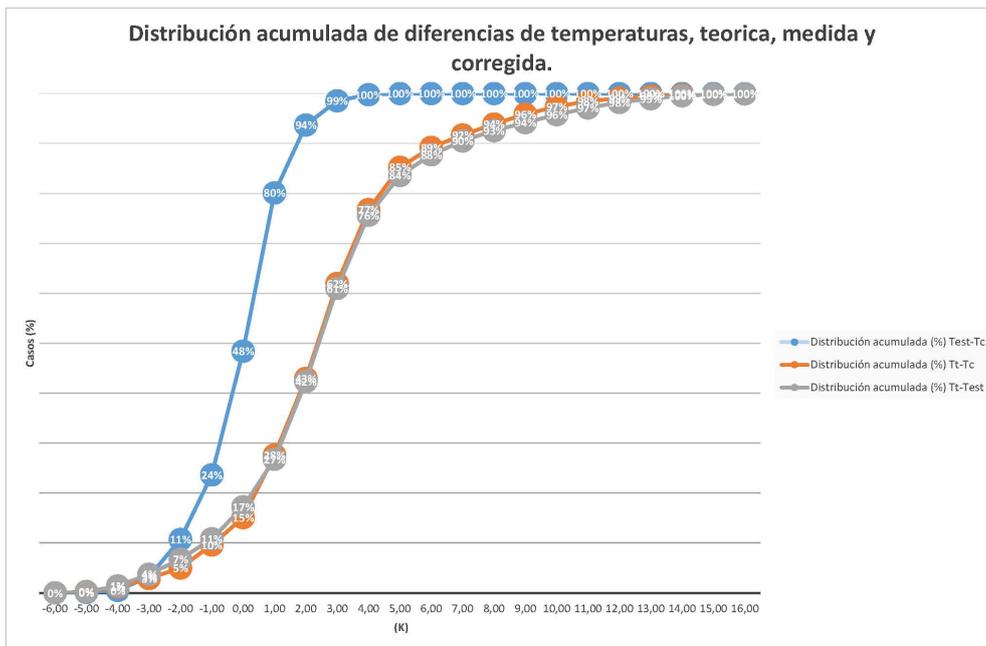


FIGURA 4.33: Comparación de acumulados entre temperatura T_t , T_c y T_{est}

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras de investigación

5.1. Conclusiones

Se ha construido un prototipo que simula una línea eléctrica, cuyo objetivo es ensayar conductores en distintos estados de carga obteniendo los siguientes resultados:

- Ha sido validado con el modelo analítico propuesto por CIGRÉ [CIG12b], utilizado para la reproducción del comportamiento térmico de un conductor en explotación.
- El prototipo está habilitado para ensayar estados de carga del conductor de difícil reproducción en una línea en estado de explotación real (elevadas intensidades).
- En este prototipo y debido a que se utilizan bajas tensiones en la experimentación, se optimizan las condiciones de seguridad de los operarios y se facilita la ubicación de los sensores haciendo más sencilla la obtención de datos.

Como fruto del desarrollo de este prototipo, se ha conseguido testear el comportamiento de un sensor de medida de temperatura superficial utilizando termometría infrarroja y patentado por el Grupo de Tecnologías Electro-Energéticas Avanzadas (GTEA) con el número de referencia ES 2 542 043 A1. Con respecto a este nuevo sistema de medida cabe resaltar los siguientes resultados:

- Este método de termometría permite la medida de temperatura del conductor sin contacto, evitándose de esta forma la problemática asociada a la implementación de la sensorica bajo los efectos del campo electromagnético propio de las líneas eléctricas.
- El prototipo cumple normativamente las distancias de seguridad reflejadas en el Reglamento de Líneas de Alta Tensión Español como queda reflejado en la tabla 2.1

para instalaciones de hasta 170 kV. De esta forma queda justificada la viabilidad de la aplicación práctica de este método en líneas actualmente en explotación.

- Gracias al uso prolongado del prototipo durante un año, se ha conseguido desarrollar una función de corrección sobre la medida de temperatura sin contacto capaz de estimar la temperatura superficial del conductor de forma automática.
- Los datos obtenidos mediante esta tecnología han sido respaldados por los resultados tanto del modelo analítico según CIGRÉ como por las medidas de temperatura obtenidas a través de los sensores de contacto ubicados en el prototipo.
- Utilizando la metodología expresada en la patente ES 2 569 431 B1 titulada «Metodología para el cálculo y predicción de la ampacidad en líneas eléctricas aéreas, según la elección de emplazamientos críticos», se puede llegar a obtener el margen de ampacidad de los conductores directamente a través de este innovador sistema de medida directa sin contacto.

5.2. Líneas futuras de investigación

A partir de esta tesis se plantean varias líneas de investigación posibles:

1. El siguiente paso a dar de cara a la transferencia de la patente del sistema de medida de temperatura sin contacto es su instalación experimental en campo. Esto facilitará la gestión dinámica de líneas eléctricas y permitirá el uso de este nuevo sistema a nivel industrial.
2. Este prototipo está diseñado de forma que permite documentar el comportamiento de otros tipos de conductores en condiciones normales y anómalas antes de ser instalados definitivamente. De esta forma se plantea la posibilidad testear el comportamiento en gestión dinámica de los conductores de alta capacidad.
3. Este prototipo queda acondicionado para poder analizar fácilmente el comportamiento de nuevos equipos de medida de los parámetros característicos antes de implantarlos en campo.
4. Como se menciona en la literatura estudiada, las correlaciones de los estándares no ajustan correctamente con vientos de baja velocidad ($U_w < 1m/s.$). Este prototipo permitirá un estudio mas detallado de estos casos y de esta forma mejorar los modelos matemáticos que describen el comportamiento térmico de los conductores en estas condiciones.
5. Al tener el prototipo a la intemperie, se ha identificado el posible efecto de las precipitaciones sobre la refrigeración del conductor. En este caso no se ha dispuesto de un número de muestras estadísticamente significativo como para poder cuantificar la influencia de este fenómeno atmosférico, pero a futuro no cabe duda de que se dispondrá de datos suficientes para clarificar este efecto y compararlo con aquellos datos de los que se dispone en campo.
6. Este prototipo permite además profundizar en el estudio de transmisión de calor por radiación, en particular sobre el efecto en la refrigeración del conductor de la radiación nocturna hacia el exterior. Además gracias a la instalación de un piranómetro enfocado hacia el suelo se podría estimar de forma mas exacta el valor de la radiación difusa.

5.2.1. Resultados esperados y posible impacto.

1. Publicación de un artículo, actualmente en redacción, en una revista indexada JCR en el área de ingeniería eléctrica y térmica.
2. Implantación a nivel industrial del método de medida de temperatura sin contacto para la gestión dinámica de líneas eléctricas.
3. Empleo del prototipo para el ensayo de conductores de especial relevancia a nivel industrial, así como la sensórica de nuevo desarrollo para su aplicación en líneas eléctricas.

Bibliografía

- [al17] P. Castro et al. «Study of different mathematical approaches in determining the dynamic rating of overhead power lines and a comparison with real time monitoring data». En: *Applied Thermal Engineering* 111 (2017), págs. 95-102. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.081>. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.081>.
- [Arr+15] Alberto Arroyo y col. «Comparison between IEEE and CIGRE Thermal Behaviour Standards and Measured Temperature on a 132-kV Overhead Power Line». En: *Energies* 8.12 (2015), págs. 13660-13671. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en81212391>. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en81212391>.
- [C.04] Schaller C. «Concepts of Model Verification and Validation , Los Alamos.» En: *Los Alamos National Laboratory* (2004).
- [CIG06a] CIGRE. «Development and Implementation of a Monitoring System to Increase the Capacity of Overhead Lines, 42nd Cigre Session, Paris, August 2008». En: (2006).
- [CIG06b] CIGRE. «TB 299. Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings». En: (2006).
- [CIG12a] CIGRE. «TB 498. Guide for Application of Direct Real-Time Monitoring Systems». En: (2012).
- [CIG12b] CIGRE. «TB 601. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines». En: (2012).
- [CIG92] CIGRE. «Mathematical Model for Evaluation of Conductor Temperature in The Steady (or Quasi-Steady) State (Normal Operation)». En: *ELECTRA* 144 (1992), págs. 109-115.
- [CIG98] CIGRE. «Increasing the Capacity of Overhead Lines in the 400 Kv Spanish Transmission Network: Real Time Thermal Ratings.» En: (1998), págs. 22-211.
- [Dav70] Murray W. Davis. «Nomographic Computation of the Ampacity Rating of Aerial Conductors». En: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on PAS-89.3* (1970), págs. 387-399. ISSN: 0018-9510. DOI: [10.1109/TPAS.1970.292715](https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292715).
- [Deb00] Anjan K. Deb. *Power Line Ampacity Systems*. CRC Press, 2000.

- [FLF83] S. D. Foss, S. H. Lin y R. A. Fernandes. «Dynamic Thermal Line Ratings Part I Dynamic Ampacity Rating Algorithm». En: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-102.6 (1983), págs. 1858-1864. ISSN: 0018-9510. DOI: [10.1109/TPAS.1983.317795](https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317795).
- [HMF11] J. Heckenbergerova, P. Musilek y K. Filimonenkov. «Assessment of seasonal static thermal ratings of overhead transmission conductors». En: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. 2011, págs. 1-8. DOI: [10.1109/PES.2011.6039393](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039393).
- [IEE12] IEEE. «IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors (Revision of IEEE STD 738-1993)». En: *IEEE Std 738-2012 Draft 10 (Revision of IEEE Std 738-2006)* (2012), págs. 1 -67.
- [IEE13] IEEE. «IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors». En: *IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 - Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013)* (2013), págs. 1-72. DOI: [10.1109/IEEESTD.2013.6692858](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6692858).
- [MCO15] Mario MANANA CANTELI y Others. «Metodo y sistema para la medicion directa y sin contacto de la temperatura superficial en un cable.» Pat. ES 2 542 043 A1. Jul. de 2015. URL: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/7139>.
- [Mor71] V.T. Morgan. «Rating of conductors for short-duration currents». En: *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of* 118.3.4 (1971), págs. 555-570. ISSN: 0020-3270. DOI: [10.1049/piee.1971.0096](https://doi.org/10.1049/piee.1971.0096).
- [Red94] J.L. Reding. «A method for determining probability based allowable current ratings for BPA's transmission lines». En: *IEEE Transactions on Power Delivery* 9.1 (1994), págs. 153-161. DOI: <http://dx.doi.org/doi=10.1109/61.277689>. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/61.277689>.
- [Sch99] Neil P. Schmidt. «Comparison Between IEEE and CIGRE Ampacity Standards». En: *IEEE Transactions on Power Delivery* 14, 4 (1999).
- [SPL14] G.C. SIBILANT, A.J. Phillips y D.C. LAWRY. *Method for measuring electrical conductor temperature*. US Patent 8,657,490. 2014. URL: <https://www.google.ch/patents/US8657490>.
- [Zuc43] Myron Zucker. «Thermal Rating of Overhead Line Wire». En: *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the* 62.7 (1943), págs. 501-507. ISSN: 0096-3860. DOI: [10.1109/T-AIEE.1943.5058730](https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1943.5058730).